

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

Daniel Vinicius Belusso

SISTEMA AUTÔNOMO DE NAVEGAÇÃO PARA UM
VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO DO TIPO
QUADRICOPTERO

Passo Fundo

2019

Daniel Vinicius Belusso

SISTEMA AUTÔNOMO DE NAVEGAÇÃO PARA UM
VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO DO TIPO
QUADRÍPTERO

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, sob orientação do professor Me. Joan Michel Levandoski.

Passo Fundo

2019

Daniel Vinicius Belusso

**Sistema autônomo de navegação para um veículo aéreo não tripulado do tipo
quadricoptero**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, sob orientação do professor Me. Joan Michel Levandoski.

Aprovado em ____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Joan Michel Levandoski - UPF

Prof. Me. Edson Santos Acco - UPF

Prof. Dr. Jocarly Patrocínio de Souza - UPF

Este trabalho é dedicado aos meus pais Celino e Margarita e a meus irmãos Sabrina e Rubens.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda minha família, por sempre me apoiarem em minhas escolhas e pela educação que me proporcionaram.

Aos meus amigos que me apoiaram, me deram força, agradeço pelos momentos de conversas, brincadeiras, até mesmo pelas discussões que de alguma maneira foram importantes para meu aprendizado.

A todos os professores, não só pelas aulas, mas pelos grupos de pesquisa que proporcionaram a esse curso, dos quais participei e hoje são de grande valor para o desenvolvimento deste projeto.

Agradeço a todos que de alguma forma foram importantes durante esta etapa em minha vida e puderam me entender e aceitar da maneira que sou, mesmo nem eu me aceitando.

Preferi por não citar nomes neste agradecimento, pois todas as pessoas possuem o seu valor nesta vida, cada uma contribuiu de uma maneira e espero que saibam o quanto são importantes para mim.

“Quando algo é importante o suficiente, você realiza mesmo que as chances não estejam a seu favor.”

Elon Musk.

RESUMO

O avanço tecnológico da indústria de microcontroladores e sensores de pequeno porte, fez com que os veículos aéreos não tripulados se tornassem uma realidade para meios corporativos como para a população civil em geral. A operação deste tipo de veículo pode apresentar vários riscos, tanto para terceiros, como para o veículo em si, devido às dificuldades em seu manuseio. Com isso, tomou-se como objetivo, desenvolver um protótipo de quadricoptero com baixo custo, que possa realizar missões de voo solicitadas pelo usuário, de maneira autônoma e que apresente a capacidade de desviar de obstáculos e uma interface visual para configuração de seu plano de voo. Para tal, foi utilizado um microcomputador Raspberry Pi em conjunto com uma controladora de voo Pixhawk, estes ligados a sensores fundamentais para o projeto. A realização da configuração do plano de voo pelo usuário e posteriormente a realização dessa missão autônoma, acontece por meio de softwares desenvolvidos em python 3 e embarcado no microprocessador.

Palavras-Chave: Raspberry Pi, Quadricoptero, voo autônomo.

ABSTRACT

The technological advancement of the small microcontroller and sensor industry has made unmanned aerial vehicles a reality for corporate as well as the general civilian population. Operation of this type of vehicle may present a number of risks to both third parties and the vehicle itself due to difficulties in handling. The aim was to develop a low-cost quadcopter prototype that can perform user-requested flight missions in an autonomous way that has the ability to dodge obstacles and a visual interface for configuring your flight plan. flight. For this, a Raspberry Pi microcomputer was used in conjunction with a Pixhawk flight controller, which are connected to sensors that are fundamental to the project. The configuration of the flight plan by the user and later the accomplishment of this autonomous mission happens through software developed in python 3 and embedded in the microprocessor.

Keywords: Raspberry Pi, quadricopter, autonomous flight.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1- GYROPLANE Nº 1	15
FIGURA 2 - FIREBEE Q-2A.....	16
FIGURA 3- QUADRICOPTERO EM X.....	18
FIGURA 4 - MOVIMENTOS QUADRICOPTERO EM CONFIGURAÇÃO X.....	19
FIGURA 5 - GRÁFICO PRESSÃO POR ALTITUDE	21
FIGURA 6 – SENSOR ULTRASSÓNICO	22
FIGURA 7 – TRIANGULAÇÃO GPS	23
FIGURA 8 – RASPBERRY PI 3 B+.....	24
FIGURA 9 – MAPA DO TERRENO EM GRID	25
FIGURA 10 – FRAME FJI F450 E LIGAÇÕES ELÉTRICAS.....	28
FIGURA 11 – – PROTÓTIPO DO PROJETO	29
FIGURA 12 – RÁDIO CONTROLE FLYSKY I6X.....	30
FIGURA 13 – BATERIA LION POWER 4S 5200MHA.....	31
FIGURA 14 – CURVA DE DESCARGA.....	31
FIGURA 15 - RACERSTAR BR2312 960KV	32
FIGURA 16 – DADOS DE PLACA RACERSTAR BR2312 960KV	33
FIGURA 17 – DIAGRAMA DE HARDWARE	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
FIGURA 18 - RASPBERRY PI 3B	34
FIGURA 19 – PIXHAWK POWER MODULE 30V 90A.....	35
FIGURA 20 - RACERSTAR RS30A LITE	36
FIGURA 21 - UBLOX GPS NEO-M8N.....	37
FIGURA 22 – INSTALAÇÃO GPS.....	38
FIGURA 23 - PIXHAWK	39
FIGURA 24 – PIXHAWK E MESA ANTI-VIBRAÇÃO	40
FIGURA 25 - POSIÇÕES DE CALIBRAÇÃO DO ACELERÔMETRO	41
FIGURA 26 - CALIBRAÇÃO MAGNETOMETRO DE 3 EIXOS	42
FIGURA 27 – SENSOR ULTRASSÓNICO GY-US42.....	43
FIGURA 28 – INSTALAÇÃO SENSORES ULTRASSÓNICOS	43
FIGURA 29 – CONVERSOR BEC 6A	44
FIGURA 30 – INTERFACE VISUAL	45
FIGURA 31– DIAGRAMA DE BLOCOS INTERFACE VISUAL	46
FIGURA 32 – ACESSO REMOTO VIA CABO DE REDE	47
FIGURA 33 – DIAGRAMA DO SOFTWARE DE NAVEGAÇÃO AUTÔNOMO	48
FIGURA 34 – DIAGRAMA DE CONFIGURAÇÃO E COMUNICAÇÃO.....	49
FIGURA 35 – DIAGRAMA DE VERIFICAÇÃO DO SISTEMA	51
FIGURA 36 – LEITURA DOS SENSORES ULTRASSÓNICOS.....	52
FIGURA 37 – LEITURA DOS SENSORES ULTRASSÓNICOS FILTRADOS	52
FIGURA 38 – DIAGRAMA DO SOFTWARE DE NAVEGAÇÃO	53
FIGURA 39 – PROTÓTIPO FINAL	54

FIGURA 40 – HÉLICE DESBALANCEADA	56
FIGURA 41 – HÉLICE BALANCEADA	56
FIGURA 42 – GRÁFICO CONSUMO MÁXIMO DO SISTEMA	57
FIGURA 43 – DESLOCAMENTO DO VEÍCULO.....	58
FIGURA 44 – CONSUMO ENERGÉTICO E VELOCIDADE	58
FIGURA 45 – VOO DE ALTA ALTITUDE	59
FIGURA 46 – ALTITUDE E VELOCIDADE DO PERCURSO	60

LISTA DE ABREVIATURAS

VANT's – Veículos aéreos não tripulados
ESC – Controlador eletrônico de velocidade
IMU – Unidade de medição inercial
PID – Proporcional integral derivativo
LIPO – Polímero de lítio
I2C – Circuito Inter-integrado
USB – Universal Serial Bus
GPS – Sistema de posicionamento global
PWM – Modulação de Largura de Pulso

LISTA DE SIGLAS

ANAC – Agência nacional de aviação civil

DoD – Departamento de Defesa dos Estados Unidos

ANATEL – Agência nacional de telecomunicações

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CONTEXTO.....	13
1.2 OBJETIVO GERAL.....	13
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.4 JUSTIFICATIVA	14
2 REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1 REVISÃO HISTORICA	15
2.2 COMPONENTES BASICOS DE UM QUADRICOPTERO	16
2.3 REGRAS PARA USO DE DRONES NO BRASIL	17
2.4 FUNCIONAMENTO DE UM QUADRICOTERO	18
2.4.1 Graus de liberdade	19
2.4.2 Unidade de Medição Inercial (IMU).....	20
2.5 SENSORES	20
2.5.1 Barômetro	20
2.5.2 Ultrassônico.....	21
2.5.3 Sistema de Posicionamento Global (GPS).....	22
2.6 RAPBERRY PI	23
2.7 PLATAFORMA ARDUPILOT	24
2.8 API DRONEKIT	24
2.9 SISTEMAS AUTONOMOS DE NAVEGAÇÃO PARA DRONES	25
3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	27
3.1 ESTRUTURA MECÂNICA	28
3.2 RÁDIO CONTROLE	29
3.3 BATERIA.....	30
3.4 MOTORES	32

3.5 HARDWARE	33
3.5.1 Microcomputador	34
3.5.2 Voltímetro	35
3.5.3 Controlador eletrônico de velocidade (ESC)	35
3.5.4 Modulo GPS	36
3.5.5 Controladora de voo	38
<i>3.5.5.1 Calibração do acelerômetro.....</i>	<i>40</i>
<i>3.5.5.2 Calibração do Magnetometro</i>	<i>41</i>
3.5.6 Ultrassônico.....	42
3.5.7 Conversor DC/DC	43
3.6 SOFTWARE.....	44
3.6.1 Interface Visual.....	44
3.6.2 Sistema de voo autônomo.....	47
<i>3.6.2.1 Configuração e comunicação</i>	<i>49</i>
<i>3.6.2.2 Verificação do sistema</i>	<i>50</i>
<i>3.6.2.3 Navegação</i>	<i>51</i>
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1 RESULTADOS SOBRE A MONTAGEM DO VEICULO	54
4.2 RESULTADOS CONSUMO ENERGETICO	56
4.2.1 Teste estático do máximo consumo	56
4.2.2 Teste de consumo médio	57
4.3 TESTES DE VOO	59
4.4 SENSORES E OBSTACULOS	60
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão abordados o contexto a justificativa e o objetivo do projeto. Essas são informações crucias para o desenvolvimento deste trabalho.

1.1 CONTEXTO

Em um âmbito geral, veículos aéreos não tripulados (VANT's) ou como são conhecidos popularmente, *drones*, são apenas aeronaves para fins militares ou de recreação. Hoje em dia, sua aplicação se estende por diversos setores, como fotografias aéreas, transportes de mercadorias. No Brasil, cerca de 40% destes veículos são utilizados na agricultura (AUGUSTO, 2018).

A evolução tecnológica vivenciada nos últimos anos possibilitou a rápida popularização destes entre a população, com isso também veio à tona o grande risco que estes aparelhos podem causar a pessoas que estão presentes ao seu redor, pois muitos destes não apresentam qualquer sensor capaz de identificar obstáculos. Em 2017, a agência nacional de aviação civil (ANAC), estabeleceu regras para o uso destes aparelhos junto com a exigência de cadastro de cada veículo a fim de realizar um melhor controle sobre a rápida popularização dos mesmos

A fim de evitar possíveis acidentes, empresas do setor começaram a pesquisar por técnicas que pudessem ser utilizadas para identificar o ambiente ao redor do veículo e desviar de obstáculos. Como presente nos da empresa chinesa de drones DJI, que vem adicionando cada vez mais sensores em seus drones e melhorando seu sistema de controle a fim de realizar atividades autônomas e evitar possíveis acidentes e situações de risco (CODEL, 2017).

1.2 OBJETIVO GERAL

O projeto visa detalhar um quadricoptero que possa através de coordenadas de GPS informadas pelo usuário, realizar um voo autônomos e de forma segura, desviando de obstáculos que surgirem em seu caminho.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este trabalho tem por objetivos específicos:

- a) Construção de um protótipo.
- b) Aquisição de dados de sensores instalados no protótipo.
- c) Aplicação de filtros e interpretação dos dados adquiridos.
- d) Desenvolvimento de um software de navegação autônomo para quadricóteros.
- e) Realizar testes em bancada e em voo.

1.4 JUSTIFICATIVA

Drones com a capacidade de identificar e desviar de obstáculos, são uma tendência e até mesmo uma necessidade. Desta forma, a fim de satisfazer uma grande demanda por serviços aéreos profissionais, como entregas de mercadorias e filmagens aéreas. (GALVÃO, 2018) Ficou evidente a necessidade de se desenvolver um sistema de voo autônomo, com a capacidade de desviar de obstáculos e que possa garantir assim a integridade do veículo e a segurança de pessoas que se encontram próximas do mesmo.

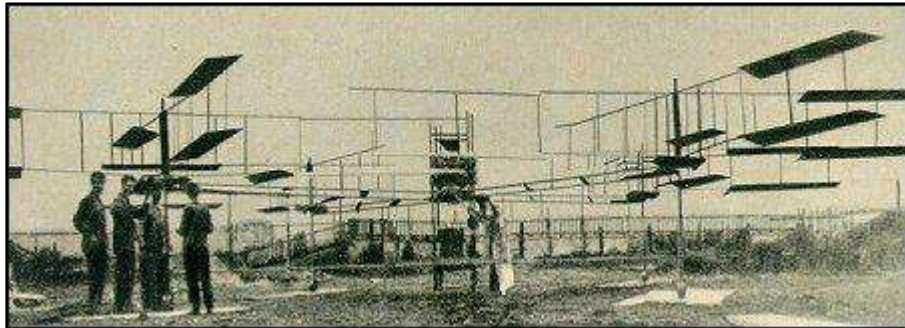
2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados sucintamente os conceitos que são de extrema importância para o desenvolvimento do projeto.

2.1 REVISÃO HISTÓRICA

A pesquisa sobre quadricópteros não é tão recente como se imagina, seus primeiros modelos surgiram juntamente com a pesquisa de veículos de asa. Acreditava-se que a utilização de mais de um rotor seria a solução para o controle destas aeronaves, sendo que um dos primeiros quadricópteros se data do início do século XX, mais precisamente em 1907, onde os irmãos Jacques e Louis Breguet, construíram o Gyroplane N° 1, ilustrado na Figura 1, um veículo multirotor de asa rotativa, no entanto o projeto se mostrava demasiadamente instável e, portanto impraticável para a época. (KROSSBLADE, 2016)

Figura 1- Gyroplane N° 1



Fonte: http://www.aviastar.org/helicopters_eng/breguet_gyro.php

Já o desenvolvimento de veículos aéreos não tripulados (VANT's), só se deu muito tempo depois, devido ao fato destes precisarem de técnicas de controle mais avançadas. Foi apenas nos anos 50, quando a Ryan Aeronautical Company passou a desenvolver o Firebee, um *drone* a jato destinado a servir como alvo aéreo para treinamentos, com seu primeiro modelo batizado de Firebee Q-2A presente na Figura 2. (Ubiratan, Edmundo),

Figura 2 - Firebee Q-2A



Fonte: <https://hiveminer.com/Tags/drone%2Cq2a>

Com o sucesso que o Firebee Q-2A obteve em seu propósito, novos modelos vieram a ser desenvolvidos, mas todos para uso militar em específico. Somente na última década com a miniaturização dos circuitos eletrônicos, começou-se a desenvolver drones de pequeno porte para uso civil, dentre estes, o quadricóptero que agora através de uma controladora de voo embarcada, poderia realizar voos de maneira estável.

2.2 COMPONENTES BASICOS DE UM QUADRICOPTERO

Os componentes de um quadricóptero podem ser divididos nas seguintes partes:

- Frame:

O frame constitui toda a estrutura do veículo, servindo como base para a instalação de todos os outros periféricos, esta pode ser construída com plástico, metal, fibra de carbono e outros materiais.

- Controladora de voo:

A placa controladora consiste em um conjunto de sensores e periféricos, todos ligados a um microcontrolador, esta é responsável por garantir a estabilidade do veículo.

- Controlador de velocidade eletrônico (ESC):

O ESC é um circuito eletrônico usados para controlar a velocidade de um motor elétrico do tipo brushless, este utiliza um sinal PWM como referência e gera uma tensão trifásica para alimentação do motor. (AGARWAL, 2016)
- Conjunto motopropulsor:

O conjunto motopropulsor consiste nos motores brushless juntamente com as hélices, este é responsável por criar a sustentação no drone.
- Bateria:

A bateria é constituída por um conjunto de células de polímero de lítio (LIPO), que possuem uma alta taxa de descarga. Essa taxa é referenciada pelos fabricantes com a letra **C**, que é multiplicada por um valor que corresponde a capacidade nominal da bateria; (por exemplo, uma bateria com capacidade de 2A e uma taxa de descarga de 25C, possuirá a capacidade de fornecer, $2A \times 25C = 50A$ de corrente contínua).
- Sistema rádio frequência:

Através de um sistema de rádio frequência o operador pode comandar o veículo e receber sinais de telemetria sem a necessidade de uma ligação física entre os mesmos.

2.3 REGRAS PARA USO DE DRONES NO BRASIL

Em 2 de maio de 2017 a agência nacional de aviação civil (ANAC) estabeleceu regras para o uso de drones comerciais, corporativos ou experimentais. Foram categorizadas em três classes, de acordo com o peso máximo de decolagem do equipamento.

- Classe 1 acima de 150Kg:

A regulamentação prevê que equipamentos desse porte sejam submetidos a processo de certificação similar ao existente para as aeronaves tripuladas. Esses drones devem ser registrados no Registro Aeronáutico Brasileiro e identificados com suas marcas de nacionalidade e matrícula. (ANAC, 2017)
- Classe 2 Acima de 25 kg e abaixo ou igual a150 kg:

O regulamento estabelece os requisitos técnicos que devem ser observados pelos fabricantes e determina que a aprovação de projeto ocorrerá apenas uma vez. Além disso, esses drones também devem ser registrados no Registro Aeronáutico Brasileiro e identificados com suas marcas de nacionalidade e matrícula. (ANAC, 2017)

- Classe 3 Abaixo ou igual a 25 kg:

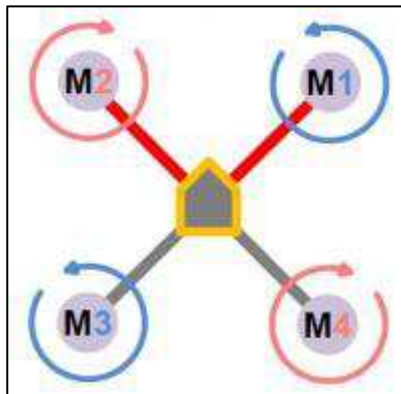
A norma determina que veículos que voem acima de 400 pés (120m) deverão ser de um projeto autorizado pela ANAC e precisam ser registrados e identificados com suas marcas de nacionalidade e matrícula. Drones dessa classe que operarem em até 400 pés (120m) não precisarão ser de projeto autorizado, mas deverão ser cadastradas na ANAC, apresentando informações sobre o operador e sobre o equipamento. (ANAC, 2017)

As operações com veículos totalmente autônomos, ou seja, aquelas onde o piloto não é capaz de intervir, estão proibidas no país, sendo obrigatório estes sistemas possuírem a possibilidade de o piloto intervir a qualquer ponto. (ANAC, 2017)

2.4 FUNCIONAMENTO DE UM QUADRICOTERO

Entre os modelos de quadricopteros o que mais vem se destacando nos últimos tempos, é a configuração que apresenta sua estrutura arranjada em X como demonstra a Figura 3.

Figura 3- Quadricoptero em X



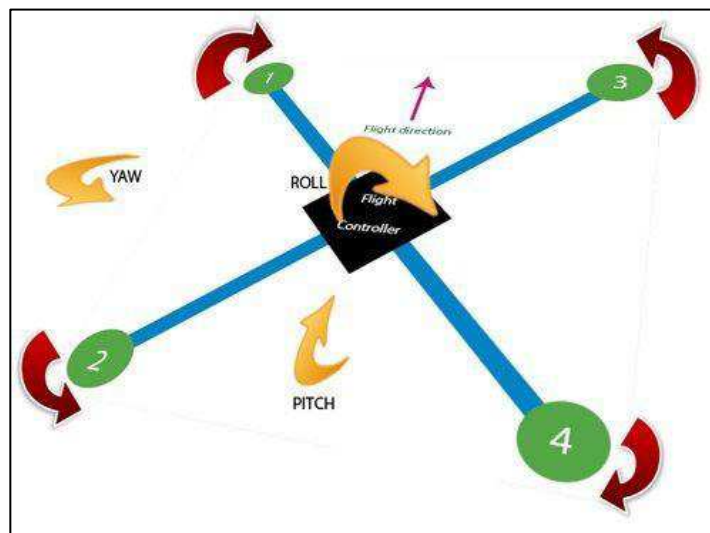
Fonte: <https://newmotorspot.com>

Esta configuração apresenta uma construção mecânica relativamente fácil, somando a isso, o fácil controle para o piloto e a capacidade de permanecer planando em um ponto específico. Tendo como ponto negativo, o elevado consumo energético por possuir quatro motores independentes e ser dinamicamente instável, precisando ser ajustado frequentemente pela controladora de voo embarcada.

2.4.1 Graus de liberdade

O quadricoptero realiza seus movimentos apenas através da manipulação da velocidade de rotação de um conjunto de 4 motores, podendo assim, gerar inclinações em seus eixos de rotação (pitch, yaw, roll). Esse conjunto de inclinações é responsável por movimentar o drone globalmente em todas as direções, a aceleração e desaceleração de todos seus conjuntos de motores refletem na sua variação de altitude. Para se manter estável dois motores giram em sentido horário e dois em sentido anti-horário, como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Movimentos quadricoptero em configuração X



Fonte: <https://www.instructables.com>

A alteração na rotação de cada motor é realizada pela controladora de voo, que através da combinação entre a aceleração e desaceleração destes motores consegue realizar os seguintes movimentos:

- **Altitude:** Todos os motores 1, 2, 3, 4 são acelerados ou desacelerados proporcionando a mudança de altitude.
- **Pitch:** movimento realizado através da aceleração de dois motores 2 e 4 e a desaceleração de outros dois motores do lado oposto 1 e 3, com resultado disso o drone realizará um movimento frontal.
- **Yaw:** movimento realizado através da aceleração de dois motores 1 e 4 e a desaceleração de outros dois motores do lado oposto 2 e 3, com resultado disso o drone realizará um movimento rotacional.

- Roll: movimento realizado através da aceleração de dois motores 1 e 2 e a desaceleração de outros dois motores do lado oposto 3 e 4, com resultado disso o drone realizará o movimento de rolagem lateral.

2.4.2 Unidade de Medição Inercial (IMU)

A Unidade de Medida Inercial é um dispositivo eletrônico, compostos por sensores capazes de medir velocidade, orientação e as forças gravitacionais. Em geral composto por giroscópios e acelerômetros, algumas também apresentam magnetometro, todos estes apresentando 3 eixos de medição. (FERNANDES, 2017)

- *Giroscópio*: giroscópios medem a variação da velocidade angular, ou a velocidade de rotação em seus eixos.
- *Acelerômetro*: Os acelerômetros medem a aceleração e a força, portanto percebem as variações na aceleração.
- *Magnetometro*: Magnetômetros são capazes de medir a direção e a força do campo magnético, normalmente empregado em veículos aéreos devido a sua alta confiabilidade, exigindo apenas uma calibração inicial. Os polos magnéticos da terra podem ser usados como referência para determinar sua orientação aos pontos cardiais.

Combinar o uso de acelerômetros e giroscópios se faz necessário, os acelerômetros são mais sensíveis a vibrações, por isso, com o auxílio dos giroscópios é possível distinguir movimento e vibração, por outro lado, os giroscópios tendem a perder a referência inicial de orientação angular assim se fazendo necessário o acelerômetro. O uso de magnetometro se torna importante pois auxilia na estabilidade do veículo em relação à sua rotação. (FERNANDES, 2017)

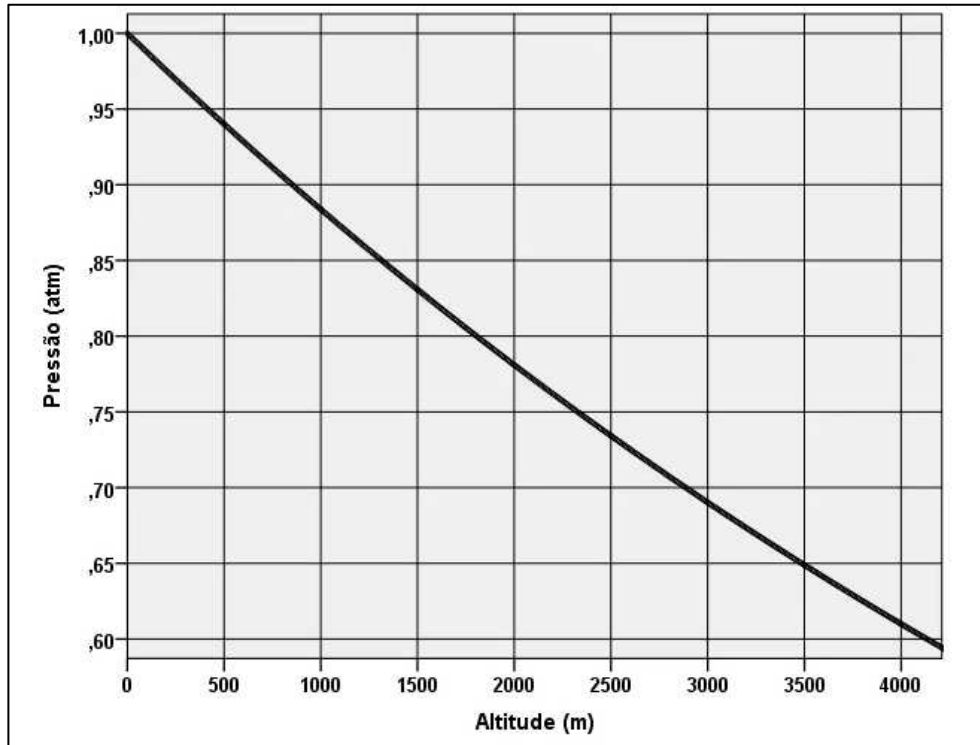
2.5 SENSORES

2.5.1 Barômetro

Sensor utilizado para medir a altitude conforme a variação da pressão atmosférica. À proporção que a altitude aumenta, a pressão atmosférica diminui, como demonstrado na Figura 5. Assim para os veículos aéreos que utilizam como base esse sensor, são tomadas amostras de

pressão quando o mesmo se encontra no solo e utilizadas como altitude zero, desta maneira, durante o seu voo a altitude obtida pelo sensor será referente ao ponto de decolagem.

Figura 5 - Gráfico pressão por altitude



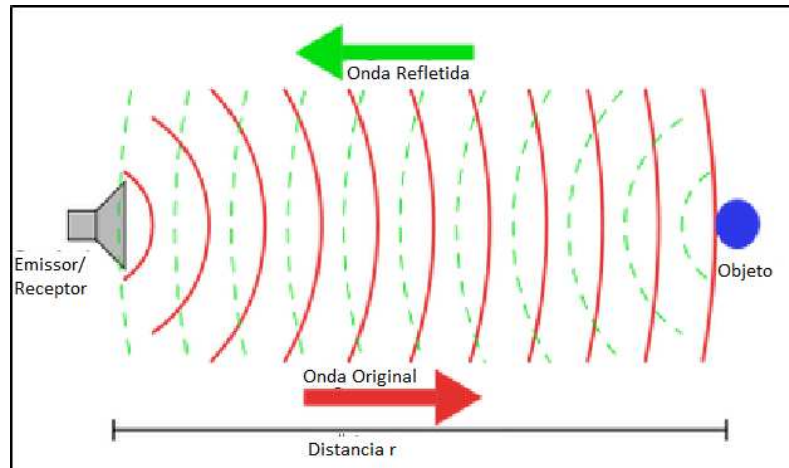
Fonte: <https://www.if.ufrgs.br/>

2.5.2 Sensor ultrassônico

Este tipo de sensor consiste em uma unidade, que é capaz de emitir e detectar o som como representado na Figura 6. Este então cria um pulso ultrassônico,³

que a maioria dos objetos sólidos é capaz de refletir, o transceptor utiliza um temporizador para determinar com precisão quanto tempo um pulso ultrassônico leva para “saltar” em um objeto, e retornar à unidade. (BURNETT, 2018)

Figura 6 – Sensor Ultrassônico



Fonte: Modificada de tecnologiasinterativas.wordpress.com

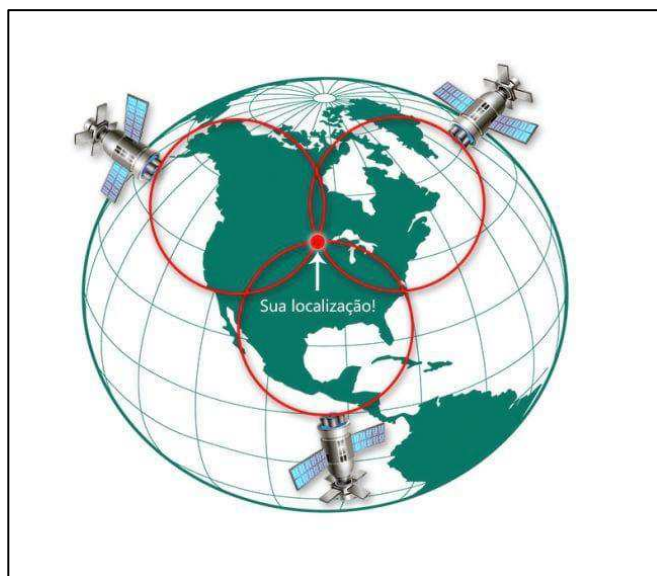
No entanto estes sensores apresentam uma estreita faixa de medição, indo de 20cm a 750cm. Não sendo capaz de retornar à posição correta do objeto devido a sua abertura angular que está na gama dos 15 graus. (BURNETT, 2018)

2.5.3 Sistema de Posicionamento Global (GPS)

O GPS é um sistema civil e militar que emite suas coordenadas em tempo real e é alimentado por uma constelação de 24 satélites, esta constelação é chamada NAVSTAR e controlada pelo DoD, *Department of Defence* (Departamento de Defesa) dos EUA. (FARIA, 2010)

O GPS utiliza o sistema de triangulação para determinar a localização do receptor na Terra. Três satélites enviam ao receptor um sinal contendo a sua posição e a hora exata do momento, este então, calcula através de um relógio interno com uma precisão de nano segundos, qual foi o tempo decorrido e com isso consegue estimar sua posição global, como demonstrado na Figura 7.

Figura 7 – Triangulação GPS



Fonte: <https://www.oficinadanet.com.br>

O GPS possui uma precisão que pode variar entre dezenas de metros a centímetros. Embora receptores civis trabalhem apenas com uma precisão mínima de 1 metro, devido as limitações propositalmente impostas pela DoD. (FARIA, 2010)

2.6 RASPBERRY PI

Raspberry Pi é um computador de tamanho reduzido e de baixo custo com todo o seu hardware integrado em uma única placa, ideal para prototipagem de produtos. É compatível com diversas distribuições do sistema operacional Linux. A distribuição raspbian é a que recebe mais destaque, por ser feita especialmente para esta placa e possuir uma grande comunidade online ativa.

Sua última versão a B+ tem um processador de 1.4GHz, 1GB de memória, 4 conexões USB 2.0, interface para câmera (CSI) e apresenta 40 pinos de GPIO. Seu conjunto de hardware pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 – Raspberry Pi 3 B+



Fonte: <https://www.filipeflop.com>

2.7 PLATAFORMA ARDUPILOT

ArduPilot é um firmware de código aberto, de uso geral para praticamente qualquer veículo e aplicação. Sua plataforma de controle, é baseada em controlador proporcional integral derivativo (PID), desta forma, o usuário apenas deve ajustar seus valores a fim de satisfazer a estabilidade de seu multirotor.

Embora o ArduPilot não fabrique nenhum hardware, o firmware do ArduPilot funciona em várias placas (hardware) diferentes para controlar veículos não tripulados de todos os tipos. Juntamente com o software de controle de solo, os veículos não tripulados que executam o ArduPilot podem ter funcionalidade avançada, incluindo comunicação em tempo real com os operadores. Pode ser utilizada para se efetuar uma conexão entre a controladora e um computador, podendo este, solicitar dados de sensores, realizar configurações, e enviar comandos. (ARDUPILOT, 2019)

2.8 API DRONEKIT

DroneKit é um conjunto de rotinas e padrões de programação em python para acesso ao firmware ArduPilot presente em controladoras. Ele fornece acesso programático às informações de telemetria, estado e parâmetro de um veículo conectado e permite o gerenciamento da missão e o controle direto sobre o movimento e as operações do veículo.

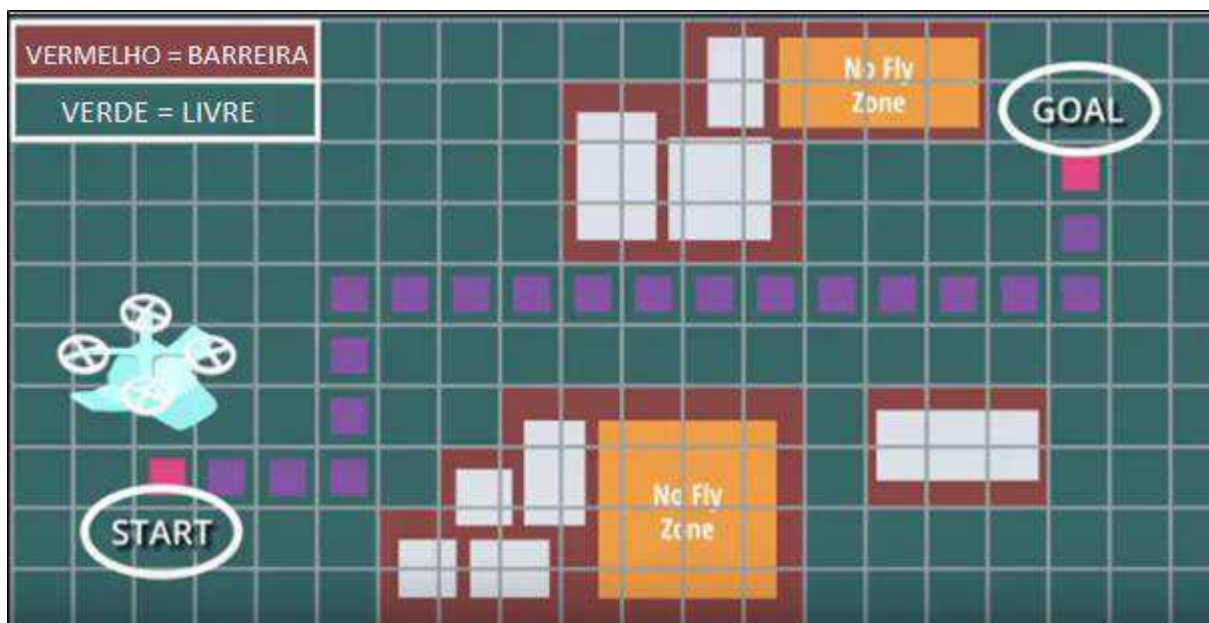
A API é direcionada principalmente para uso em computadores complementares a bordo que podem realizar tarefas mais complexas que a controladora de voo e após retornar à ação cabível.

2.9 SISTEMAS AUTONOMOS DE NAVEGAÇÃO PARA DRONES

Estes sistemas, consistem primeiramente na determinação de uma rota de voo definida através de coordenadas de GPS, denominadas waypoints. Após esta definição, será criado um modelo de terreno dividido em grids, que serão utilizados para uma análise minuciosa do terreno, levando em conta áreas impróprias para voo pré-definidas no sistema, denominadas *No Fly Zones*. Com isto é possível definir quais células são factíveis para voo e quais não são.

Através de análises matemáticas do mapa em grid, serão definidos novos waypoints a fim de satisfazer o ponto de início do voo (Start) e o ponto de objetivo do voo (Goal), como detalhado na Figura 9. (UDACITY, 2018)

Figura 9 – Mapa do terreno em grid



Fonte: <https://br.udacity.com>

No entanto, este mapa é utilizado apenas como referência inicial, já que não apresenta todos os dados fundamentais para um voo seguro, como a localização de obstáculos que não foram fornecidos ao sistema, e objetos que se encontram em movimento.

Para a total segurança da aeronave durante o voo, esta deve possuir sensores instalados em lugares estratégicos da aeronave, recolhendo dados do ambiente ao seu redor durante seu

voo, desta maneira serão calculados novos waypoints durante seu tempo de voo, formando assim uma rota segura a ser seguida até o seu objetivo. (UDACITY, 2018)

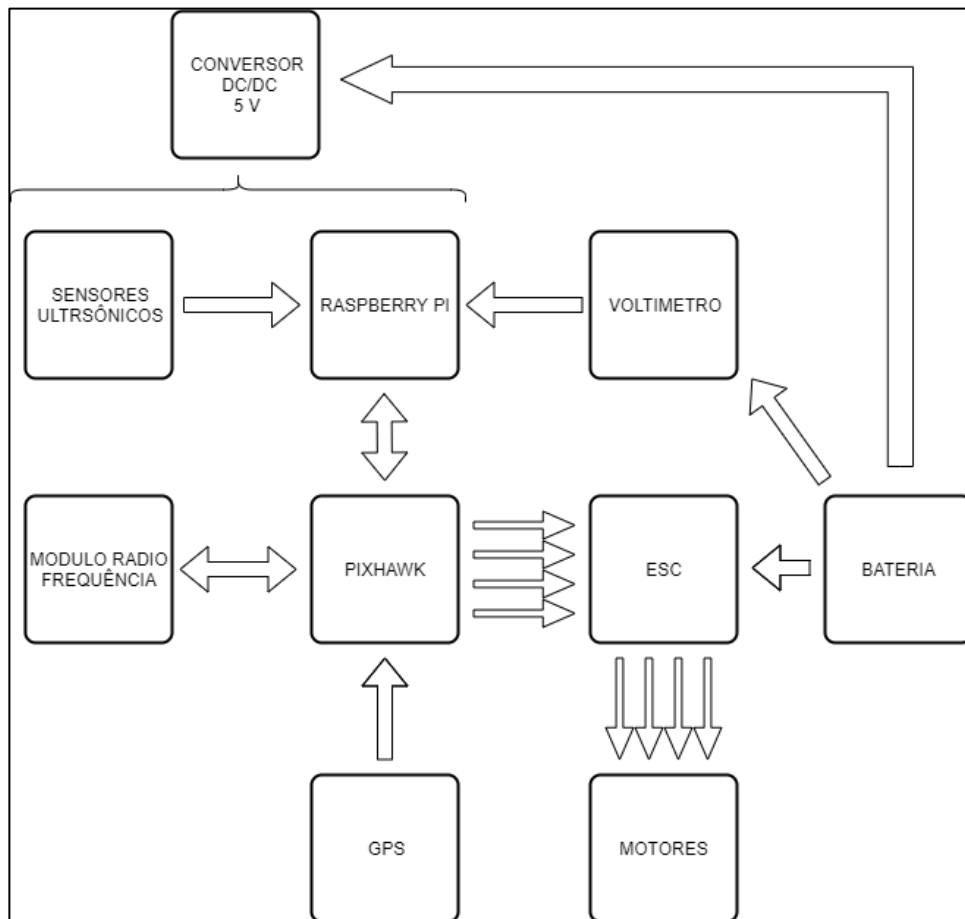
3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Neste capítulo é apresentado de forma detalhada todas as etapas que irão compor o desenvolvimento do projeto, assim como a descrição das partes que integram o sistema de voo.

3.1 ESTRUTURA DO PROJETO

Utilizou-se a seguinte estrutura para o desenvolvimento do projeto conforme presente no diagrama da Figura 10.

Figura 10 – Diagrama de Hardware



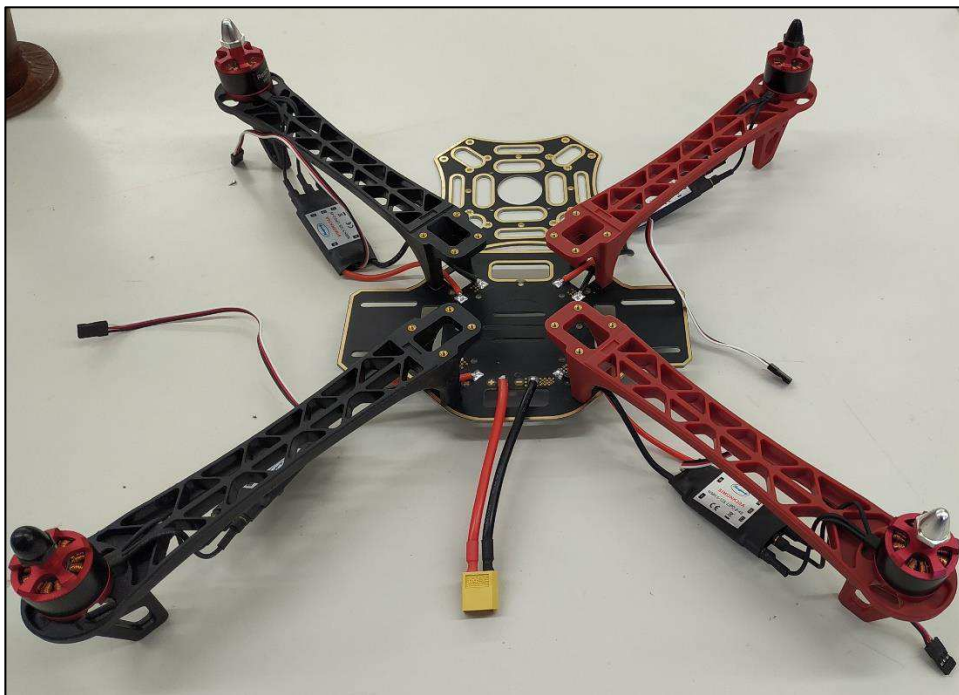
Fonte: Autor (2019)

3.2 ESTRUTURA MECÂNICA

A estrutura mecânica é constituída de um frame de quadricoptero em configuração em X, responsável por suportar todo o sistema motopropulsor. Ela deve ser leve e resistente, não comprometendo a autonomia de voo do drone e não causando vibrações que podem comprometer os dados adquiridos pelo giroscópio e acelerômetro.

O frame escolhido para o projeto é o modelo DJI F450 conforme a Figura 11. A estrutura é composta de 4 braços feitos a partir de plástico injetado fixados em duas placas centrais de circuito impresso, estas dão resistência a montagem. A placa inferior apresenta conexões elétricas para a ligação da bateria aos ESC e demais componentes eletrônicos, assim minimizando os números de fios na montagem.

Figura 10 – Frame F450 e ligações elétricas



Fonte: Autor (2019)

A definição deste modelo se deu principalmente por apresentar um grande espaço central para montagem, ser resistente, leve, e de fácil customização, sendo versátil e excelente para construção de protótipos. A montagem do protótipo pode ser vista na Figura 12.

Figura 11 -- Protótipo do projeto



Fonte: Autor (2019)

3.3 RÁDIO CONTROLE

Devido as regras impostas pela ANAC, veículos aéreos autônomos devem, obrigatoriamente, ter algum meio onde o piloto possa assumir o controle a qualquer momento. Sendo assim, optou-se pela compra do rádio controle *Flysky i6X*, conforme Figura 12.

Sua frequência de operação é de 2.4 GHz estando dentro dos padrões permitidos pela agência nacional de telecomunicações (ANATEL). Como uma das suas principais características está seu custo benefício, possuindo 10 canais de comandos e um alcance em campo aberto de até 2000 metros.

Figura 12 – Rádio controle Flysky i6X



Fonte: <https://www.banggood.com/>

3.4 BATERIA

Todo o conjunto motopropulsor e eletrônico deste projeto é alimentado por uma bateria. Foi escolhido utilizar uma bateria do tipo polímero de lítio (LIPO), este tipo é ideal para esta finalidade, possuindo uma alta capacidade de descarga e uma alta densidade energética. O modelo adquirido foi uma Lion Power 4S 5200 mAh por possuir 4 células, que acarretam numa tensão de 16.8V quando carregada totalmente. Sendo está a tensão compatível com o motor RacerStar BR2312 escolhido para o projeto. Esta bateria é exibida na Figura 14.

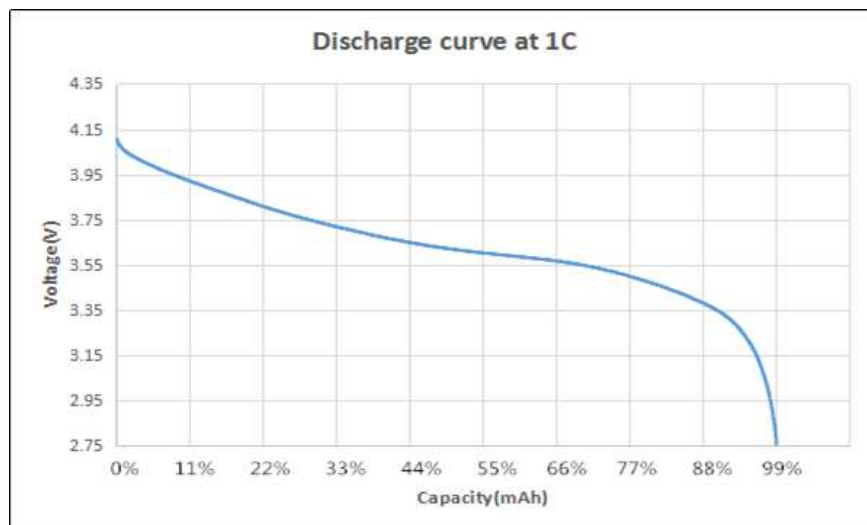
Figura 13 – Bateria Lion Power 4S 5200mha



Fonte: <https://www.gearbest.com>

Sua tensão nominal é de 14,8 V, possui uma capacidade de 5200 mAh e 30 C de taxa de descarga podendo fornecer continuamente 156 A. Entretanto apresenta uma vida útil curta, durando 300 a 500 ciclos de carga, também requer um carregador especial para o correto balanceamento de suas células. Sua tensão deve ser monitorada constantemente, podendo entrar em combustão espontânea caso alguma célula fique com uma tensão menor que 3V. Sua curva de descarga pode ser vista na Figura 15.

Figura 14 – Curva de descarga



Fonte: <https://www.godsontechology.com/>

3.5 MOTORES

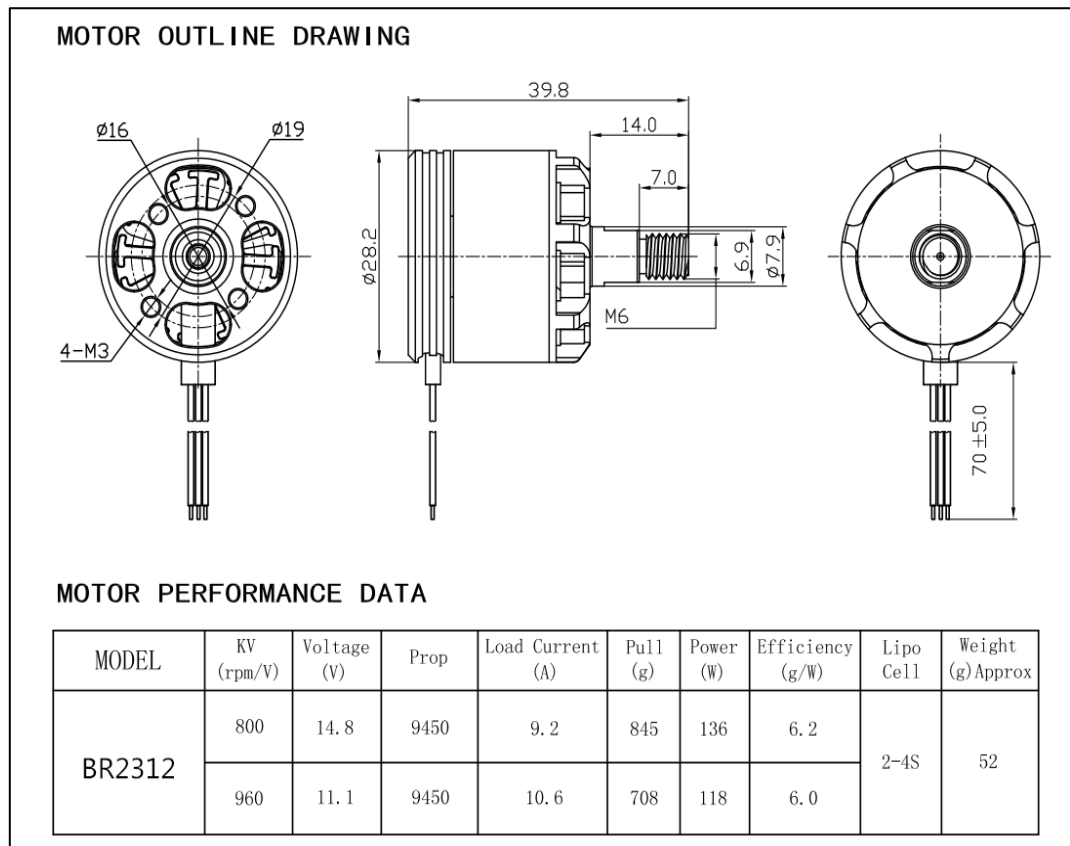
Foram adotados motores trifásicos do tipo brushless neste projeto, devido a sua alta velocidade de rotação, potência elevada em um tamanho reduzido e ao fato destes não apresentarem escovas, acarretando numa vida útil mais longa, em comparação aos motores DC tradicionais com escova. Entretanto, estes motores requerem um controlador eletrônico de velocidade (ESC) para que possam ser utilizados. Para este projeto foram escolhidos os motores Racerstar BR2312 960KV, apresentados na Figura 16. Sua escolha se deu pelo fato de apresentarem uma ótima qualidade de construção e suportarem baterias de 4 células, que resultam em uma maior autonomia de voo. As dimensões do motor e seus dados nominais de placa podem ser analisados na Figura 17. (RACERSTAR... 2017)

Figura 15 - Racerstar BR2312 960KV



Fonte: <https://www.banggood.com>

Figura 16 – Dados de placa Racerstar BR2312 960KV



Fonte: <https://www.racerstar.com/>

Através da análise dos dados de placa e considerando a escolha de uma bateria de 4 células, obtém-se assim, que a corrente máxima exigida pelo conjunto motopropulsor deste projeto é de 36.8A, conforme a Equação 1.

$$C_{mto} = N^{\circ} \text{ motores} \times \text{Load Current} \quad (1)$$

$$C_{mto} = 4 \times 9.2$$

$$C_{mto} = 36.8A$$

3.6 HARDWARE

Para o desenvolvimento deste projeto foram estudados e adquiridos os seguintes componentes.

3.6.1 Microcomputador

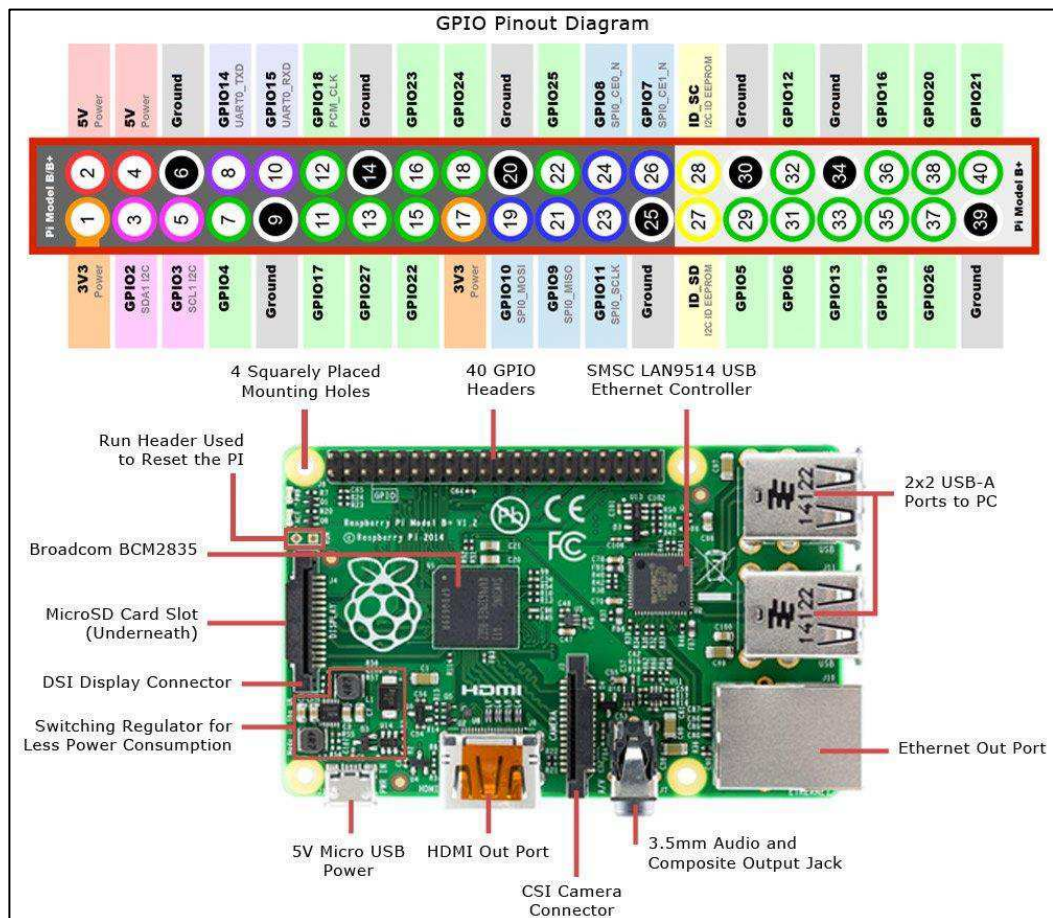
O microcomputador é o centro de hardware deste projeto, servindo como base para a execução de todo o software desenvolvido. Para esta operação foi escolhido um Raspberry Pi 3B, por este apresentar um baixo custo, possuir suporte a I2C para comunicação com os sensores ultrassônicos e conexões USB que foram utilizadas para a transmissão bidirecional de dados e comandos entre a placa Raspberry e a controladora de voo. (SUEIRO, 2016)

Principais características do Raspberry Pi 3B (SUEIRO, 2016)

- Processador: Broadcom BCM2837 64bit;
- Clock: 1.2GHz;
- Memória: 1GB RAM;
- WIFI: Dual-Band (2.4GHz e 5GHz);
- GPIO: 40 pinos;
- Corrente de trabalho: 2.5A.

A Figura 19 mostra a função de cada periférico.

Figura 17 - Raspberry Pi 3B



Fonte: <https://www.jameco.com>

3.6.2 Voltímetro

A análise da tensão da bateria é importante tanto em solo quanto em voo, assim pode-se determinar se a bateria apresenta uma carga mínima necessária para a realização do voo e também sua tensão durante o decorrer da missão. Foi escolhido o *pixhawk power module 30V 90A* presente na Figura 20, que é desenvolvido e recomendado propriamente pra controladora de voo escolhida nesse projeto. Este módulo apresenta possibilidade de medir tensões de 0V a 30V e suporta corrente máxima de 90A, sendo adequada conforme a escolha dos motores e da bateria. Além disso, apresenta um regulador interno com a função de suprir 5V 1,5A para a alimentação da controladora de voo.

Figura 18 – pixhawk power module 30V 90A



Fonte: <https://pt.aliexpress.com/>

3.6.3 Controlador eletrônico de velocidade (ESC)

Devido ao fato de os motores serem do tipo brushless, que necessitam de uma alimentação DC trifásica, e a placa controladora mandar seu sinal de controle de velocidade através da modulação PWM, se torna necessário que este sinal seja convertido através de um ESC. Para esta aplicação foi escolhido o modelo Racerstar RS30A Lite devido ao fato deste

apresentar uma construção de ótima qualidade e a possibilidade de operar com baterias de até 4 células, como a escolhida para este projeto. (RACERSTAR 2017)

Principais características: (RACERSTAR 2017)

- Suporte a baterias: 2 células a 4 células;
- Corrente Contínua: 30 A;
- Corrente de Burst: 35 A por 10s;
- Dimensão: 26mm x 17mm.

A Figura 21 mostra o ESC RS30A Lite.

Figura 19 - Racerstar RS30A Lite



Fonte: <https://www.amazon.com>

3.6.4 Modulo GPS

O sistema de posicionamento global (GPS) é vital para ao desenvolvimento deste projeto. Através deste serão adquiridos dados de posição para a realização de todo o voo autônomo. Para isso, foi escolhido o módulo Ublox GPS NEO-M8N conforme Figura 22, por possuir uma das melhores faixas de precisão global para modelos comerciais (1,5-2 metros),

este módulo ainda apresenta incluso em seu encapsulamento um sensor de campo magnético que possibilita descobrir o norte magnético da terra para uma correta navegação.

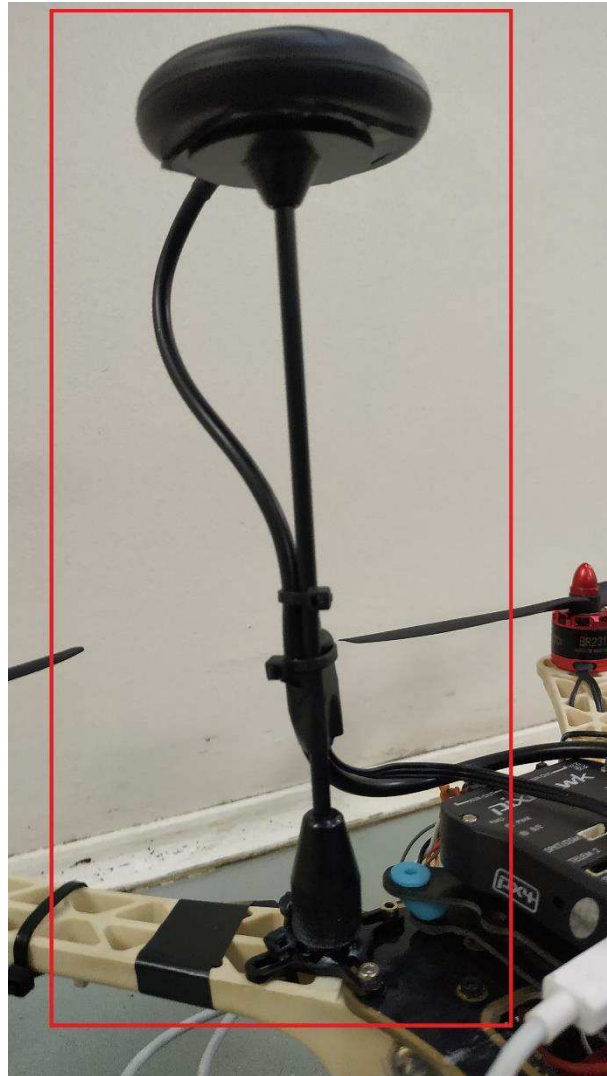
Figura 20 - Ublox GPS NEO-M8N



Fonte: <https://br.bestdealplus.com/>

Seguindo recomendações do fabricante esse módulo deve ser instalado sobre uma superfície metálica e longe de geradores de campos magnéticos. Para isso, foi adquirido um suporte específico para a instalação desse tipo de GPS em frames DJI F450. A instalação final do mesmo pode ser vista na Figura 23.

Figura 21 – Instalação GPS



Fonte: O autor (2019)

3.6.5 Controladora de voo

Controladoras de voo, são projetos de hardware que tem como objetivo proporcionar um piloto automático com análise de diversos sensores e pós processamento pelo seu algoritmo interno. A controladora de voo escolhida para esse projeto se trata de uma Pixhawk, Figura 24. É um projeto independente, de hardware aberto, que visa fornecer o padrão para projetos de piloto automático prontamente disponíveis, de alta qualidade e baixo custo para as comunidades acadêmicas, de hobby e de desenvolvedor. (pixhawk 2019)

Figura 22 - Pixhawk

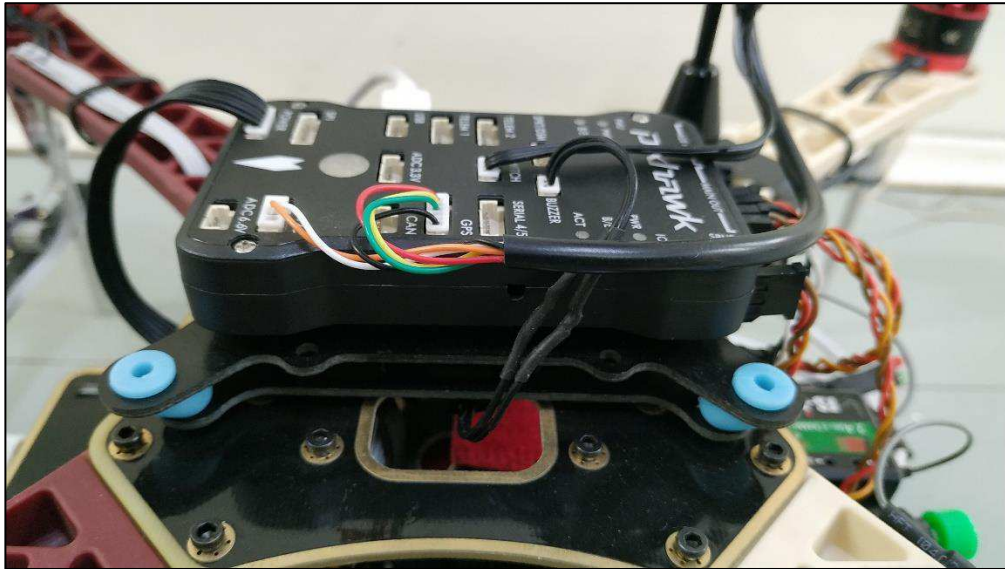


Fonte: <https://pixhawk.org/>

Sua escolha deu-se devido a robustez tanto na construção de seu hardware quanto na qualidade de seu firmware e por apresentar meios que facilitam a conexão de um computador auxiliar. Seu firmware interno é constituído da plataforma *open source* ArduPilot que, através de uma interface serial, pode enviar dados para um computador auxiliar para analisar as informações recebidas por meio da API DroneKit e retornar comandos que a controladora executará.

Para a instalação da controladora na estrutura, foi adquirido uma mesa anti-vibração conforme recomendação do fabricante, esse suporte ajuda a neutralizar a vibrações causada pelos motores que seriam transmitidas da estrutura para a controladora. A montagem do conjunto pode ser observada na Figura 25.

Figura 23 – Pixhawk e mesa anti-vibração



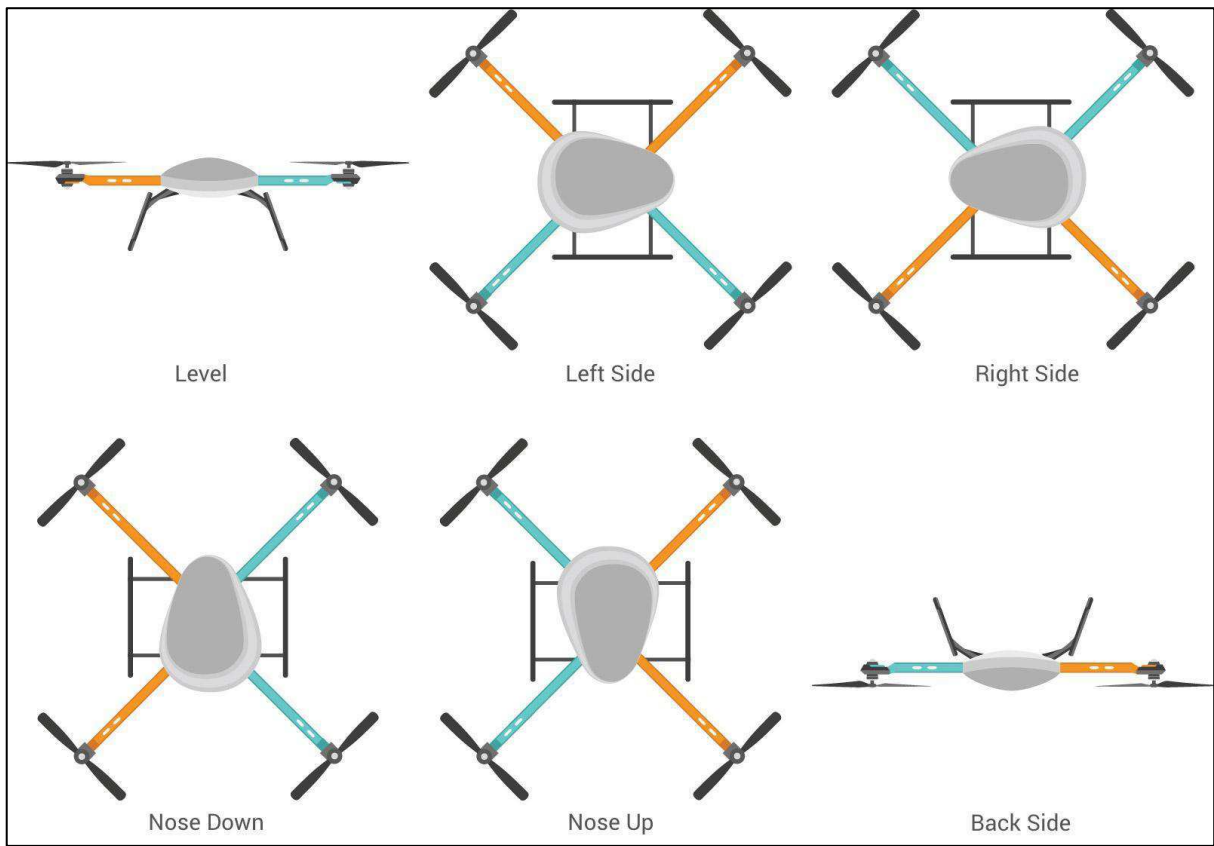
Fonte: O autor (2019)

A controladora é constituída de um microprocessador central STM32F427 rodando a 168MHz com 256 KB de RAM e 2 MB Flash, como redundância apresenta coprocessador STM32F103 e internamente apresenta os seguintes sensores: Acelerômetro, Giroscópio, Magnetômetro, Barômetro, podendo ainda serem adicionados mais sensores através de suas portas seriais externas, como é o caso do modulo GPS, e do voltímetro, demonstrados anteriormente nos itens 3.5.4 e 3.5.2. A maioria desses sensores necessitam de calibração em sua primeira inicialização.

3.6.5.1 *Calibração do acelerômetro*

O acelerômetro é um dos sensores mais importantes para a realização de um voo seguro. Portanto, este necessita de uma calibração antes do primeiro voo que é dividida em várias partes, onde deve-se posicionar o drone em 90° em todos os seus lados, como demonstrado na Figura 26.

Figura 24 - Posições de calibração do acelerômetro



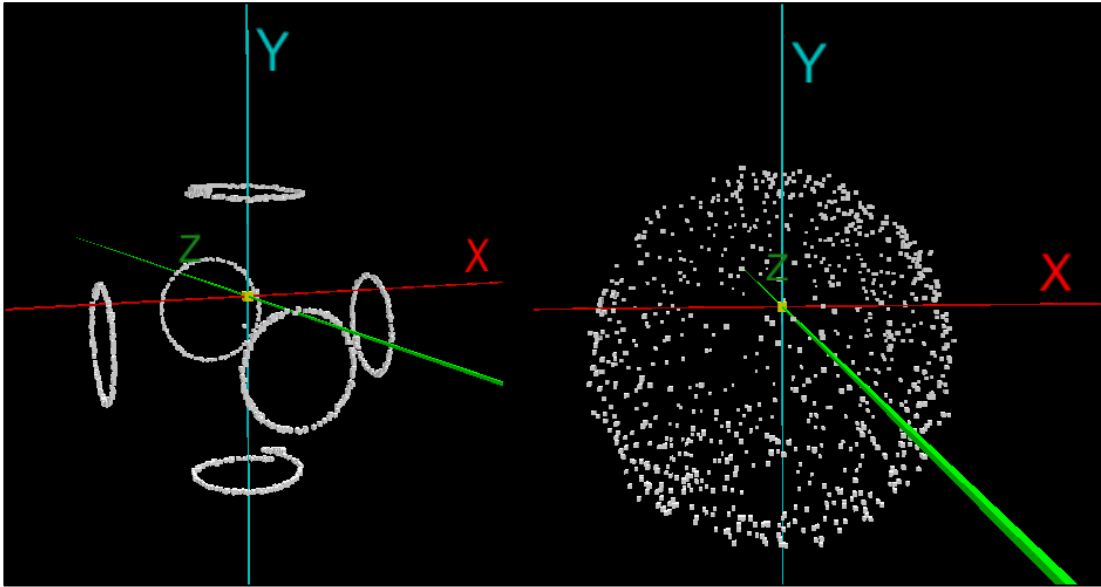
Fonte: <https://diyodemag.com/>

3.6.5.2 Calibração do Magnetometro

A pixhawk apresenta um sensor magnetômetro interno e um adicional presente no seu módulo GPS. Conforme a montagem do drone, a placa controladora se encontra muito próxima dos ESC's, o que produz um campo magnético causado durante o chaveamento de seus MOSFETs que podem causar interferência neste tipo de sensor. Assim, preferiu-se trabalhar apenas com o sensor presente no módulo GPS que se encontra em cima de um suporte, ou seja, mais afastado do restante dos componentes.

Para realizar a calibração do mesmo, deve-se estar em um ambiente livre de interferência eletromagnética e rotacionar o drone 360° ao redor de todos os seus eixos, a fim de garantir uma boa amostragem do campo magnético terrestre. A aquisição de dados magnéticos em 3 eixos pode ser vista na Figura 27, onde os gráficos representam a rotação de calibração e os dados de amostragem.

Figura 25 - Calibração magnetometro de 3 eixos



Fonte: <https://diydrone.com/>

3.6.6 Ultrassônico

Para a análise do ambiente, a fim de se evitar obstáculos durante o voo, foi escolhido utilizar sensores do tipo ultrassônicos, no caso o modelo GY- US42. Esse sensor possui comunicação serial I2C, permitindo a alteração de seu endereço interno, viabilizando o acesso de múltiplos sensores através de uma mesma via de comunicação com a placa Raspberry Pi 3B. (OKYSTAR, 2017)

Principais características: (OKYSTAR, 2017)

- Taxa de atualização: 15HZ;
- Faixa de medição: 20cm a 720cm;
- Precisão: 1cm;
- tensão de funcionamento: 3-5 v;
- corrente de trabalho: 9mA (VCC = 5 v);
- Tamanho: 21.5mm * 21mm * 24.5mm.

A Figura 28 mostra o modulo GY-US42.

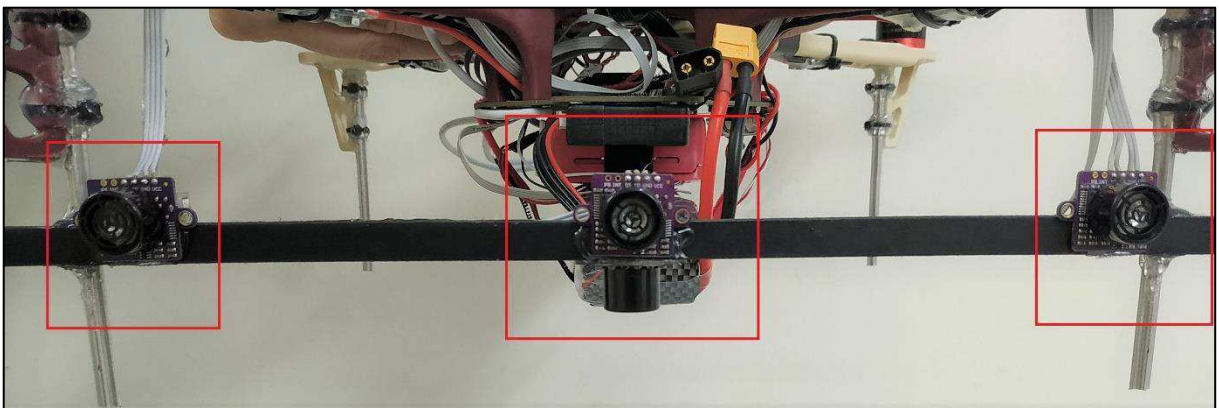
Figura 26 – Sensor ultrassônico GY-US42



Fonte: <https://www.didacticaselectronicas.com>

Foram instalados quatro sensores na parte frontal do quadricoptero, conforme a Figura 29. Três foram direcionados para detecção de obstáculos na sua frente, desta maneira, é possível detectar com redundância as barreiras e presumir as dimensões horizontais através da interpolação dos sensores. O quarto sensor foi direcionado para baixo a fim de garantir uma altitude segura de voo.

Figura 27 – Instalação sensores ultrassônicos



Fonte: O autor (2019)

3.6.7 Conversor DC/DC

Devido ao fato deste projeto se tratar de um veículo aéreo, a alimentação de todos os periféricos é de extrema importância, podendo em caso de falha comprometer seu voo, causando a destruição total do VANT. Necessita-se de um conversor DC/DC capaz de converter a tensão da bateria de 16.8V (quando totalmente carregada) para 5V, tensão de operação da

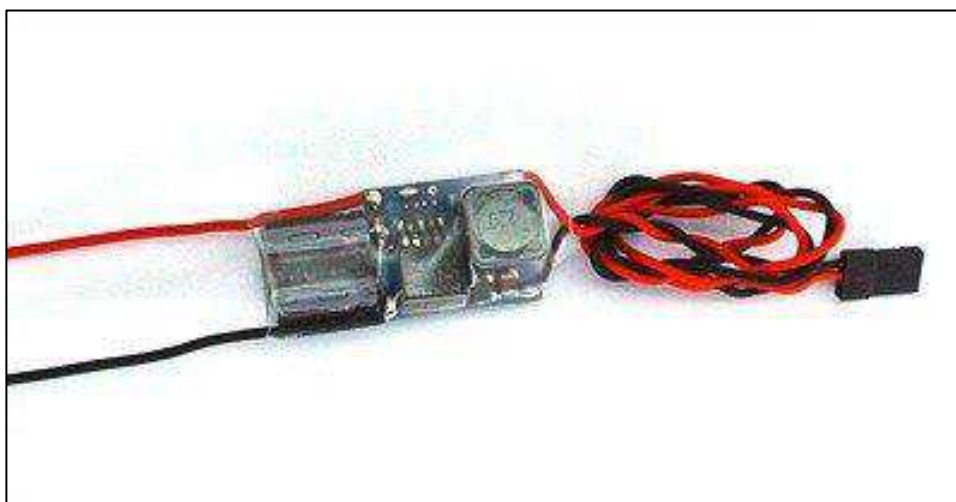
maioria dos periféricos. Foi escolhido o conversor BEC 6A, devido a este módulo ser usado por aeromodelos e apresentar uma ótima confiabilidade. (ARXANGELRC, 2016)

Principais características (ARXANGELRC, 2016)

- Tensão de funcionamento: 5.5 V-35 V;
- Corrente contínua: 6 A;
- Corrente de Burst: 7.5 A por 20s;
- Tensão de saída: 5.25V +/- 0.5V;
- Dimensão: 43mm x 24mm.

A Figura 30 mostra o conversor BEC 7A.

Figura 28 – Conversor BEC 6A



Fonte: <https://abc-rc.pl/regulator-napiecia-bec-6a-5v>

3.7 SOFTWARE

Todo o software foi desenvolvido através da linguagem de programação python 3, destinado a rodar no microcomputador Raspberry Pi 3B instalado no veículo.

3.7.1 Interface Visual

Para configuração dos parâmetros de voo deste projeto foi criada uma interface visual, como demonstrada na Figura 31. Através desta o usuário poderá definir as coordenadas de latitude, longitude e altitude (Waypoint), além de outros parâmetros de ajuste de voo como: se o drone deve retornar ou não pra seu local de decolagem, altitude inicial de voo, tempo que

deve permanecer parado entre cada coordenada, número de células da bateria para o cálculo de autonomia e a distância máxima em metros do ponto inicial (DMPI) para se permitir o voo. Conforme as definições escolhidas pelo usuário será informado a distância de voo estimada.

Figura 29 – Interface visual

Configurador de plano de voo

BELUSSO OF DRONES

LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE (M)

Deslocamento: **178.3 m**

AJUSTES:

RETORNAR CASA: SIM NAO

ALTITUDE INICIAL(M):

DELAY WAYPOINT(S):

BATTERY CELLS:

DMPI(M):

DELETAR TUDO

Plano de voo carregado

Fonte: autor (2019)

A fim de proporcionar segurança tanto do usuário quanto do veículo, foram adicionadas algumas verificações e limitações ao sistema, conforme a Tabela 1. Caso algum parâmetro se encontre fora do período de segurança, será gerada uma mensagem de erro e uma indicação em vermelho para a caixa de texto com o dado incorreto, solicitando ao usuário sua correção.

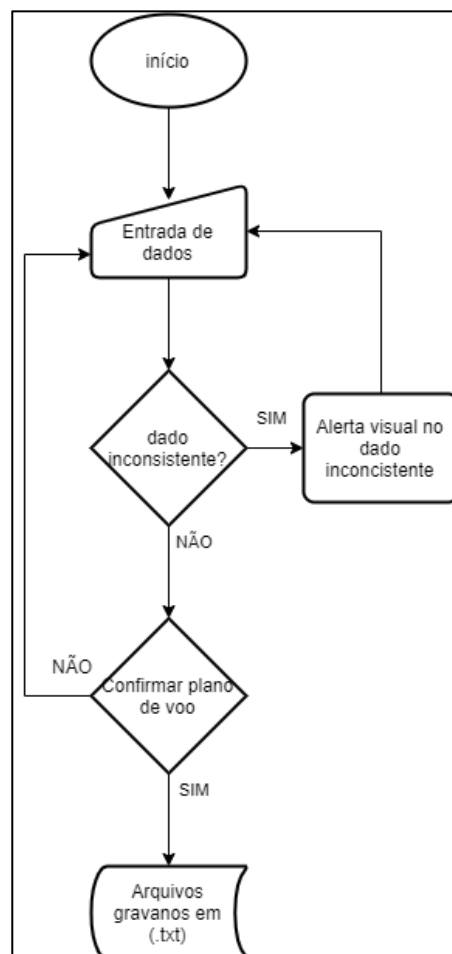
Tabela 1 – condições de voo

Parâmetros	Valor Mínimo	Valor Máximo
Altitude(m)	1	200
Altitude inicial(m)	5	100
Delay waypoint(s)	0	60
Battery cells	2	4
DMPI(m)	10	100

Fonte: autor (2019)

Ainda levando em conta os parâmetros fornecidos pela Tabela 1, é demonstrado através do fluxograma presente na Figura 32 a lógica de funcionamento da interface, como são analisadas as escolhas do usuário e posteriormente arquivadas num arquivo (.txt) para que possam ser utilizadas no futuro.

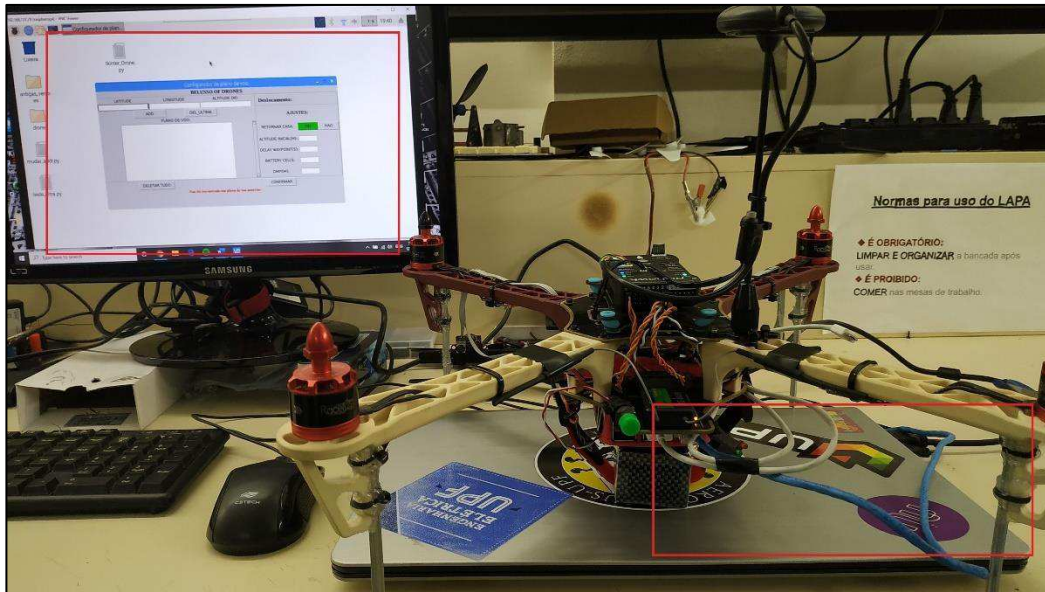
Figura 30– Diagrama de blocos Interface Visual



Fonte: autor (2019)

Para obter acesso a esta interface de configuração o usuário deverá realizar um acesso remoto via cabo de rede entre seu computador pessoal e a placa Raspberry acoplada ao drone. Como forma de proteção, sua comunicação só será estabelecida após o preenchimento correto do login e senha. Este processo está demonstrado na Figura 33.

Figura 31 – Acesso remoto via cabo de rede



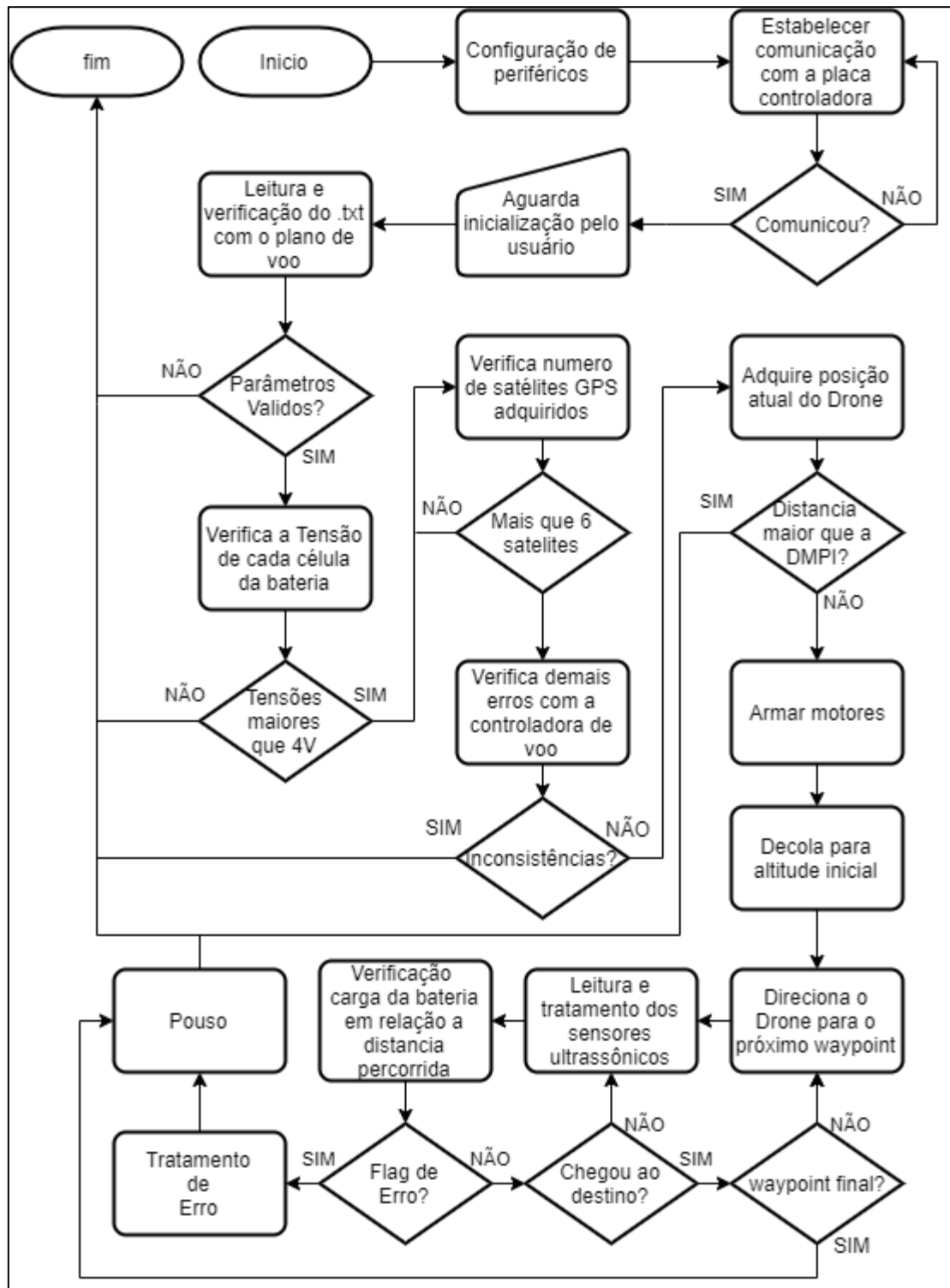
Fonte: autor (2019)

3.7.2 Sistema de voo autônomo

O sistema de voo autônomo foi desenvolvido utilizando como base a API DroneKit. Através desta foi elaborado o software empregado na comunicação entre o microcontrolador e a controladora de voo, como demonstrado na Figura 33.

Nota-se que a placa controladora, foi configurada para que o usuário possa a qualquer momento intervir no voo através do rádio controle, esta interromperá a comunicação com o Raspberry Pi, seguindo somente aos comandos do piloto vindos através da comunicação por rádio controle.

Figura 32 – Diagrama do Software de navegação autônomo



Fonte: Autor (2019)

A execução do software foi configurada pra inicializar após o carregamento do sistema operacional Raspbian, presente no microcomputador embarcado Raspberry Pi. Para melhor entendimento do programa, este foi dividido em partes que serão explicadas neste capítulo.

3.6.2.1 Configuração e comunicação

Após a inicialização do sistema operacional, o programa realiza as configurações necessárias para o correto funcionamento de seus periféricos. Primeiramente, são configurados os pinos GPIO do Raspberry Pi; logo após, é definido um pino como entrada para um *push button* de inicialização e definidos dois outros como saída para utilização de LED's, nas cores verde e vermelho. Os mesmos, indicam ao usuário de maneira visual, qual é a etapa do programa que está sendo executada no momento. Esse processo é detalhado na Quadro 1.

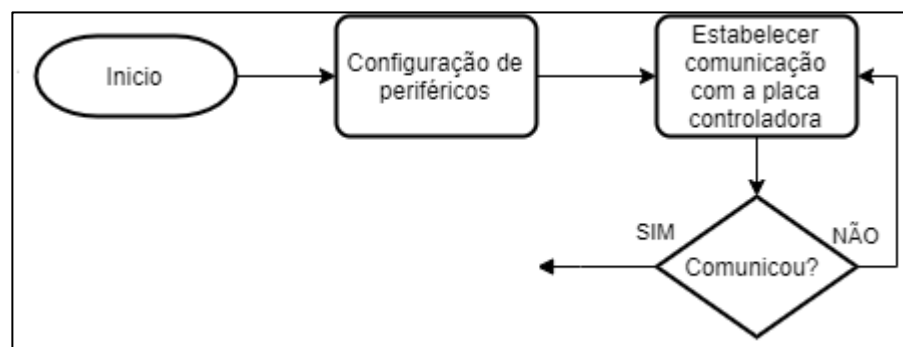
A comunicação é estabelecida através do protocolo de comunicação DroneKit, caso esta comunicação falhe, o sistema ficara em loop até esta ser estabelecida, ou até o usuário forçar a ligação removendo a bateria. Estas etapas, configuração dos periféricos e fixação da comunicação são demonstradas no diagrama da Figura 35.

Quadro 1– Indicação visual de LED's

Etapa	Cor correspondente	Sequência visual
Aguardando inicialização	Vermelho	constante
Iniciando	Verde	pulsado
Aguardando GPS	Vermelho	pulsado
Aguardando calibração de voo	Vermelho e Verde	alternado
<i>Flag</i> de erro	Vermelho \ Verde	pulsado
Em voo	Verde	constante

Fonte: Autor (2018)

Figura 33 – Diagrama de configuração e comunicação



Fonte: Autor (2019)

3.6.2.2 Verificação do sistema

Com as configurações concluídas e a comunicação estabelecida, os LED's indicarão o modo “aguardando inicialização”. Nessa etapa, o programa permanece paralisado até a autorização de voo ser dada pelo usuário através do *push button*. A autorização concedida é sinalizada através do modo indicativo “iniciando”.

É realizada a leitura de todo o arquivo .txt e validação de seus parâmetros de voo, como foi demonstrado na Tabela 1. Nessa fase, é verificada qual foi a bateria indicada pelo usuário na etapa de configuração do plano de voo. Com esse dado, pode-se, através da análise da tensão total da bateria, obter se cada célula apresenta uma tensão superior a 4V, como margem de segurança para realização do voo. Caso apresente uma tensão inferior, o voo é cancelado e o sistema finalizado.

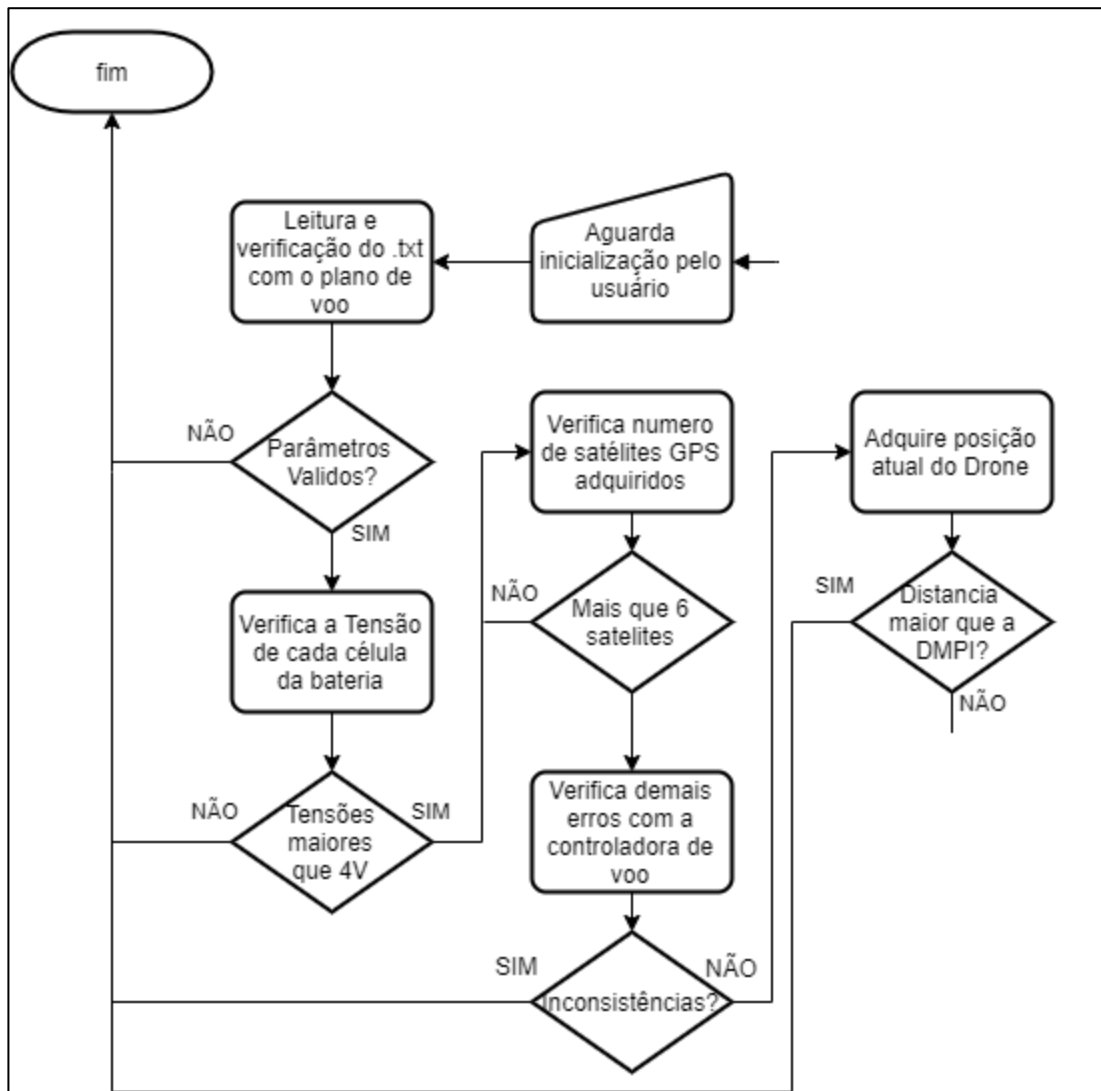
São verificados quantos satélites estão disponíveis no momento, foi optado como margem de segurança um número mínimo de 6 satélites para realização do voo e demais verificações. Caso obtenha um número menor, o sistema permanecerá em loop até à aquisição dos mesmos, sinalizando através do modo “Aguardando GPS”. Com a obtenção dos sinais de satélite, o drone verifica qual é a sua posição atual de latitude e longitude, posteriormente calculando a sua distância máxima em metros do ponto inicial (DMPI) e sua distância total de voo, que foi limitada em dois mil metros de percurso. O cálculo das distancias entre coordenadas é através da Equação 2. [referenciar](#)

$$Distancia = \sqrt{(Lat2 - Lat1)^2 + (Long2 - Long1)^2} \times 1.113195e5 \quad (2)$$

Através da comunicação serial, a controladora de voo retorna seu estado de calibração inicial. Se apresentar algum erro, o sistema finaliza com um alerta no modo “Aguardando calibração de voo”.

Todos estes processos são demonstrados no diagrama da Figura 36.

Figura 34 – Diagrama de verificação do sistema



Fonte: Autor (2019)

3.7.2.3 Navegação

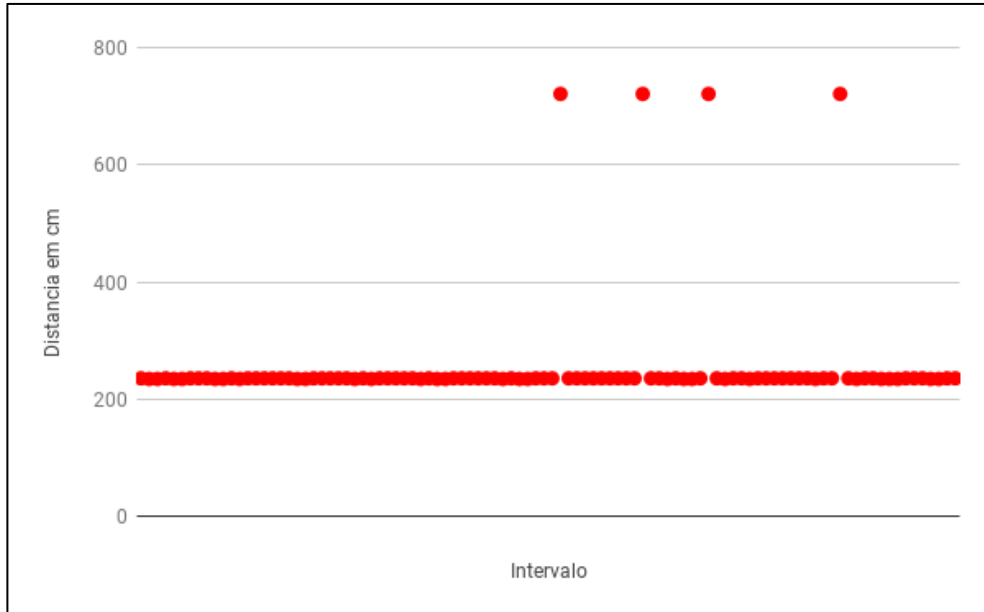
Após todos os parâmetros serem verificados e validados, os motores são acionados e o drone começa a decolar até sua altitude se encontrar a $\pm 5\%$ da determinada pelo usuário. Essa margem de erro foi adicionada a fim de ignorar o erro de precisão do sensor barométrico, responsável pela determinação da altitude.

O sistema verificará qual é o próximo waypoint de sua lista, informando a controladora qual direção deve seguir. Durante esta etapa de voo são acionados os sensores ultrassônicos, juntamente com seu tratamento a fim de evita erros de leitura.

Para minimizar os erros que ocorrem na leitura do sensor ultrassônico, foi acrescentado ao software um filtro médio móvel de ordem 5 com exclusão de valores máximos e mínimos.

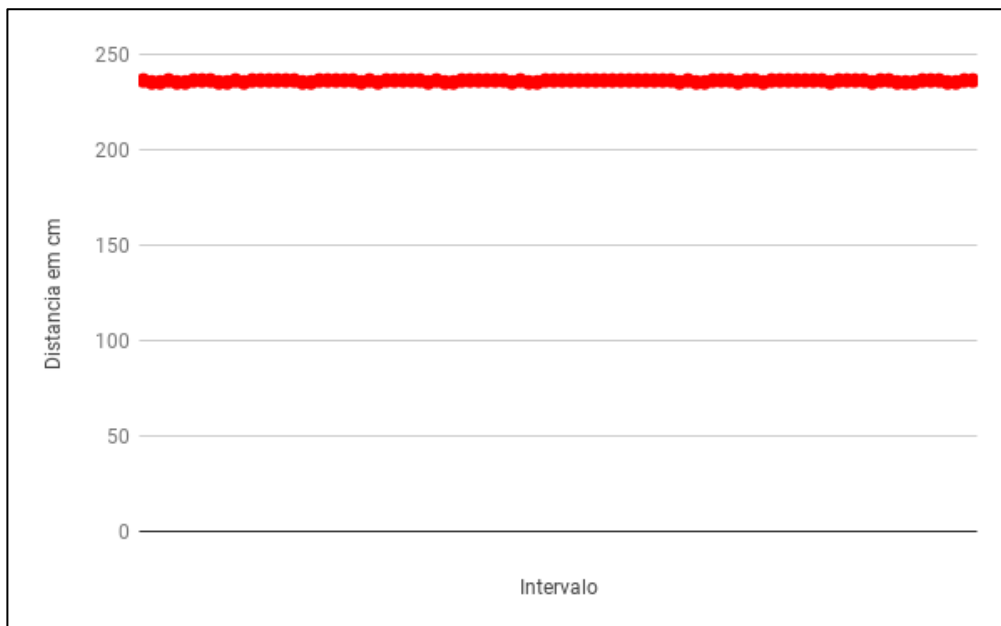
A Figura 37 mostra a leitura dos sensores antes da aplicação do filtro, enquanto a Figura 38 apresenta a leitura após passar pelo filtro. As medidas foram realizadas em um intervalo de 100 medições.

Figura 35 – Leitura dos sensores ultrassônicos



Fonte: Autor (2019)

Figura 36 – Leitura dos sensores ultrassônicos filtrados



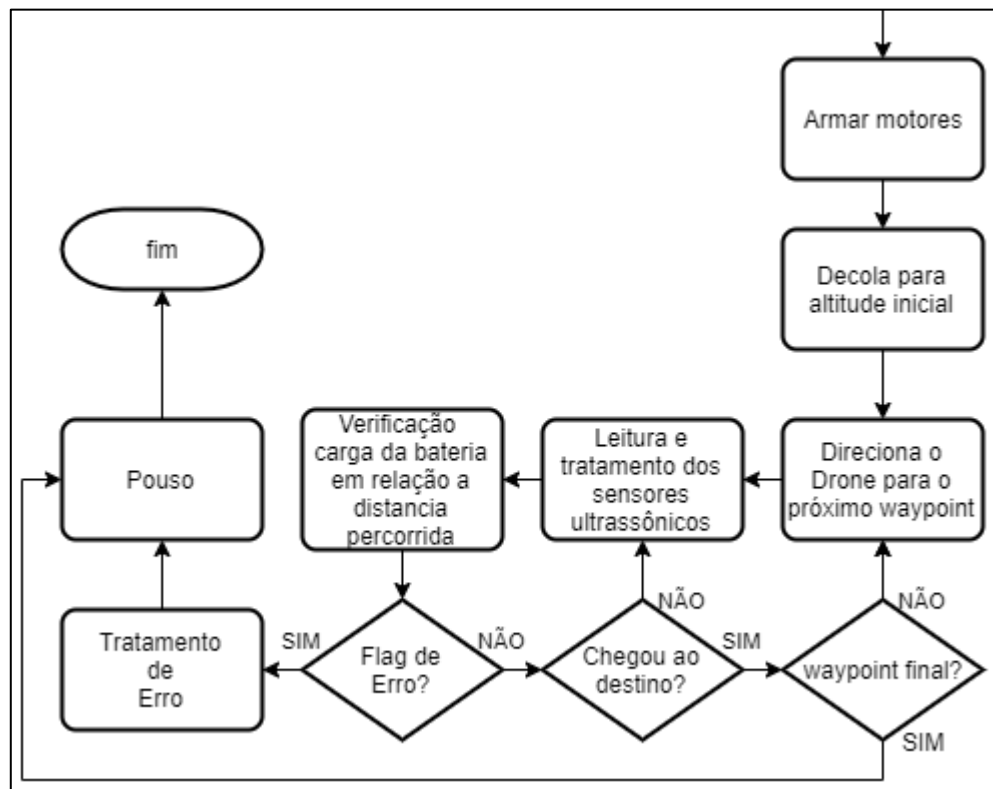
Fonte: Autor (2019)

Durante o voo, ocorre a verificação constante da bateria, através de um filtro média móvel de ordem dez que desconsidera valores máximos e mínimos. Simultaneamente, o programa apura a distância percorrida, subtraindo esta da distância total, conforme calculada na etapa de “verificação do sistema”. Caso a bateria apresente tensão inferior a 3,6 V por célula, antes de atingir 50% do percurso, será gerada uma flag de erro fazendo, assim, que o drone retorne para seu local de partida e pouse.

No caso de a tensão da bateria atingir o mínimo de 3,1 V por célula, o drone gera uma nova flag e realiza um pouso de emergência independente do seu local atual.

Na circunstância de nem uma dessas flags ocorrerem, o sistema continuará em loop verificando seus sensores e, se o drone se encontra a um metro de distância do seu objetivo atual quando isto ocorrer, o veículo se redirecionará para seu próximo *waypoint*. Entretanto, se esse for o último *waypoint*, o VANT poussa e desliga seus motores, finalizando o programa. Esses processos podem ser vistos na Figura 38.

Figura 37 – Diagrama do software de navegação



Fonte: Autor (2019)

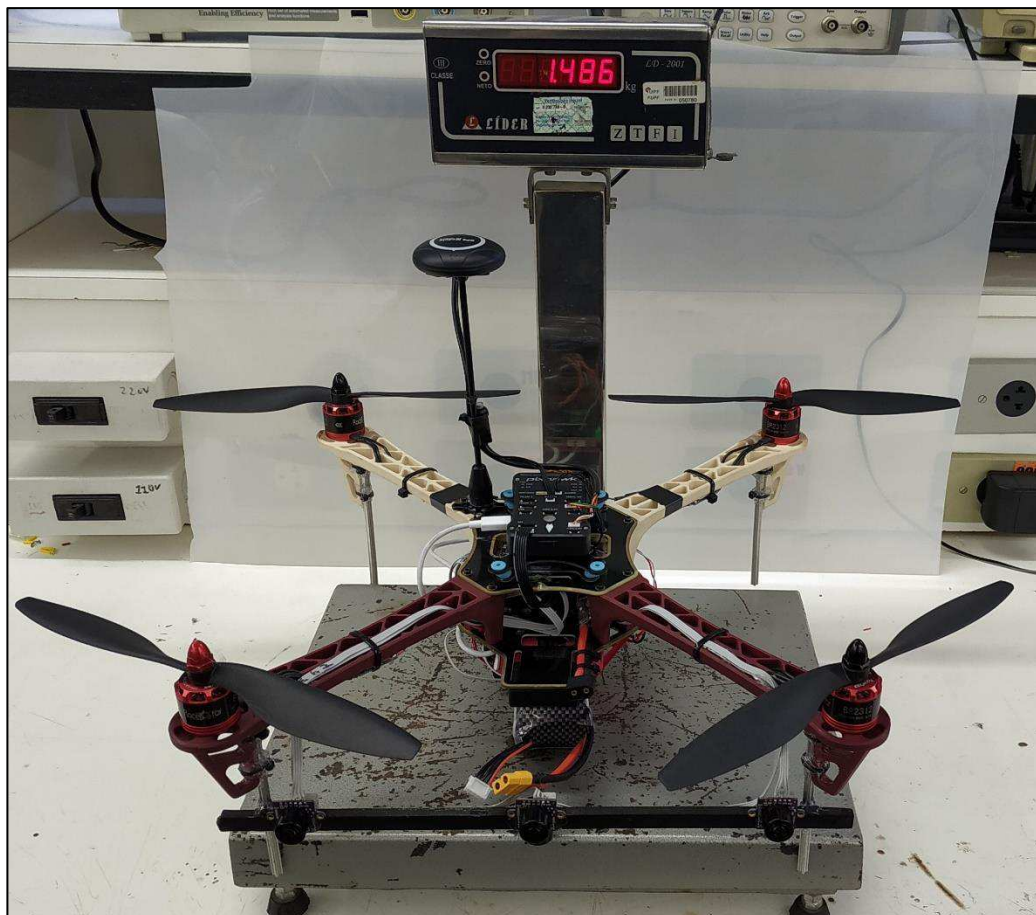
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a montagem do protótipo, foram feitos diversos testes, afim de validar seus aspectos mecânicos e sua lógica de programação.

4.1 RESULTADOS SOBRE A MONTAGEM DO VEICULO

O protótipo final pode ser visto na Figura 39 e tem 1,486 Kg incluindo sua bateria. Suas dimensões finais de uma ponta de hélice a outra são 58cm, por ele apresentar um formato quadrado, tem as mesmas dimensões em todos os seus lados. Com estes parâmetros o protótipo construído se encaixa na regra Classe 3 Abaixo ou igual a 25 kg, devendo assim possuir registro na Agencia Nacional de Aviação Civil (ANAC).

Figura 38 – Protótipo final



Fonte: Autor (2019)

A estrutura mecânica apresentou boa qualidade de montagem, mantendo-se firme e rígida durante os testes realizados, não proporcionando demais vibrações ao conjunto todo. O seu frame escolhido de quadricoptero em formato de X com um espaço central para montagem de periféricos, foi satisfatório, necessitando de ajustes em sua estrutura para a montagem total do mesmo.

Foi adicionado um trem de pouso de 6.5 centímetros, feito em alumínio, devido ao fato de apresentar uma boa resistência e um baixo coeficiente de peso específico, acrescentando apenas 24 gramas a mais sobre o protótipo, deste modo possibilitou-se a elevação do veículo em relação ao solo, viabilizando, portanto, a instalação do microcomputador e da bateria na parte inferior.

Em sua parte central, por apresentar uma área reduzida, foram instalados o módulo de rádio frequência, com suas duas antenas fixadas sobre os braços da estrutura, neste mesmo espaço interno houve-se a instalação do sensor voltímetro e amperímetro. O conjunto controlador de voo e mesa anti-vibração foram instaladas sobre o veículo devido ao conjunto apresentar um tamanho relativamente grande em comparação a estrutura.

A antena GPS e sua estrutura foram fixadas nos mesmos parafusos de encaixe da estrutura, porém, devido a um erro onde o tamanho do parafuso foi desconsiderado, este módulo soltou-se durante um teste de voo, atingindo uma hélice e provocando a queda do veículo, este problema foi solucionado, utilizando parafusos com uma dimensão maior em conjunto com o produto trava parafusos.

Durante os primeiros voos, observou-se uma dificuldade em o veículo se manter totalmente estável, através de testes foi notado que as hélices não vem balanceadas de fábrica, ocasionando assim vibrações excessivas sobre todo o sistema, este problema foi corrigido utilizando um balanceador, esse fixa a hélice em seu ponto central por meio de imãs proporcionando um atrito mínimo proporcionando que a hélice incline para seu lado de maior peso, com isso identificado, essa é lixada com o intuito de provocar seu nivelamento. Podemos ver a partir da Figura 41 uma hélice desbalanceada e na Figura 42 a mesma após seu balanceamento.

Figura 39 – hélice desbalanceada



Fonte: Autor (2019)

Figura 40– hélice balanceada



Fonte: Autor (2019)

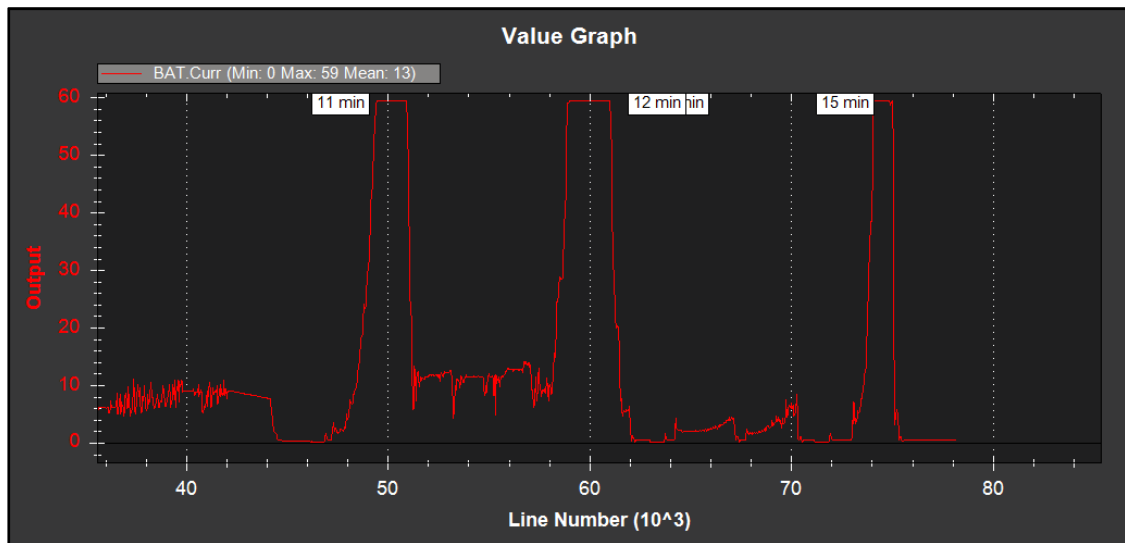
4.2 RESULTADOS CONSUMO ENERGÉTICO

Foram realizados testes estáticos e dinâmicos a fim de determinar o consumo máximo e médio do sistema, como demonstrados nos tópicos abaixo.

4.2.1 Teste estático do máximo consumo

Em um teste estático com o veículo fixado no solo, foi verificado seu máximo consumo energético de todo o sistema. Seus motores foram colocados em rotação máxima, causando o maior estresse possível do sistema. Com isso obteve-se uma corrente de pico de 59 A, como é apresentado no gráfico da Figura 43.

Figura 41 – Gráfico consumo máximo do sistema



Fonte: Autor (2019)

4.2.2 Teste de consumo médio

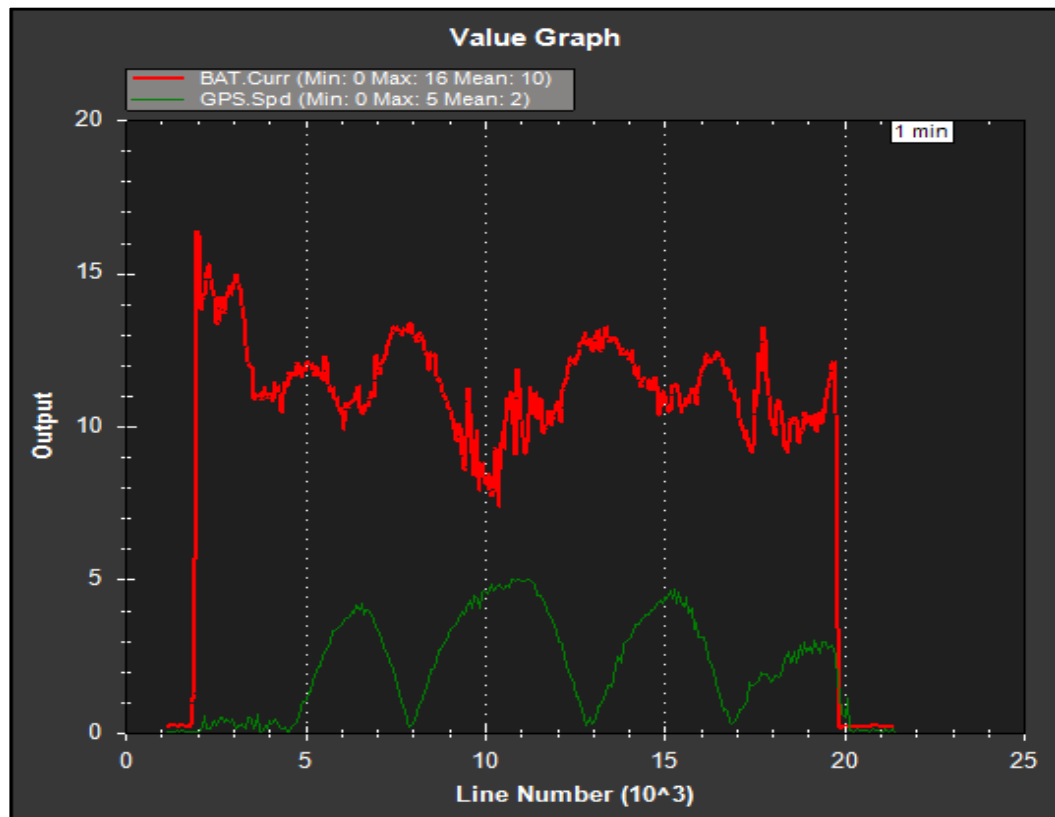
Através da interface desenvolvida para o planejamento de voo, foi configurada uma trajetória de voo no campo de futebol da Universidade de Passo Fundo, por ser um lugar livre de obstáculos. Seu percurso se deu com o veículo decolando a 15 metros de altitude e voando para três coordenadas diferentes, a fim de determinar a corrente media consumida durante o voo em um dia sem muito vento. Pode-se através da Figura 44 observar o deslocamento que se deu a partir do ponto amarelo, em comparação a Figura 45 demonstra o consumo e a velocidade do veículo nesta trajetória.

Figura 42 – Deslocamento do veículo



Fonte: Autor (2019)

Figura 43 – Consumo energético e velocidade

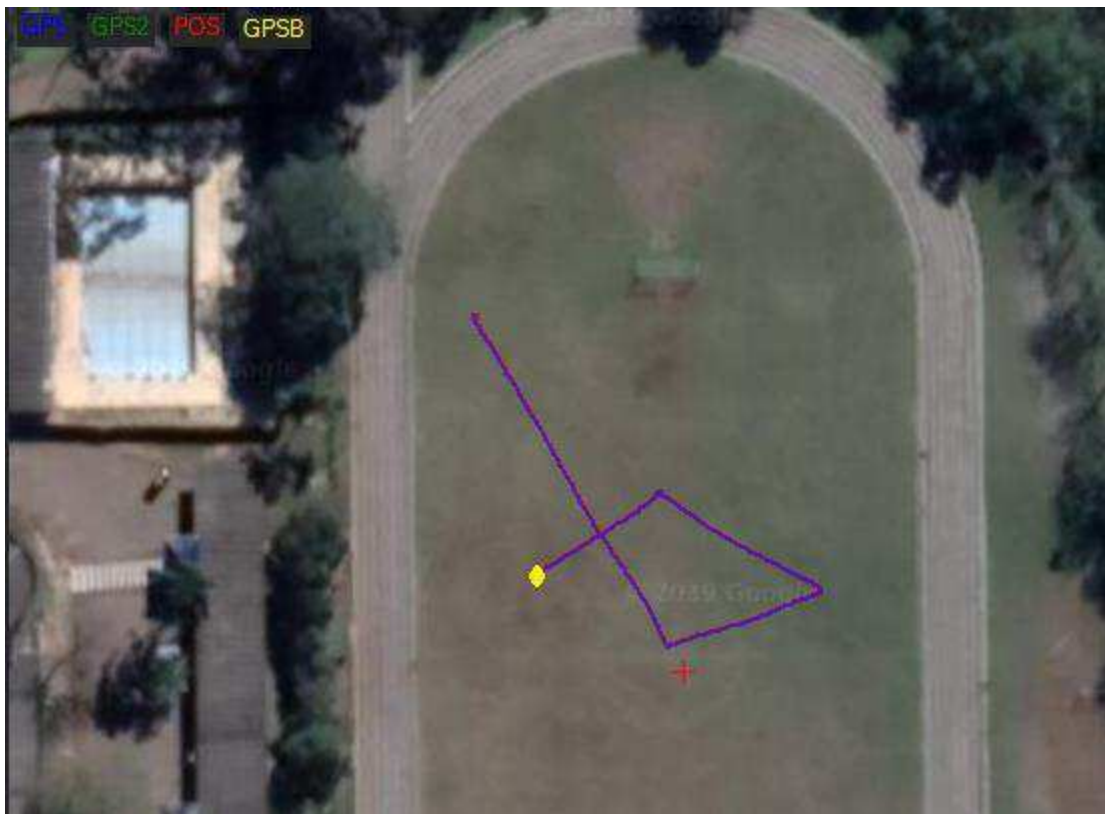


Fonte: Autor (2019)

4.3 TESTES DE VOO

Com intuito de validar o correto funcionamento do sistema de navegação, foram realizados alguns testes de voo em ambientes controlados e livres de pessoas e obstáculos. Seu principal teste foi realizado com um plano de voo que envolvia voar para 4 coordenadas e ficar por 5 segundos em cada, este voo foi realizado a 40 metros de altitude a fim de testar o comportamento do veículo em ventos de alta altitude. Por meio da Figura 46 pode-se ver seu ponto de decolagem em amarelo, seu plano de voo em vermelho e seu caminho feito em azul, através de uma análise visual pode-se concluir seu caminho realizado se tornou praticamente idêntico ao planejado.

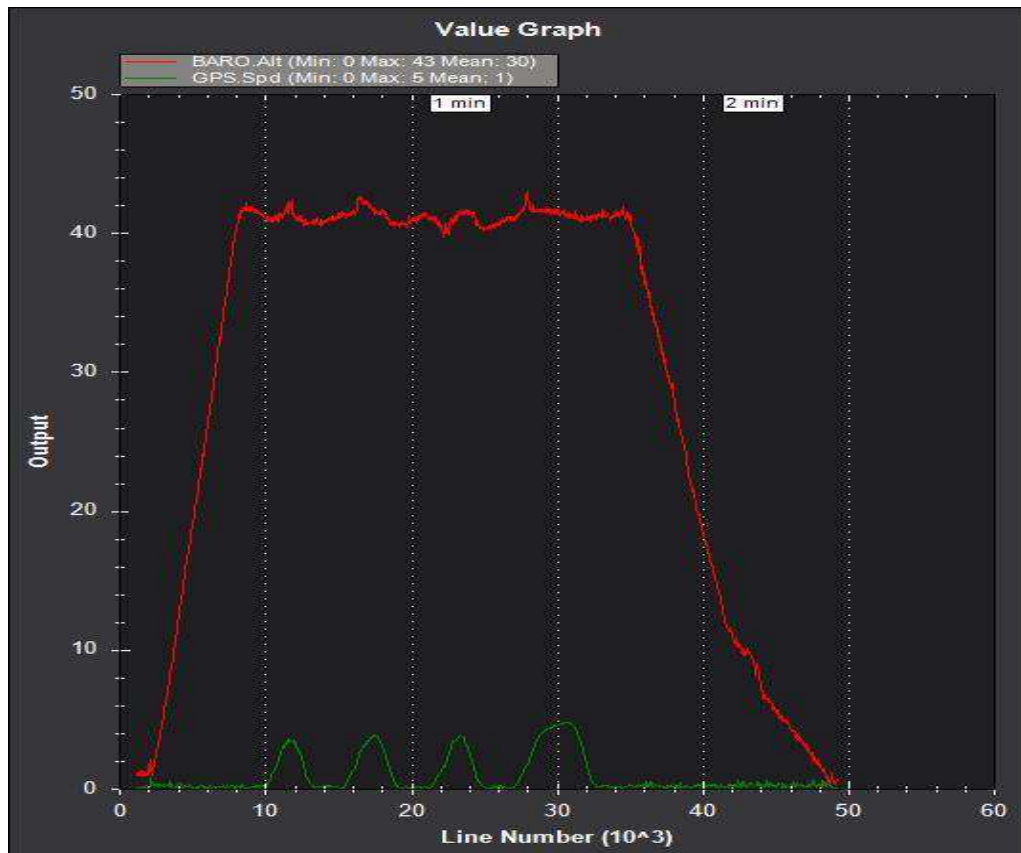
Figura 44 – Voo de alta altitude



Fonte: Autor (2019)

Os dados de altitude e velocidade adquiridos ao longo de voo podem ser observados na Figura 47.

Figura 45 – Altitude e velocidade do percurso



Fonte: Autor (2019)

4.4 SENSORES E OBSTÁCULOS

Foram instalados 4 sensores de obstáculos do tipo ultrassônico no veículo a fim de acrescentar em seu software a capacidade de desviar de possíveis obstáculos presentes em sua trajetória. Apresentou-se uma complexidade extra ao trabalhar com este tipo de sensor, uma vez que alguns dados fornecidos pelo fabricante estavam incorretos, como sua tensão de operação que constava operar de 3 V a 5V, no entanto não funcionou corretamente quando submetido a uma tensão de 3.3 V, a lógica de leitura da sua comunicação I2C fornecida pelo fabricante, apresentava erros, com seus 8 bits de dados mais significativos estando invertidos em relação aos menos significativos.

Com a correção destes problemas consumindo um tempo fundamental para o desenvolvimento deste projeto, acabou por estes não serem totalmente testados em voo para a garantia de um voo seguro e consistente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final deste período de desenvolvimento, pôde ser realizado o estudo e desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado do tipo quadricoptero. O projeto construído se demonstrou ser robusto em seus teste apresentando a capacidade de voar para diversas coordenadas fornecias por um usuário, desde que não exceda sua margem de proteção, juntamente foi desenvolvida uma lógica de filtros media moveis, para correção dos sensores ultrassônicos e seu sensor de bateria, essa quem é monitorada constantemente durante o voo a fim de evitar e em casos de necessidade é tomada a medida cabível com a situação.

Como aprimoramentos futuros, está a possibilidade de terminar seu sistema contra colisão e a implementação de novas ferramentas como redundância para sua navegação, como visão computacional através de câmera e sensores do tipo LIDAR para aquisição de distancias de forma mais eficiente.

REFERÊNCIAS

AUGUSTO, Thaís. **Uso de drones cresce dentro de vários segmentos empresariais**. 2018.

Disponível em: <<https://veja.abril.com.br/economia/mercado-de-drones-cresce-dentro-do-setor-empresarial/>>.

Acesso em: 25 out. 2018.

CODEL, Eddie. **Tendências de inovações em drones em 2017**. 2017.

Disponível em: <<https://iq.intel.com.br/tendencias-de-inovacoes-em-drones-para-serem-observadas-em-2017/>>.

Acesso em: 20 out. 2018.

GALVÃO, Márcio Régis. **Tendências dos Drones para 2018**. 2018.

Disponível em: <<http://www.administradores.com.br/artigos/tecnologia/tendencias-dos-drones-para-2018/109179/>>.

Acesso em: 20 out. 2018.

KROSSBLADE: HISTORY OF QUADCOPTERS AND OTHER MULTIROTORS. HISTORY OF QUADCOPTERS AND OTHER MULTIROTORS. 2016.

Disponível em: <<http://www.krossblade.com/history-of-quadcopters-and-multirotors/>>.

Acesso em: 11 out. 2018.

AGARWAL, Tarun. **Introduction To Electronic Speed Control (ESC) Working and Applications**. 2016.

Disponível em: <<https://www.elprocus.com/electronic-speed-control-esc-working-applications/>>.

Acesso em: 21 out. 2018.

AGENCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **RBAC 94**: Operações de aeronaves não tripuladas. Brasília: Anac, 2017. 7 p.

Disponível em: <http://www.anac.gov.br/noticias/2017/regras-da-anac-para-uso-de-drones-entram-em-vigor/release_drone.pdf>.

Acesso em: 20 out. 2018.

FERNANDES, Fernando. **Controladores De Voo**. 2017.

Disponível em: <<http://www.decom.ufop.br/imobilis/construa-um-drone-do-zero-controladora-de-voo/>>.

Acesso em: 21 out. 2018.

BURNETT, Roderick. **Understanding How Ultrasonic Sensors Work**. 2018.

Disponível em: <<https://www.maxbotix.com/articles/how-ultrasonic-sensors-work.htm>>.

Acesso em: 23 out. 2018.

MULTIWII.

Disponível em: <<http://www.mutiwii.com/>>.

Acesso em: 12 out. 2018.

UDACITY: Navegar é preciso: como drones autônomos encontram os caminhos certos. Navegar é preciso: como drones autônomos encontram os caminhos certos. 2018.

Disponível em: <<https://br.udacity.com/blog/post/drones-autonomos>>.

Acesso em: 20 out. 2018.

SUEIRO, Diego. **Raspberry Pi 3 com Wi-Fi, Bluetooth e 4 núcleos de 64 bits**. 2016.

Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/raspberry-pi-3/>>.

Acesso em: 12 out. 2018.

DRONEMODELISMO. **Versões de Naze32 Revision 6**. 2017.

Disponível em: <<https://www.dronemodelismo.com.br/versoes-de-naze32-revision-6/>>.

Acesso em: 13 out. 2018.

FARIA, Caroline. **GPS (Sistema de Posicionamento Global)**. 2010.

Disponível em: <<https://www.infoescola.com/cartografia/gps-sistema-de-posicionamento-global/>>.

Acesso em: 18 out. 2018.

OKYSTAR. GY-US42 Flight Control Ultrasonic Range Sensor Module for Pixhawk IIC. 2017.

Disponível em: <<https://okystar.com/product-item/gy-us42-flight-control-ultrasonic-range-sensor-module-for-pixhawk-iic-oky3264/>>.

Acesso em: 13 out. 2018.

RACERSTAR BR2312 960KV. 2017.

Disponível em: <<https://www.racerstar.com/Racerstar-Racing-Edition-2312-BR2312-960KV-2-4S-Brushless-Motor-CW-CCW-For-350-400-RC-Drone-FPV-Racing-Multi-Rotor-p-61.html>>.

Acesso em: 20 out. 2018.

RACERSTAR RS30A Lite 30A Blheli_S BB1 2-4S Brushless ESC Support Dshot150 Dshot300 for RC FPV Racing Drone. 2017.

Disponível em: <https://www.racerstar.com/Racerstar-RS30A-Lite-30A-Blheli_S-BB1-2-4S-Brushless-ESC-Support-Dshot150-Dshot300-for-RC-FPV-Racing-Drone-p-71.html>.

Acesso em: 20 out. 2018.

NORDICSEMI: nRF24L01. nRF24L01. 2013.

Disponível em: <[https://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24L01P/\(language\)/eng-GB](https://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24L01P/(language)/eng-GB)>.

Acesso em: 27 out. 2018.

ARXANGELRC: BEC 7A / 5V. BEC 7A / 5V. 2016.

Disponível em: <<https://www.arxangelrc.com/bec-7a-5volt.html>>.

Acesso em: 16 out. 2018.

HOBBY-WING: Ublox 7 Series Mini GPS for OPLink CC3D Revolution / Naze32 Flip32. Ublox 7 Series Mini GPS for OPLink CC3D Revolution / Naze32 Flip32. 2015.

Disponível em: <<https://www.hobby-wing.com/mini-gps-cc3d-naze32-flight-controller.html>>.

Acesso em: 15 out. 2018