

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Eletrônica

Controle para automatização de um quadricóptero

Autor: Matheus Araujo Soares Rosa
Orientador: Sébastien R. M. J. Rondineau

**Brasília, DF
2018**

MATHEUS ARAUJO SOARES ROSA



Controle para automatização de um quadricóptero

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Sébastien R. M. J. Rondineau

Brasília, DF
2018

Matheus Araujo Soares Rosa.

Controle para automatização de um quadricóptero/ Matheus Araujo Soares Rosa. –
Brasília, DF, 2018-
73 p. : il. ; 30 cm.

Orientador: Sébastien R. M. J. Rondineau.

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA, 2018.

1. Drone. 2. Quadricóptero. 3. APM. I. Prof. Dr. Sébastien R. M. J. Rondineau. II.
Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Controle para automatização de
um quadricóptero.

CDU 02:141:005.6

MATHEUS ARAUJO SOARES ROSA

Controle para automatização de um quadricóptero

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 24 de Agosto de 2018:

Prof. Dr. Sébastien R. M. J. Rondineau
Orientador

Prof. Dr. Henrique Marra Taira Menegaz
Convidado 1

Prof. Dr. Gerardo Antonio Idrobo Pizo
Convidado 2

Brasília, DF
2018

Agradecimentos

Após todos esses cinco anos cursando Engenharia Eletrônica, em uma das melhores universidades do país, sinto que me tornei uma pessoa mais decidida, confiante e capacitada para enfrentar o que vier no futuro. Portanto deixo meu agradecimentos às pessoas que me ajudaram durante a graduação.

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar esperanças e forças nos momentos difíceis e ter me dado a oportunidade de ter conhecido as melhores pessoas da faculdade.

A minha mãe e meu pai, que são os melhores exemplos de seres humanos que alguém pode ter, além de ter sempre me dado suporte e incentivo durante todos os momentos da minha vida.

Ao meu irmão, que sempre quando possível cobre minhas atividades no trabalho familiar para que eu possa estudar.

A minha namorada, que além de me confortar, inspirar, apoiar, ajudar e alegrar, com o seu amor, realizou comigo cada aspecto deste projeto, melhor colega e dupla de trabalho possível.

Ao Arilson e todos meus amigos do Bonde, pessoas valiosas que eu conheci durante a faculdade e que me ajudaram com tudo que a palavra amizade representa.

Aos Mestres, especialmente o Professor Sébastien, pela orientação, paciência e pelo trabalho dedicado na FGA.

E a todas as pessoas, que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho e para a minha graduação.

Resumo

Uma das invenções com maior gama de aplicações e popularidade, atualmente, os Drones têm sido bastante estudados nas engenharias. O voo autônomo, onde a aeronave não necessita de um piloto para realizar ações, é a característica mais buscada neste tipo de veículo, uma aeronave inteligente. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo apresentar o projeto de um VANT que seja capaz de realizar trajetórias, pré-definidas, de forma autônoma. Também é apresentado, além da construção de todo hardware, uma detalhada discussão sobre os pontos fundamentais para a construção de um quadricóptero, calibrações de sensores, as configurações feitas no veículo e uma análise em software dos principais pontos que tornam o voo autônomo possível. A solução apresentada utiliza a controladora de voo Ardupilot 2.8, microcontrolador ATmega2560, que com auxílio de sensores como barômetro, GPS e bússola consegue orientar a posição do veículo aéreo em tempo real. Sendo possível, através desta geolocalização, efetuar um voo autônomo programável por waypoints.

Palavras-chaves: Drone, quadricoptero, voo autônomo, APM, Mission Planner.

Abstract

One of the biggest changes of applications and regions today, has been enough learned in the engineering. The autonomous flight, where the aircraft is not required to perform actions, is a most sought after feature in this type of vehicle, an intelligent aircraft. Therefore, this work has to present the design of a VANT that can be able to perform trajectories, pre-define, in an autonomous way. It is also presented, in addition to the construction of all the hardware, a discussion discussion on the fundamental points for the construction of a quadcopter, sensor calibrations, such as the configurations made in the vehicle and a software analysis of the main points that make the flight autonomous as possible . A control solution using a flight controller 2.8, ATmega2560 microcontroller, with the aid of sensors such as barometer, GPS and data capture, guides the position of the air conditioning in real time. Being possible, once this, execute a autonomous programmable flight by waypoints.

Palavras-chaves: Drone, quadcopter, autonomous flight, APM, Mission Planner.

Lista de Ilustrações

	Pág.
Figura 1: Cálculo da aplicação comercial dos drones por setor de economia	13
Figura 2: A esquerda Drone utilizado na segurança pública e a direita Drone da Amazon utilizado em entregas	14
Figura 3: À direita um helicóptero tradicional e à esquerda um quadricóptero	17
Figura 4: Número de pesquisas do termo Drones, no Google, em todo o mundo.....	18
Figura 5: Tipos de estruturas mais utilizadas nos Drones.....	18
Figura 6: Os diferentes sentidos de rotação dos motores em um quadricóptero.....	20
Figura 7: Nomeação de acordo com o padrão aeronáutico dos giros dos eixos.....	21
Figura 8: Relação correspondente a ação dos motores no movimento do quadricóptero.....	23
Figura 9: Interface do Mission Planner, permitindo visualizar informações da aeronave e sua localização via GPS.....	25
Figura 10: Características complementares dos sensores GPS e acelerômetro.....	27
Figura 11: Esquemático do processo de fusão dos sensores GPS e acelerômetro.....	29
Figura 12: Power Module, GM v1.0, compatível com a APM.....	30
Figura 13: Módulo de GPS Ublox M8n, um dos mais utilizados no aeromodelismo.....	31
Figura 14: Kit de telemetria da 3DR de 433MHz, a esquerda placa serial e a direita placa USB..	32
Figura 15: Controlador de velocidade Hobbysky Simonk 30.....	33
Figura 16: Rádio Controle FS-i6	34
Figura 17: Frame F450.....	35
Figura 18: Motor brushless 920kv.....	36
Figura 19: Par de hélices DJI 9443.....	38
Figura 20: Bateria de lítio da marca Tattu utilizada no projeto.....	39
Figura 21: Esquemático do Teste de Empuxo.....	43
Figura 22: Teste de Empuxo.....	44
Figura 23: Soldas realizadas na placa central do frame.....	46
Figura 24: Base do frame montado com motores.....	47
Figura 25: Drone completo após montagem.....	48

Figura 26: Botões de trim no FlySky FS-I6.....	52
Figura 27: Esquema do funcionamento do controle PID no controle de atitude.....	54
Figura 28: Descrição matemática do controle PID.....	55
Figura 29: Arquitetura comum utilizada nos modos simples.....	56
Figura 30: Arquitetura comum dos modos complexos.....	59
Figura 31: Gráfico da posição desejada, em verde, e a posição real, em vermelho, no eixo X....	61
Figura 32: Gráfico do erro relativo ao eixo X.....	63
Figura 33: Gráfico da posição desejada, em vermelha, e a posição real, em verde, no eixo Y....	63
Figura 34: Gráfico do erro relativo ao eixo Y.....	64
Figura 35: Gráfico das velocidades desejada, em vermelho, e real, em verde, no eixo X.....	65
Figura 36: Gráfico do erro relativo à velocidade do eixo X.....	65
Figura 37: Gráfico das velocidades desejada, em vermelho, e real, em verde, no eixo Y.....	66
Figura 38: Gráfico do erro relativo à velocidade do eixo Y.....	67
Figura 39: Gráfico da posição desejada, em vermelha, e a posição real, em verde, no eixo Y....	67
Figura 40: Gráfico do erro relativo a altitude.....	68

Lista de Tabelas

Tabela 1: Dados comparativos entre os rádio-controles mais comumente utilizados.....	34
Tabela 2: Consumo do motor de 920kv.....	37
Tabela 3: Peso total do Drone.....	42
Tabela 4: Resultados do teste de empuxo.....	44

Sumário

Introdução	13
Objetivo Geral	15
Objetivo Específico	15
Revisão Bibliográfica	16
Quadricópteros	16
Voo Autônomo	19
Controladora de Voo	20
Dinâmica	21
Ardupilot Mega (APM)	23
Mission Planner	24
Modos de Voo	25
Aquisição da Velocidade e Posição	26
Demais Componentes de Hardware	29
Power Module	29
Módulo GPS (Global Positioning System)	30
Telemetria	31
Controlador Eletrônico de Velocidade	33
Rádio Controle	34
Estrutura	35
Motores	36
Hélices	37
Bateria	38
Metodologia	39
Levantamento de Variáveis e Requisitos	40
Tomada de Decisões	40
Desenvolvimento do Protótipo	40
Testes de Requisitos	41
Validação do Projeto	41
Resultados	42
Teste de Empuxo	42

Autonomia do Drone	45
Fabricação do Hardware	46
Calibrações Iniciais	49
Configurações avançadas	51
Save Trim	51
Auto Tune	53
Análise dos Modos de voo	54
Modos de Voo Simples	55
Modos de Voo Complexos	59
Análise de Logs	61
Considerações Finais	68
Referências Bibliográficas	70

1. Introdução

Os VANT's (veículos aéreos não tripulados), são definidos como aeronaves que não necessitam de pilotos a bordo para serem controlados, possuindo todo seu funcionamento baseado em uma eletrônica embarcada que possui um controlador de voo que recebe comandos remotos de um rádio-controle ou uma base. Sendo assim, nos últimos anos a atenção de pesquisadores e empresas neste tipo de dispositivo teve uma crescente pelo fato de que essas plataformas são capazes de substituir o homem em atividades que são consideradas perigosas, hostis e de difícil acesso, fundamentado em uma instrumentação de fácil acesso e a um custo razoável.

Em 2012, um relatório do congresso americano publicou que cerca de um em cada três aviões militares dos Estados Unidos eram drones, pois eles eliminam os riscos para a vida dos pilotos e não sofrem restrições na duração de operações devido a limitações humanas. Além disso, podem ser envolvidos em ações mais arriscadas e seus custos são bem menores. Porém, com o avanço dos estudos de engenharia, áreas como resgate, agricultura, mineração, construção civil, energia e segurança passaram a utilizar e, segundo a empresa PwC, o mercado global de drones pode chegar a 127 bilhões de dólares, como é apresentado na Figura 1, que apresenta o valor aplicado em cada setor da economia para utilização de drones.

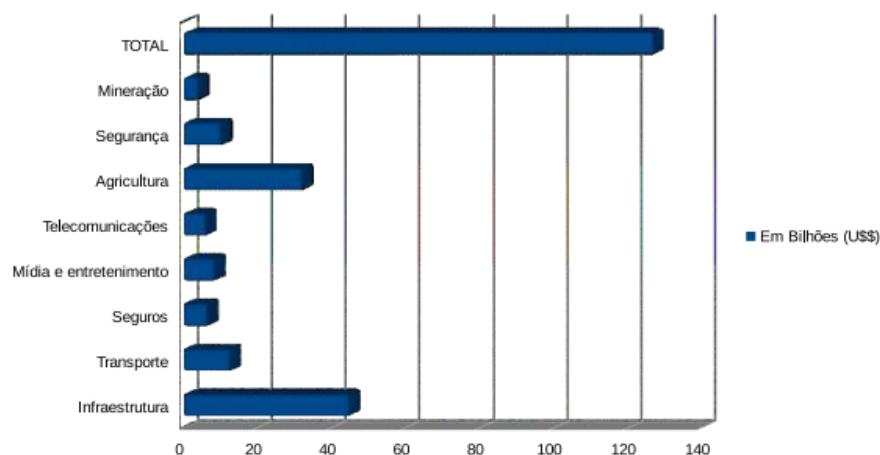


Figura 1: Cálculo da aplicação comercial dos drones por setor de economia.

Com os olhos das engenharias voltados para o desenvolvimentos de tecnologias e aplicações para Drones, trabalhos como o da transportadora de produtos Amazon e do monitoramento de segurança, já utilizados pela polícia do mundo inteiro, presentes na Figura 2, vêm mudando para melhor a vida das pessoas. Não diferente dessas aplicações, o trabalho relatado aqui tem a finalidade de melhorar a vida das pessoas.

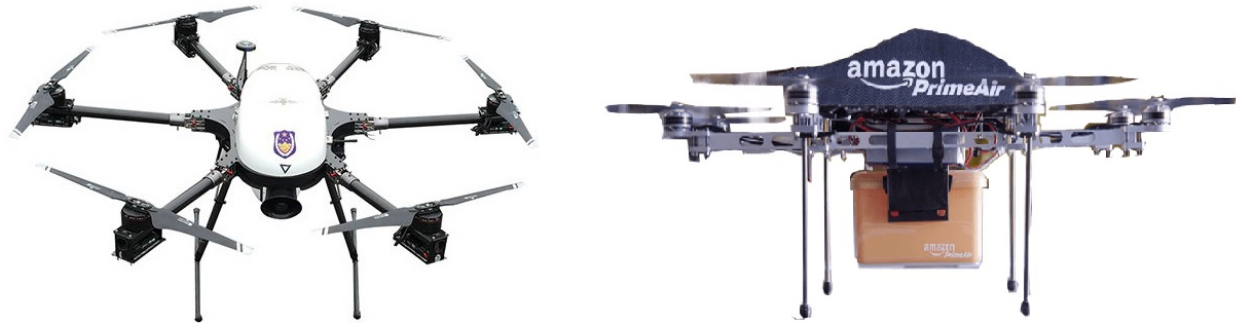


Figura 2: A esquerda Drone utilizado na segurança pública e a direita Drone da Amazon utilizado em entregas.

Atualmente os estudos sobre os Drones estão voltados para tornar estes veículos aéreos capazes de voar sem um piloto humano, o chamado voo autônomo. Neste tipo de voo as aeronaves, com seu inteligente controlador eletrônico, percorrem trajetórias e executam tarefas pré-programadas. A realização deste tipo de função torna estes veículos capazes de transportar mercadorias, coletar imagens e outras inúmeras aplicações que estarão presentes no nosso dia a dia.

Levando em consideração os fatos apresentados, as atividades desempenhadas neste trabalho objetivam a construção de um drone que seja capaz de realizar trajetórias, pré-definidas, de forma autônoma. Como parte das atividades realizadas, estava previsto fazer a relação e a compra dos produtos necessários, fazer todo o planejamento, construção, calibração, teste e validação do projeto.

1.1. Objetivo Geral

Este trabalho objetiva a construção de um Drone de estrutura em “x” e com quatro motores, com capacidade de se auto estabilizar no durante o voo e realizar manobras autônomas de acordo com trajetórias pré programadas. Assim como a construção do veículo, é finalidade deste trabalho realizar um estudo do software de controle autônomo utilizado e relatar as configurações, calibrações, testes e simulações feitos durante o projeto.

1.2. Objetivo Específico

Em específico, este trabalho tem como objetivo construir um drone autônomo utilizando a controladora de voo Ardupilot, microcontrolador ATmega2560, realizar todas as configurações necessárias para um voo estável da aeronave e apresentar um estudo sobre os principais aspectos da arquitetura da plataforma APM que permitem a realização do voo autônomo.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Quadricópteros

Os quadricópteros fazem parte da categoria dos Drones, um dos tipos de aeronaves não tripuladas (VANTs). O nome Drone vem do inglês que traduzido para o português significa zangão, o inseto macho das abelhas, isso porque o barulho que essas aeronaves fazem lembram muito ao do inseto (RODRIGUES, 2017).

Também chamado de helicóptero quadrirotor, o quadricóptero é uma aeronave caracterizada por utilizar quatro motores para realizar o seu impulsionamento, portanto, não são caracterizados como aeronaves de asas fixas, como os aviões, mas sim de asas rotativas, como os helicópteros. Os engenheiros, assim que o voo por aeronaves começou, identificaram que a estrutura com quatro motores era uma possível solução para alguns dos problemas dos voos verticais. Inicialmente foram projetados quadrirotores tripulados, nas décadas de 1920 e 1930, mas sofriam de mau desempenho e exigiam um grande trabalho do piloto devido à má estabilidade e controle limitado. Uma das diferenças para os helicópteros tradicionais é a não utilização do motor de cauda, componente responsável por anular as ações de torque, um componente que não auxilia no impulso da aeronave, portanto retirá-lo traria um ganho de desempenho. Na Figura 3 é mostrado um comparativo entre um helicóptero tradicional e um quadricóptero, ambos da categoria dos VANTs.



Figura 3: À direita um helicóptero tradicional e à esquerda um quadricóptero.

Recentemente os projetos tornaram-se mais populares em veículos não tripulados, em que esses veículos utilizam um sistema eletrônico de controle e sensores para estabilizar a aeronave, a controladora de voo. Devido a sua agilidade, opções de manobras e tamanho reduzido, esses quadricópteros podem ser pilotados nos mais variados tipos de ambientes, inclusive nos fechados e de difícil acesso. As vantagens dessas aeronaves são inúmeras, não são necessárias ligações mecânicas para variar o ângulo das pás dos rotores e o uso de quatro rotores permite que cada rotor individual tenha um diâmetro menor ou igual ao rotor do helicóptero o que lhes permite ter menos energia cinética durante o voo, isto simplifica a criação e manutenção do veículo (STUDART, 2015).

Todas essas vantagens fizeram com que os Drones se popularizassem. Como mostrado na Figura 4, isso aconteceu recentemente, esse gráfico foi obtida por meio do Google Trends, e mostra a popularização dos drones no decorrer do tempo. Em azul há o número de pesquisas pelo termo Drones.

Interesse ao longo do tempo



Figura 4: Número de pesquisas do termo Drones, no Google, em todo o mundo.

Existem vários modelos de drones multimotores, o que mais difere entre eles é a quantidade de motores e o formato que eles são organizados. Entre os formatos estão os quadricópteros, destacado na Figura 5, que formam um X ou um +, os hexacópteros e os tricópteros.

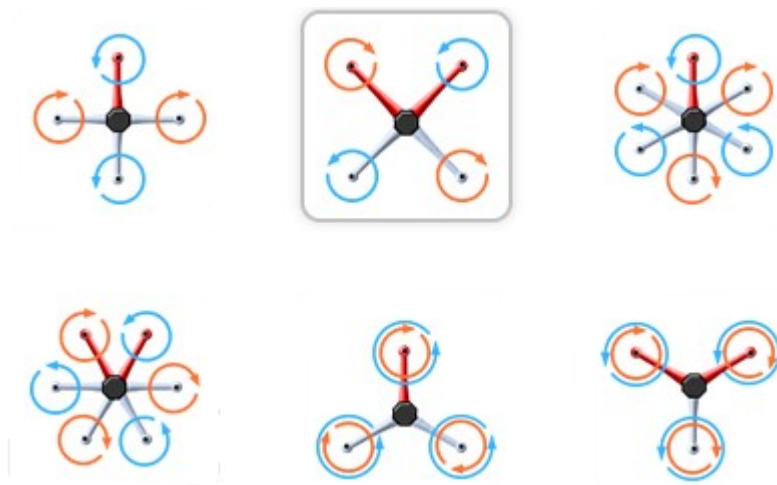


Figura 5: Tipos de estruturas mais utilizadas nos Drones.

2.2. Voo Autônomo

Com o reconhecimento que os Drones são ferramentas fantásticas, grandes empresas enxergaram nestas aeronaves o potencial de mudar diversas atividades presentes no nosso dia a dia. Com a chegada desses investimentos, feitos pelas empresas, estamos perto de uma revolução causada pela automatização desses veículos.

A verdade é que já temos aeronaves capazes de realizarem voos sozinhas, com inteligência artificial que as possibilita reconhecer obstáculos, seguir uma rota pré-programada, seguir alvos fazer mapeamento de terrenos e diversas outras aplicações. Apesar do grande avanço tecnológico já existente, ainda temos uma corrida entre as empresas para conseguir apresentar um projeto seguro o bastante que possibilite a regulamentação das aeronaves autônomas, afinal este tipo de veículo pode gerar diversos acidentes. A Anac proíbe, de acordo com o Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial, a operação autônoma de aeronaves não tripuladas.

Atualmente o desenvolvimento do voo autônomo tem 2 vertentes. Os primeiros são os que baseiam os seus projetos na sofisticação dos algoritmo de controle com sensores sonares, para identificar obstáculos, e identificador de posição com sistema de coordenadas, GPS. Os segundos conseguem ter os seus projetos ainda mais complexos, utilizando um conjunto de câmeras para processamento de imagens são capazes de realizar múltiplas ações por segundo, como identificar objetos, desviar de obstáculos e seguir um alvo.

A Amazon é uma empresa muito avançada no primeiro arquétipo dos Drones autônomos, as suas aeronaves são voltadas para a entrega de produtos e promete realizar a entrega em até 30 minutos, mas ainda precisa avançar a sua tecnologia, para convencer as autoridades de regulamentar o sistema de entrega expressa por veículos autônomos.

Já a Skydio, empresa norte-americana, utiliza 13 câmeras embutidas e processador Jetson TX1, da Nvidia, também usado em protótipos de carros autônomos, tornando o seu veículo capaz de seguir um determinado objeto e desviar de obstáculos com incrível eficácia. Este projeto promete realizar filmagens de pessoas, nas mais diversas situações, com resolução de 4K, tudo de forma automática, através de inteligência artificial.

O voo autônomo é possível através da adição de sensores e equipamentos que permitem à aeronave a identificação de sua localização em tempo real e aos seu sofisticado sistema de controle que utilizam esses dados para efetuar ações autônomas durante o voo.

2.3. Controladora de Voo

O comando de voo de um drone só é possível devido a sua configuração de rotação dos motores. Como mostrado na Figura 6, dois dos motores giram no mesmo sentido e os motores adjacentes a estes giram no sentido contrário (AVELINO, 2016).

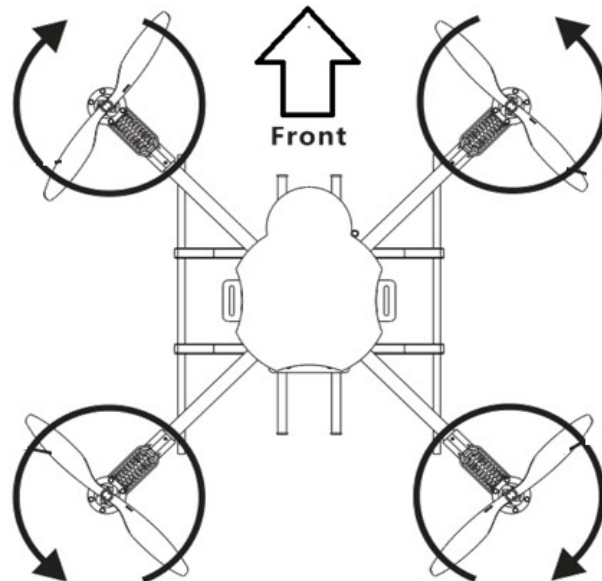


Figura 6: Os diferentes sentidos de rotação dos motores em um quadricóptero.

Então, para realizar o controle de voo de um drone é necessário ajustar a velocidade de giro de cada motor para que ele realize a ação desejada, ou seja, as manobras solicitadas pelo condutor do drone via rádio controle. Estas ações são determinadas a partir do ângulo em que o drone se encontra em relação ao sistema de coordenadas referencial.

Existem, portanto, três ângulos de rotação, um para cada eixo, presentes na Figura 7, que serão usados no controle de voo. Estes ângulos são nomeados de acordo com o padrão aeronáutico para aeronaves:

- Giro no eixo X: Roll
- Giro no eixo Y: Pitch
- Giro no eixo Z: Yaw

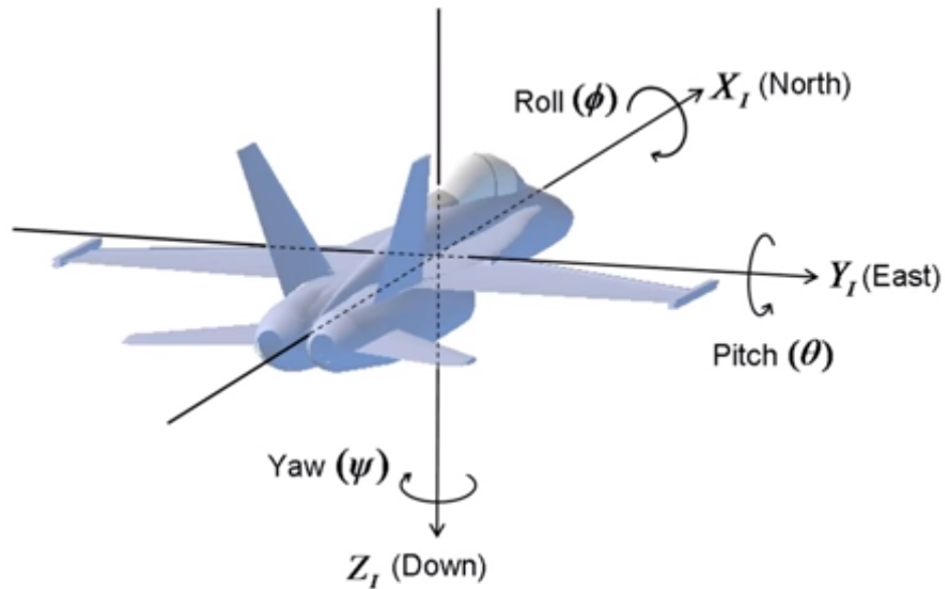


Figura 7: Nomeação de acordo com o padrão aeronáutico dos giros dos eixos.

Para o projeto de uma controladora de voo devemos conhecer muito bem com cada componente de hardware, assim como as técnicas necessárias para construir o software. Portanto, esta seção é dividida em subseções onde será apresentado cada um desses tópicos.

2.3.1. Dinâmica

A modelagem do sistema dinâmico é a análise da resposta do Drone, os seus movimentos, em relação a atuação dos motores. A disposição correta dos motores elimina o efeito dos torques gerados por eles. Logo, hélices adjacentes devem girar em sentidos opostos (LEISHMAN, 2000). Portanto dois dos motores giram em sentido horário, motor 2 e 4, e dois dos motores em sentido anti-horário, motores 1 e 3, a numeração dos rotores pode ser verificada na Figura 8.

Na Figura 8 é ilustrada a dinâmica do quadricóptero, mostrando os movimentos possíveis e a ação dos motores correspondentes. A largura da seta é proporcional à velocidade dos rotores.

Fixando a velocidade dos motores 1 e 4 e aumentando a velocidade dos motores 2 e 3 o quadricóptero se move para frente, como mostrado na Figura 8(a). O contrário ocorre quando a aceleramos o par de motores 1 e 4, Figura 8(b). Este é o movimento de arfagem e corresponde ao ângulo pitch.

Os movimentos de rolagem para direita ou para esquerda, também chamado de roll, ocorrem quando a velocidade dos motores do lado oposto são maiores. Portanto, se 1 e 2 têm velocidade maior irá para a esquerda, Figura 8(d), e se 3 e 4 forem superiores o drone irá para direita, Figura 8 (c).

O aumento ou a diminuição, em igualdade, da velocidade nos quatro motores, faz com que o quadrirotor se mova verticalmente. Com o aumento simultâneo de todas as velocidades angulares dos rotores o quadrirotor se move para cima e a diminuição simultânea de todas as velocidades faz com que se mova para baixo, respectivamente Figura 8(e) e Figura 8(f).

A variação de rotação, em dois motores que giram no mesmo sentido, produz um torque em torno do eixo Z, gerando uma aceleração angular. Então, se os dois rotores que giram em sentido anti-horário, 1 e 3, aumentarem suas velocidades angulares e os motores 2 e 4 permanecerem com velocidade menor, o torque produzido na plataforma fará com que ele gire em sentido horário, como mostrado na Figura 8(g). O contrário ocorreria se a velocidade dos motores 2 e 4 fossem aumentadas em relação aos demais, Figura 8(h).

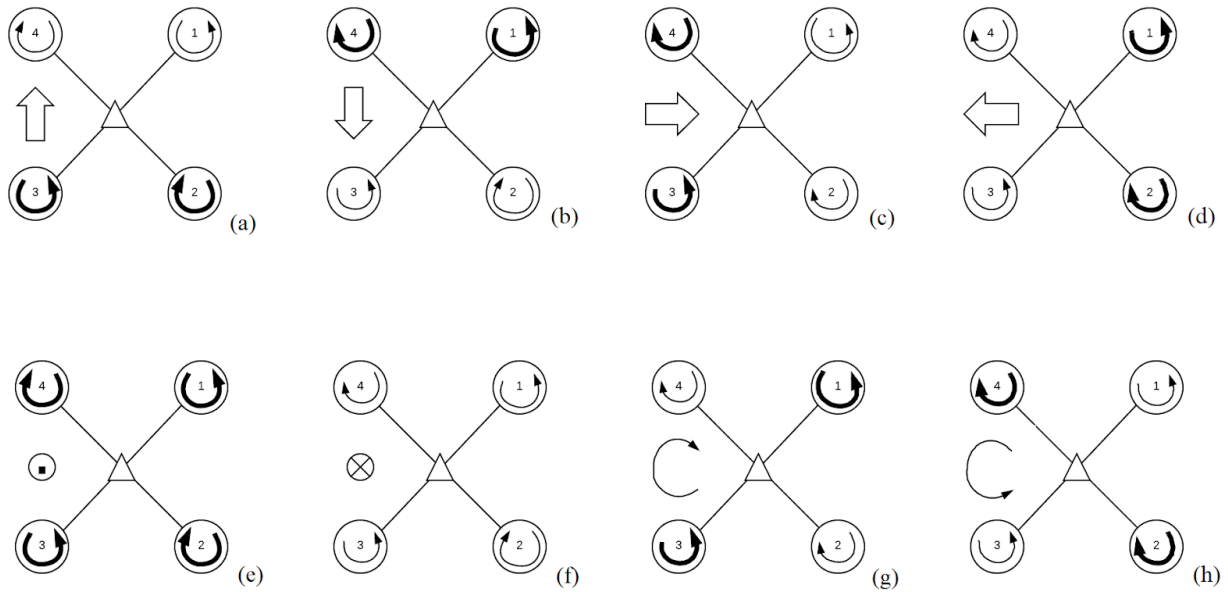


Figura 8: Relação correspondente a ação dos motores no movimento do quadricoptero.

2.3.2. Ardupilot Mega (APM)

Como já dito anteriormente, a controladora de voo é a peça mais importante de um Drone. No projeto deste trabalho foi utilizado a APM 2.8, da família Ardupilot. Esta placa foi escolhida principalmente por ter todo o seu software aberto, isso possibilita que diversos desenvolvedores estejam complementando a plataforma e testando coisas novas.

Essa versão do ArduPilot, APM 2.8, traz em sua estrutura o chip MPU-6000 de 6 eixos, que contém o sensor giroscópio em conjunto com um acelerômetro. A MPU juntamente com os sensores magnetômetro e barômetro, também de alta precisão, formam a unidade inercial da APM. Diferente das versões anteriores a 2.5, essa não possui bússola interna o que evita interferências magnéticas com os motores, ideal para os multirrotores. Possui conector para instalação do módulo GPS o qual é integrado com a bússola utilizado pelo veículo.

O grande cérebro desta placa é o processador Atmega2560 da Atmel, com uma arquitetura de 8 bits, memória flash de 256 Kb e uma operação a 16 MHz, é responsável por processar os dados e comandar as ações durante o voo. O Atmega32U-2 é um processador auxiliar responsável para codificar os sinais transportados via usb para o processador principal.

2.3.3. Mission Planner

Outra grande vantagem de se utilizar a controladora de voo Ardupilot é o seu aplicativo de auxílio para configurações e planejamento de missões, o Mission Planner. Este é um software gratuito, aberto e com suporte a comunidade, que funciona como estação de controle terrestre com suporte para três tipos de veículos: os planadores, os cópteros e os roovers (Ardupilot, 2016).

Este aplicativo pode ser usado como ferramenta de configurações ou como apoio de controle dinâmico para veículos, Figura 9, dentre as possibilidades que o Mission Planner traz, destaca-se:

- Carregar o firmware na placa APM
- Configuração de setup, configurações do voo e ajustes de parâmetros do controle de voo.
- Planejamento de missões autônomas.
- Registro de dados durante o voo autônomo, para análise.
- Com o auxílio de telemetria ainda é possível:
 - Monitorar status do veículo durante o voo a partir de telemetria (velocidade, inclinação, localização, altura, etc).
 - Operar o veículo em *First Person Vision* (FPV)
 - Análise se dados de telemetria.



Figura 9: Interface do Mission Planner, permitindo visualizar informações da aeronave e sua localização via GPS.

2.3.4. Modos de Voo

O software da APM traz diversas funcionalidades, dentre elas há a possibilidade de programar a aeronave para executar modos de voos diferentes, isso tudo com o veículo no ar. A mudança entre os modos de voo é feita através de comandos no controle remoto, e servem para alterar as características de voo e a forma com que o piloto interfere no comando da aeronave. Abaixo é descrito as características básicas destes modos:

- **Stabilize:** controle manual básico do Drone, busca sempre estabilizar a aeronave automaticamente. O piloto não precisa se preocupar com o nivelamento do drone, apenas com a direção e a altitude.
- **AltHold:** Este modo é responsável por controlar automaticamente o nivelamento e manter a atitude da aeronave. O piloto só precisa controlar a direção.

- Loiter: O Modo Loiter controla a estabilidade, a altura e mantém a aeronave inerte automaticamente. É possível ao piloto alterar a posição do Drone, mas quando o comando de controle é cessado o veículo volta a ficar inerte.
- Autônomo: No modo Automático, o veículo seguirá um script de missão pré-programado armazenado no piloto automático, que é composto de comandos de navegação (por exemplo, waypoints). O modo AUTO incorpora o controle de altitude do modo AltHold e o controle de posição do modo Loiter e não deve ser tentado antes que esses modos estejam funcionando corretamente.

2.3.5. Aquisição da Velocidade e Posição

Para uma análise de desempenho do veículo aéreo, é necessário que variáveis como altitude, velocidade e posição sejam adquiridas e analisadas. A altitude do drone é adquirida de forma direta a partir do barômetro, porém, a aquisição da velocidade e posição do drone é dependente dos sensores de GPS e acelerômetro.

O acelerômetro funciona em altas frequências, tem grande precisão, sendo sensível a pequenas variações, porém, seu sinal é sujeito ao efeito de deriva, o que ocasiona grande acumulação de erros durante o tempo. Já o GPS funciona em baixa frequência, tem pouca precisão, apresentada na Seção 2.4.2, mas em contrapartida é uma medida absoluta, não acumulando erros durante o tempo.

Como é mostrado na Figura 10, os sensores têm características diferentes e se completam, sendo necessário fazer a fusão de suas medidas para um bom funcionamento do controle das variáveis de velocidade e posição.

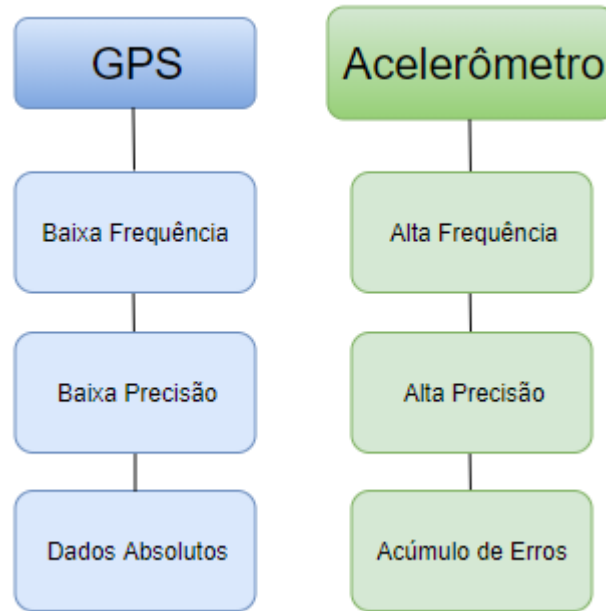


Figura 10: Características complementares dos sensores GPS e acelerômetro.

A fusão destes sensores é feita utilizando o filtro de Kalman, que utiliza medidas de grandezas realizadas ao longo do tempo contaminadas com ruído e outras incertezas e gera resultados que tendem a se aproximar dos valores reais das grandezas medidas.

O filtro de Kalman pode ser dividido em duas etapas: predição e atualização. A predição é chamada assim pois utiliza as medidas do acelerômetro e a estimativa do passo anterior para fazer uma previsão do estado atual, sem levar em conta a informação vinda da observação do estado atual (medida realizada pelo GPS). A etapa de atualização utiliza a estimativa realizada na predição em conjunto com as medidas do GPS para refinar a estimativa do estado.

Para utilizar o filtro de Kalman é necessário modelar o processo de acordo com a sua estrutura. Isto é feito a partir da especificação das matrizes F_k , B_k , Q_k e R_k , para cada passo de tempo k .

- F_k : Modelo de transição de estados, aplicado no estado anterior x_{k-1} .
- B_k : Modelo das entradas de controle, aplicado no vetor de entradas de controle u_k .
- Q_k : Covariância do ruído do processo.
- R_k : Covariância do ruído da observação.
- H_k : Modelo de observação.

O modelo para o filtro de Kalman assume que o estado atual no tempo k , x_k , é obtido através do estado no tempo $k - 1$, x_{k-1} , de acordo com a seguinte equação:

$$x_k = F_k x_{k-1} + B_k u_k + w_k \quad (\text{I}).$$

Para esta aplicação F , H , R e Q são constantes e os índices temporais são ignorados. A matriz Q é obtida colocando-se o acelerômetro em repouso para se fazer medidas amostrais do erro do processo e calculando o desvio-padrão das medidas para se montar a matriz. Já a matriz R é obtida a partir dos valores de precisão do GPS, encontrado no datasheet.

O estado é referente aos dados de posição e velocidade que se deseja obter, e o equacionamento destas variáveis é feito através da seguinte forma:

$$\text{Posição Final} = \text{Posição Inicial} + V \Delta t + \frac{1}{2} a \Delta t^2 \quad (\text{II}).$$

$$\text{Velocidade Final} = \text{Velocidade Inicial} + a \Delta t \quad (\text{III}).$$

Escrevendo as equações II e III na forma matricial temos algo parecido com a equação I:

$$\begin{bmatrix} P_k \\ V_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{k-1} \\ V_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,5 \Delta t^2 \\ \Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \end{bmatrix} \quad (\text{IV}).$$

$$X_k \qquad F \qquad X_{k-1} \qquad B \qquad u$$

Com isso temos os parâmetros essenciais para o filtro de Kalman, o qual os utiliza para fazer todos os cálculos de predição e atualização: predições de estado, predição da covariância, resíduo da medição, resíduo da covariância, ganho ótimo de Kalman, estado atualizado e covariância estimada.

Na Figura 11 é mostrado o diagrama da fusão dos sensores, evidenciando os processos descritos acima.

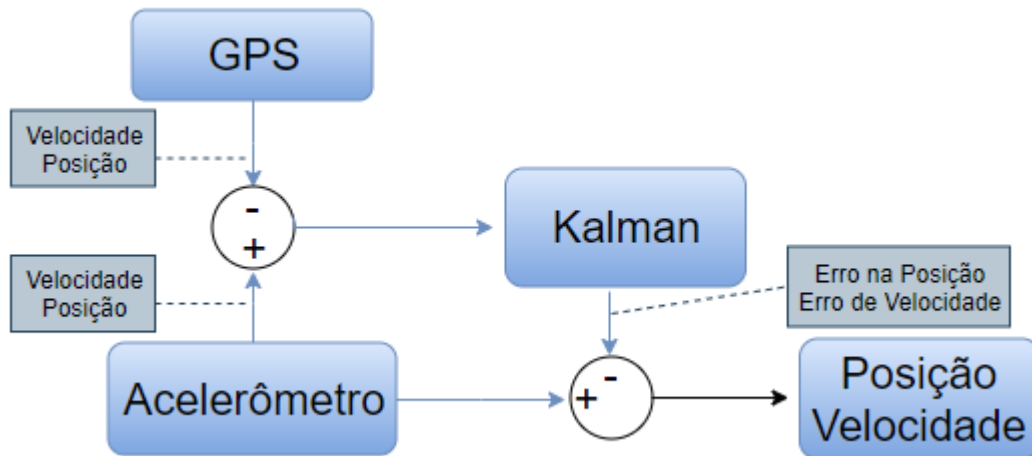


Figura 11: Esquemático do processo de fusão dos sensores GPS e acelerômetro.

2.4. Demais Componentes de Hardware

A escolha dos componentes que integram o hardware da aeronave é parte importante do projeto, deve ser levado em consideração a compatibilidade entre os itens e também a qualidade dos componentes comprados. A seguir é explicado a finalidade de cada peça e suas características.

2.4.1. Power Module

O Power Module é responsável por alimentar a APM diretamente com uma energia estável de tensão 5.37 volts e 2,25 amperes. Além de alimentar a APM o módulo de energia também fornece energia para a placa de distribuição, peça central do frame, que alimenta os 4 ESC's do quadricóptero. O modelo utilizado neste projeto é o GM v1.0, mostrado na Figura 12.

Outra característica importante do Power Module é que ele faz medições de tensão e corrente da bateria, sendo possível observar estes dados na interface do Mission Planner. A máxima tensão de entrada suportada por este módulo é 18V, tensão das baterias LiPo de 4 células, e a máxima corrente é de 90 amperes.

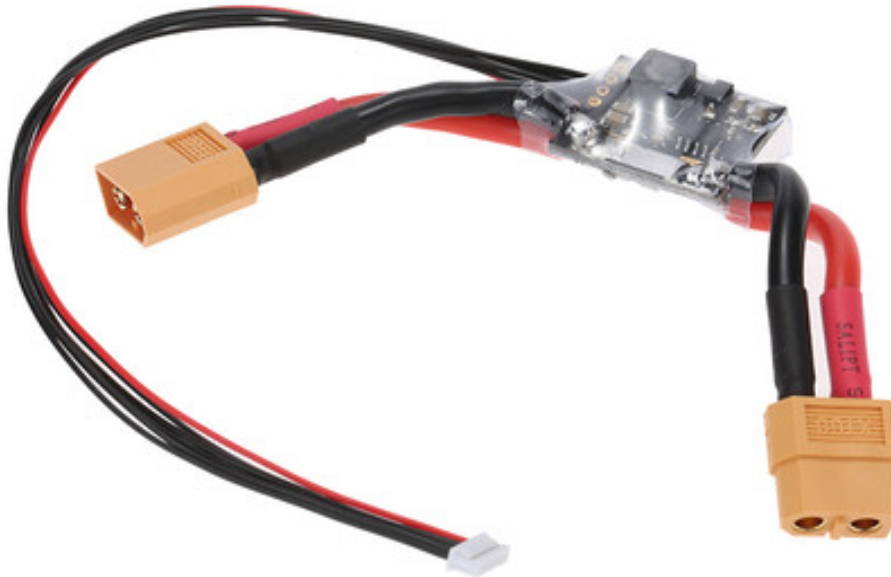


Figura 12: Power Module, GM v1.0, compatível com a APM.

2.4.2. Módulo GPS (Global Positioning System)

O GPS é um elaborado sistema de localização com o intuito de fornecer informações de posicionamento no globo terrestre, e que utiliza satélites para isso. O sistema foi criado pelo Departamento de Defesa Americano para fins militares e está em funcionamento desde 1995, mas é usado nos dias de hoje no meio civil em variadas aplicações, principalmente na aviação.

Um conjunto de 24 satélites espalhados pelo céu é o elemento principal deste sistema. Os satélites enviam constantemente sinais de rádio contendo a localização atual do satélite e o instante de tempo em que aquele pulso foi emitido, no processo chamado de trilateração, o receptor recebe as informações de ao menos 4 satélites e com estas informações realiza cálculos para determinar a sua localização.

O módulo GPS, pela sua capacidade de obter a localização em tempo real, é uma das principais peças que permitem aos veículos trafegarem autonomamente. No presente projeto é

usado o módulo Ublox M8n, Figura 13, um dos melhores presentes no mercado e um dos mais utilizados em aeromodelos atualmente. Este GPS contém bússola embutida, outro sensor essencial ao voo autônomo, e é totalmente compatível com a plataforma da APM. Outra vantagem é que este módulo pode ser adquirido juntamente com uma haste de sustentação, garantindo que a peça fique longe dos motores e muito bem estruturada.



Figura 13: Módulo de GPS Ublox M8n, um dos mais utilizados no aeromodelismo.

Analisando-se o datasheet do dispositivo, é possível encontrar a precisão dele para medidas de velocidade e posição no eixo horizontal, que são, respectivamente, 0,05 m/s e 2,5 m.

2.4.3. Telemetria

A telemetria permite a comunicação de dados do Drone, durante o voo, para uma base no solo. As informações transmitidas são diversas, como a inclinação dos eixos da aeronave, tensão

e corrente da bateria, força do sinal do rádio controle e informações de outros sensores que podem ser acoplados à APM.

O kit de telemetria de rádio 3DR, Figura 14, tem grande compatibilidade com a APM, sendo possível configurar o módulo inteiramente dentro do Mission Planner. Este kit de telemetria veio como opção aos módulos XBEEs de rádio, oferecendo preço mais baixo e melhor performance na aplicação de telemetria em Drones.

As características deste kit são:

- Potência de transmissão de até 20dBm
- Compatibilidade com MAVLink
- Alcance máximo de 2,5 km
- Firmware Open Source
- Baseado no módulo de rádio da HopeRF HM-TRP, que utiliza um microcontrolador SiLabs Si1000 RF.



Figura 14: Kit de telemetria da 3DR de 433MHz, a esquerda placa serial e a direita placa USB.

2.4.4. Controlador Eletrônico de Velocidade

É o controlador de velocidade para os motores do quadricóptero, que dependendo dos parâmetros recebidos do controle remoto e dos dados dos sensores giroscópio e acelerômetro executará uma mudança de velocidade dos motores. A programação feita nestes componentes é que irão determinar todos os movimentos do drone, inclusive no controle de estabilidade. O controle é feito a partir de uma tecnologia conhecida como Modulação por Largura de Pulso, no inglês Pulse-Width Modulation (PWM), que utiliza um conjunto de transistores ligados e desligados para determinar a quantidade de energia a ser enviada para o motor (mantendo a mesma frequência de pulsos).

O ESC escolhido para o projeto é o Hobbysky Simonk 30A, Figura 15, pois este atende todos os requisitos do motor utilizado. O modelo do controlador de corrente para motores multirotor em questão funciona com o firmware Simonk, que comparado a outros ESC's comuns oferece uma resposta mais rápida. Por ser de fácil manuseio este controlador de velocidade é um dos mais populares do mercado, contendo vários materiais de apoio sobre o mesmo. O oscilador de cristal contido, permite uma maior precisão, além de fazer com que a escala PWM não seja afetada pelo excesso de calor, como ocorre com ESC's de menor qualidade.



Figura 15: Controlador de velocidade Hobbysky Simonk 30.

2.4.5. Rádio Controle

Para que ocorra o controle remoto do drone, precisa-se de um transmissor de comandos, tanto quanto de um receptor desses comandos. Abaixo, segue a tabela comparativa de preços dos rádio-controles mais populares:

Tabela 1: Dados comparativos entre os rádio-controles mais comumente utilizados.

Modelo	Processador	Clock do Processador	Valor (R\$)
FlySky TH9X	8 bits	16 MHz	256.21
RadioLink AT-9	32 bits	72 MHz	288.24
FlySky FS-i6S	32 bits	48 MHz	192.15
FlySky FS-i6	32 bits	48 Mhz	138

Para atender aos requisitos de projeto, o modelo FlySky FS-i6 foi escolhido, Figura 16, possui processador e frequência de clocks satisfatórias e aplicáveis ao projeto, tanto quanto pela relação custo-benefício, este rádio tem alcance de até 1,6 km horizontal e 300 metros na vertical.



Figura 16: Rádio Controle FS-i6.

2.4.6. Estrutura

A peça que determina as características principais da estrutura do drone é chamada de frame. A partir de suas informações conhecemos a distância entre os braços, e as características do material nos dá informações sobre resistência, peso e vibração da estrutura.

Optou-se para o projeto pela utilização de um frame comercial para compor a estrutura do drone. O frame em questão, modelo F450, é o mesmo utilizado em modelos de drones da marca Phantom, portanto tem a garantia de ser de boa qualidade e funcional, o que ajuda bastante na montagem do quadricóptero e na qualidade do voo.

Este modelo, mostrado na Figura 17, traz algumas vantagens, a placa central tem 2 funções, ela dá rigidez ao drone e também conduz a eletricidade necessária para todos os componentes eletrônicos, assim, minimizando o número de fios. O material que constitui os braços é de plástico PA66 30GF, resistente e minimiza as vibrações. A distância entre eixos é de 450mm e o peso é de 282g.



Figura 17: Frame F450.

2.4.7. Motores

Em projetos de aeromodelismo os motores do tipo brushless são os mais utilizados, este são rotores sem escovas e tem alta rotação e grande força de propulsão.

O motor realiza a força necessária para voo, portanto, a escolha deste deve ser muito nem analisada. Contudo, não se pode estimar a propulsão necessária sem saber, por exemplo, o peso total da aeronave. Portanto, a escolha dos motores segue um padrão de previsão.

Para se obter um parâmetro de segurança e o bom funcionamento do motor, utiliza-se a seguinte fórmula:

$$\frac{2P}{n} = E_{px} \quad (\text{V}).$$

Onde:

E_{px} = Empuxo necessário para cada motor

P= peso total sem os motores.

n= número de motores

A partir do peso total do Drone estimado anteriormente, aproximadamente 1.3 kg, foi escolhido o motor brushless, de modelo 2212, com capacidade de realizar 920 rpm/V, Figura 18. Este tem diâmetro de 22 mm e altura de 12 mm e é um dos modelos mais utilizados para a fabricação de quadricópteros.



Figura 18: Motor brushless 920kv.

Na Tabela 2 é apresentado dados de consumo e empuxo, utilizando o tipo de bateria e hélice escolhidas para o projeto, em diferentes potências de throttle.

Tabela 2: Consumo do motor de 920kv.

Throttle	Corrente (A)	Potência (W)	Thrust (g)
50%	1.8	20	230
75%	3.9	43.3	410
100%	5.5	84.4	610

2.4.8. Hélices

A função de uma hélice ou qualquer outro dispositivo de propulsão é gerar tração ao longo de seu eixo axial. A tração é produzida deslocando-se o ar para baixo das hélices. (BARROS, Alexandre Bernardes, 2009). O princípio básico de funcionamento de uma hélice é fornecer ao ar que passa através dela certa quantidade de movimento, aproveitando a reação gerada para acelerar um corpo contra o deslocamento de ar. (VIOLATO *et al* 2006).

Em conformidade com a direção de rotação, as hélices são construídas de acordo com o padrão: CW (*clockwise*) rodam em sentido horário e CWW (*counterclockwise*) giram em sentido anti-horário.

Levando em consideração os motores escolhidos anteriormente, para o nosso projeto, decidiu-se utilizar as hélices DJI 9443, estas são de duas pás, de ótima qualidade e com grande compatibilidade com o motor, Figura 19.



Figura 19: Par de hélices DJI 9443.

2.4.9. Bateria

As baterias do tipo LiPo (polímero de lítio) são as mais usadas para esse propósito por conseguirem segurar uma maior densidade de energia comparada com as baterias de níquel, oferecendo uma maior duração de carga e um peso menor, o que é essencial. Ela pode também ser carregada sempre que necessário. A maioria das baterias deste tipo, usa uma carga rápida para carregar o seu equipamento a 80% da capacidade da bateria e então muda para carga lenta. A bateria irá alimentar tanto os ESC's quanto o arduíno.

A partir da escolha do motor e da análise de desempenho, optamos pela bateria Power Lipo 5200 mAh 3s, que fornecerá uma tensão de 11,1 V para o sistema, Figura 20.



Figura 20: Bateria de lítio da marca Tattu utilizada no projeto.

3. Metodologia

A realização do projeto foi feita de forma sistemática em 5 etapas, a fim de obter uma metodologia que possa ser seguida para a sua realização. As etapas, em sequência, são:

- Levantamento de variáveis e requisitos;
- Tomada de decisões;
- Construção;
- Testes dos requisitos;
- Validação do projeto.

Cada uma dessas etapas tem o objetivo de organizar as ideias e tarefas para tornar o projeto possível, e devem ser seguidas de forma metódica para se obter os resultados esperados.

3.1. Levantamento de Variáveis e Requisitos

Esta etapa constitui no levantamento de produtos necessários para compra, erros que podem ser cometidos no processo de construção e requisitos em geral que o projeto precise. Estas informações foram obtidas com muita pesquisa, aqui temos outro ponto positivo em trabalhar com a plataforma Ardupilot, por ter seu software livre, existe uma comunidade grande que desenvolve em cima da plataforma, permitindo que possamos levantar os dados necessários.

Na própria página da APM é possível encontrar o seu software, neste trabalho é feito um estudo sobre os modos de voo que permitem ao quadricóptero realizar o voo autônomo.

3.2. Tomada de Decisões

Após conhecer todos os pontos de trabalho é possível se tomar as decisões necessárias para o projeto começar a sair do papel.

Com as pesquisas feitas, foi feita a escolha dos componentes que melhor se adaptam ao projeto, mas sempre levando em consideração o custo das peças. No capítulo 2 é apresentado todos os componentes escolhidos e as suas especificações.

Nesta etapa foi escolhido realizar o projeto com a plataforma da APM, pelas vantagens já citadas, e a escolha pela versão 2.8, uma das mais recentes. Com isso, foi adquirido um kit com vários dos componentes necessários para o projeto, contendo a controladora APM 2.8, Power Module, módulo GPS, telemetria e todos os cabos para conexão.

3.3. Desenvolvimento do Protótipo

Com todos os equipamentos necessários em mãos iniciou-se a etapa de construção. Nesta etapa começamos a colocar os conhecimentos em prática para a realização do projeto.

No processo de construção podemos destacar:

- Soldas da placa central: Aqui é feitas as principais conexões de alimentação, a ligação dos 4 ESC's na placa central do Drone e o Power Module, através de solda.
- Disposição dos sensores: Nesta parte é feita a distribuição dos sensores, atuadores e outros dispositivos utilizados no Drone, levando em conta a proximidade de sua conexão com a placa controladora de voo e o balanceamento de peso do veículo. Aqui é finalizada a montagem do hardware.
- Calibração para voo remoto: Com a finalização de montagem do hardware é feito a última etapa para que quadricóptero possa voar de forma remota, a calibração de sensores e o download do firmware de voo na placa APM.

Ainda na etapa de desenvolvimento é feita a análise dos modos de voo essenciais para o voo autônomo, onde é feito um estudo sobre os algoritmos usados pela controladora APM. O detalhamento do código será mostrado na seção de Resultados.

3.4. Testes de Requisitos

Após a etapa de construção já é possível que o Drone seja capaz de voar, mas ainda não é segura realizar testes de missões autônomas. Nesta etapa são realizados testes, com o intuito de aferir se a aeronave cumpre os requisitos do voo autônomo, responder corretamente aos comandos dos modos de voo básicos.

Portanto, também é uma atividade dessa etapa corrigir as falhas de requisito. Se é observado algum problema no quadricóptero, quando um modo de voo é acionado, é necessário ajustar parâmetros da aeronave para que apresente as características necessárias de voo.

3.5. Validação do Projeto

Com todos os requisitos necessários para o voo autônomo atingidos é feita a validação do projeto, que consiste na criação de missões autônomas.

Nesta etapa são programadas variadas missões autônomas com o aplicativo do Mission Planner em um área aberta e com sinal de GPS. São realizadas missões com diferentes formatos geométricos e com diferentes orientações da frente do Drone, assim, validando o projeto.

4. Resultados

4.1. Teste de Empuxo

Como apresentado na Seção 2.4.7, que fala sobre os motores, o empuxo necessário para realização do voo, proveniente de cada motor, pode ser calculado a partir da Equação V. De acordo com esta equação, o empuxo depende do peso total da estrutura sem os motores e do número de motores presentes na estrutura, quatro para o quadricóptero.

Na Tabela 3 é apresentado a massa dos componentes que compõem a aeronave e o seu total, 1206g. Sem os motores o peso do drone é de 1014g, realizando os cálculos, o empuxo para cada motor deve ser de 507g para um bom voo.

Tabela 3: Peso total do Drone.

Peça	Quantidade	Peso Estimado
Bateria	1	358g
Frame	1	282g
Motor	4	192g
Hélices	4	45,6g
ESC's	4	100g
GPS	1	32g
Ardupilot	1	30g
Receptor de rádio	1	6.4g
Telemetria	1	40g

Power Module	1	20g
Outros	1	100g
TOTAL	-	1206g

A partir de testes de empuxo, é possível determinar experimentalmente qual o empuxo de cada motor e realizar uma comparação com a teoria. O teste consiste na montagem de uma estrutura, conforme mostrado na Figura 21, e é um teste de empuxo estático, pois a medição é feita com o conjunto parado. Mesmo não sendo uma medida de grande precisão, esses testes fornecem uma aproximação da capacidade de cada motor.

Os quatro motores foram testados individualmente, estando estes alimentados por uma bateria de 5200 mAh e, para controlar a velocidade dos motores, foi utilizado um servo teste no bec de entrada do ESC.

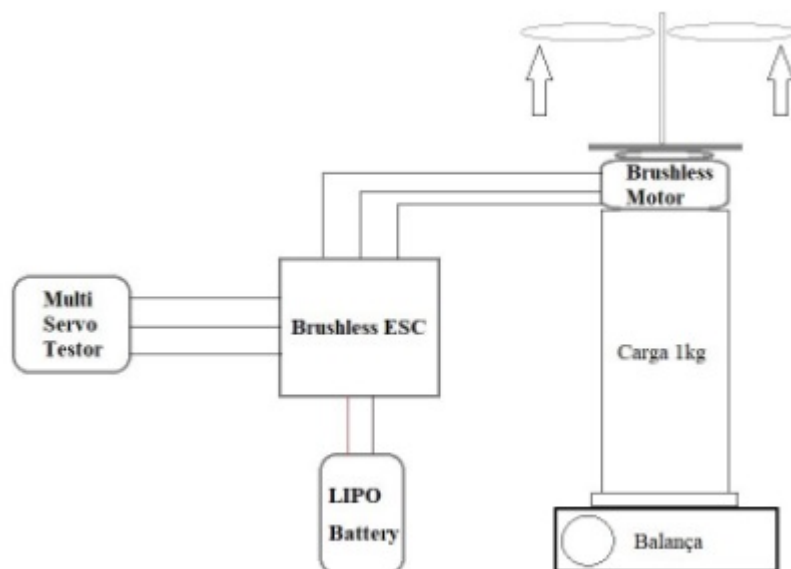


Figura 21: Esquemático do Teste de Empuxo

Ao acionar o motor, uma força vertical é produzida pela rotação das hélices e essa força tende a levantar o sistema de carga de 1 kg. Com isso, é possível medir o empuxo a partir da

massa apresentada na balança que é o quanto o sistema pesa menos o quanto conseguiu levantar da carga utilizada, o teste foi realizado com uma garrafa contendo 1 litro de água, que equivale a 1 kg, presente na Figura 22. Após o motor ligado, quando acelerado pelo potenciômetro, a hélice tentou levantar o sistema todo, marcando a força de empuxo.



Figura 22: Teste de Empuxo

Os resultados obtidos para cada um dos quatro motores, que irão compor o quadricóptero, no teste de empuxo, estão presente na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados do teste de empuxo

Motores	Empuxo
Motor Horário (2)	548 gramas
Motor Horário (4)	545 gramas
Motor Anti-horário (1)	538 gramas

Motor Anti-horário (3)	542 gramas
------------------------	------------

Realizando uma comparação entre os valores presentes na Tabela 4 e o valor teórico de empuxo necessário para cada motor, 507 gramas, constatou-se que o conjunto motor-hélice escolhido aplica-se de forma satisfatória ao projeto.

4.2. Autonomia do Drone

Quando se é construído um veículo movido a energia elétrica é fundamental saber a autonomia que ele terá em pleno funcionamento. Temos uma grande desvantagem dos veículos elétricos quando comparamos com aos veículos movidos a combustíveis tradicionais, quando comparamos a autonomia, por isso estes ainda comandam o mercado e a necessidade de se ter dados de autonomia.

O primeiro passo realizado para calcular a autonomia da aeronave é descobrir a carga que a bateria fornece, como descrito na seção 2.4.9 5,2 Ah.

A segunda etapa consiste em estimar o consumo do quadricóptero em pleno funcionamento. A estimativa é feita pegando o consumo dos itens que são os responsáveis pela grande maioria do consumo total. Também é levado em conta o consumo do motor com o throttle a 75%, dado presente na Tabela 2. Os dados são:

- Motor: 3.9A.
- Telemetria: 100mA
- GPS: 23mA.

O total de corrente consumida, portanto, é:

$$C = 4 \times (3.9) + 0.1 + 0.023 = 15.723 \text{ A}$$

Com isso já é possível calcular a autonomia do Drone:

$$T = 60 \times (5.2/15.723) = 19.84 \text{ minutos}$$

4.3. Fabricação do Hardware

A primeira passo para construir o hardware do projeto consiste na montagem da base do frame, onde são feitas várias soldagem na placa de distribuição de energia do Drone, a peça central do frame F450.

Essas soldas são as principais conexões de energia, responsáveis por alimentar todo o veículo. A primeira solda corresponde em realizar a conexão dos pólos positivo e negativo do Power Module com a placa, isso torna possível plugar a bateria e distribuir a energia por todo o sistema. As outras soldas são as conexões dos 4 ESC's, onde entrará a energia responsável por alimentar os motores. Na Figura 23 é mostrado o resultado deste trabalho inicial, é possível aferir se foi feito corretamente ao se conectar a bateria e verificar se está chegando a tensão correta de 11,1V nos ESC's, e se a saídas dos becs apontam 5V.

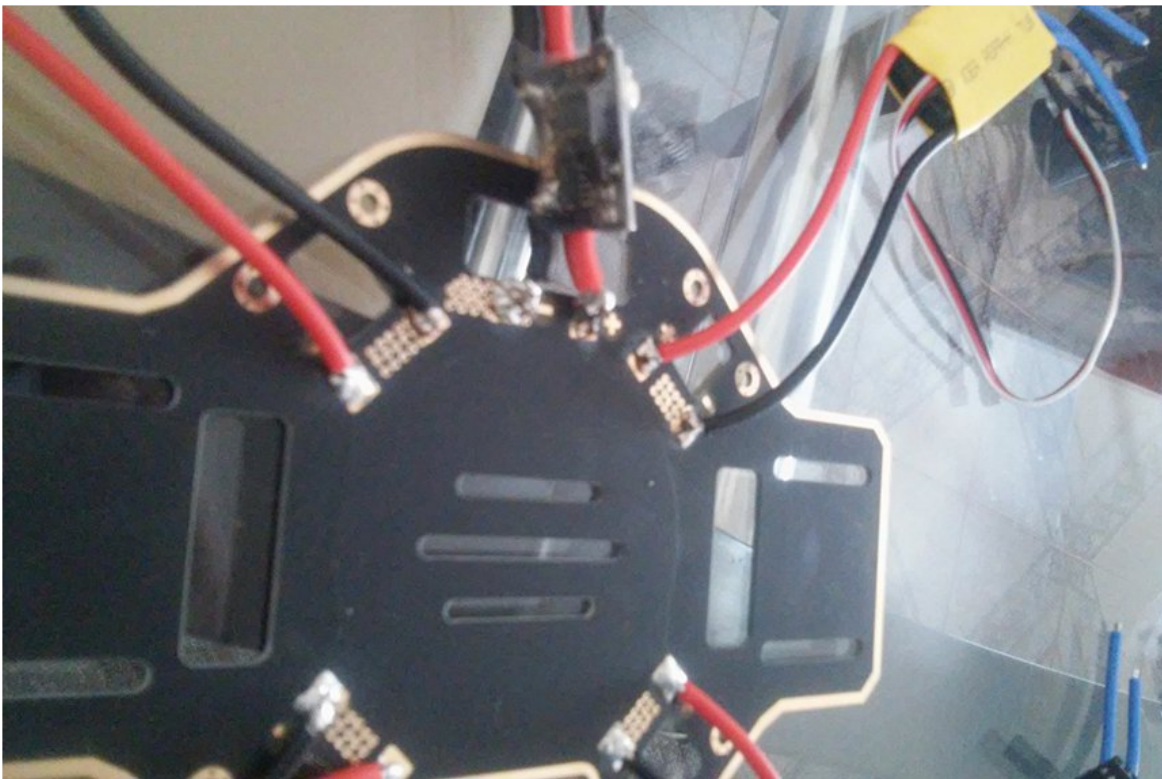


Figura 23: Soldas realizadas na placa central do frame.

É indispensável, após feitas as soldas, isolar os contatos de energia da placa distribuição. Estes contatos podem causar acidentes com quem irá manusear o veículo e podem gerar um curto sobre algum componente, danificando-o e comprometendo todo o Drone. O isolamento foi feito passando cola quente sobre todos os pontos onde há abertura desses contatos.

O próximo passo é montar os braços do drone, estes são parafusados à placa central com pequenos parafusos. Com isso conseguimos também parafusar cada motor em seu devido braço, os motores que irão girar em sentido anti-horário, rosca prata, ficam no braço direito superior e esquerdo inferior. Os motores horários no esquerdo superior e no direito inferior. O drone com os braços parafusados podem ser vistos na Figura 24.



Figura 24: Base do frame montado com motores.

Também nos braços, os ESC's são amarrados com o objetivo de aproximar o contato com os motores e deixando cada ESC bem preso à estrutura. Com isso, toda a base foi montada, sendo necessário alocar os demais componentes sobre a estrutura do Drone. Este passo leva em conta o peso dos componentes e são distribuídos de forma que o centro de massa do veículo não fuja do centro geométrico da estrutura. Deve-se levar em conta ainda os seguintes requisitos:

- A controladora de voo deve ficar no centro da estrutura.
- Os componentes devem ficar próximos com os seus conectores na placa controladora.
- O módulo de GPS deve ter a sua frente junto a frente do Drone.
- As antenas do receptor de rádio e de telemetria devem ficar longe do alcance das hélices.
- Tudo deve estar bem preso à estrutura, inclusive cabos e fios de conexão.

O resultado final da montagem pode ser visto na Figura 25, onde é possível verificar que a montagem foi realizada de maneira bem compacta, sem fios soltos, melhorando a aerodinâmica e prevenindo a ocorrência de falhas.



Figura 25: Drone completo após montagem.

4.4. Calibrações Iniciais

A primeira etapa de calibração é feita através do aplicativo Mission Planner, onde o programa irá pedir sequências de instruções a serem realizadas. Utilizando um cabo USB é feita a conexão da placa APM com o computador que contém o aplicativo, permitindo que se comuniquem.

Dentro do programa é selecionado o tipo de veículo, multicóptero, e a sua estrutura de motores, quadricóptero em “X”. Após isso o usuário deve seguir as seguintes etapas:

- Calibração da IMU (Unidade de Medição Inercial): Nesta etapa os principais sensores de voo são calibrados (giroscópio, acelerômetro e barômetro), responsáveis pelas medidas de inclinações do Drone e variação da altura. Para executar esta tarefa o drone deve estar em uma superfície reta onde o programa irá solicitar que:
 - O veículo seja inclinado 90° para esquerda;
 - O veículo seja inclinado 90° para direita;
 - O veículo seja inclinado 90° para frente;
 - O veículo seja inclinado 90° para trás;
 - O veículo seja inclinado de cabeça para baixo.
- Calibração da bússola: A bússola é um sensor essencial para o voo autônomo, ele mostra a orientação do prumo do veículo em relação à Terra. A calibração deste sensor é feita apontando o veículo para o norte geográfico e girando cada um dos eixos do quadricóptero em formato de “∞”.
- Calibração do rádio controle: Este passo consiste em pegar os sinais extremos de cada canal do controle remoto. Isso é feito movendo todos as chaves e sticks em seus pontos máximos e mínimos.

As tarefas realizadas anteriormente são as configurações iniciais do Drone, mas para o veículo estar pronto para voar ainda é necessário alguns outros ajustes. A seguir são descritas outras calibrações e ajustes básicos de sensores necessários para o projeto:

- ESC's: A calibração destes controladores faz com que os 4 motores girem na mesma velocidade em resposta aos sticks do controle remoto. O procedimento de calibração consiste em uma sequência de procedimentos com inicialização pré-programada, ativada quando a entrada PWM recebe um sinal alto na inicialização do ESC. Portanto, para executar a calibração deve ser feitas as seguintes etapas:
 - Desconectar o cabo USB e qualquer fonte de energia do Drone.
 - Ligar o rádio controle e colocar o stick do throttle no alto.
 - Ligar a bateria, os ESC's serão ligados e apitarão de 2 em 2 segundos (aqui a calibração é inicializada).
 - Desconectar a bateria.
 - Conectar a bateria novamente, ainda com o stick no alto.
 - Os ESC's apitarão 2 vezes em sequência, sinalizando que o stick deve ser abaixado para o mínimo.
 - Os ESC's apitarão mais 3 vezes em sequência, sinalizando o final do procedimento. Pode ser verificado se ocorreu tudo corretamente movendo o stick do throttle e observando o comportamento igual dos motores.
- Motores: Quanto aos motores, deve ser aferido se a rotação de cada um deles condiz com a rotação esperada para a sua posição no Drone. Se algum apresentar rotação incorreta deve-se inverter a conexão de 2 dos 3 cabos com o ESC. O resultado deve ter os 4 motores girando nos sentidos mostrados na Figura 8.
- Power Module: Sensor que calcula a tensão da bateria restante. Para calibrar este sensor é usado o software da APM, bastando medir a tensão atual da bateria e a sua capacidade de carga em mAh, de modo que os pontos de máximo e mínimo do sensor irá ser calibrado.
- Barômetro: As medidas da altura atual do Drone são feitas a partir deste sensor, e a calibração é feita juntamente com o acelerômetro. Um problema a ser corrigido nesse sensor é a sua sensibilidade à luz e pressão, sendo necessário colocar uma espuma escura sobre este sensor, que é interno na APM, para proteger destes efeitos.
- GPS: Este sensor deve ser montado de tal forma que a sua frente coincida com a frente do drone, porém o chip interno deste módulo muitas vezes vem soldado de cabeça para baixo,

isso resulta em uma defasagem de 180° que deve ser corrigida em software. Devidamente calibrado, a posição do drone será calculada a todo momento em coordenadas de latitude e longitude.

4.5. Configurações avançadas

Com todas as etapas anteriores realizadas já é possível fazer voos com o Drone de forma remota, porém é necessário fazer diversos ajustes para conseguir realizar um voo autônomo.

Imperfeições durante o voo, como o Drone pender para um lado e resposta lentas ou ineficientes do veículo, podem ser corrigidos com configurações feitas pelo rádio controle e pelo Mission Planner. Este ajustes são fundamentais para o voo autônomo, pois estas imperfeições podem gerar erros tão grande para o controle autônomo que o Drone pode simplesmente perder o controle. O intuito dos procedimentos descritos a seguir é encontrar os melhores valores dos parâmetros de voo, como os controles PID, que fazem com que o Drone responda da melhor maneira possível.

4.5.1. Save Trim

Quando a aeronave está pendendo para um dos lados, para frente ou para trás, mesmo quando não há nenhum controle dado pelo piloto, e não há interferência de vento, é necessário corrigir isto. Trimagem é o termo usado para se referir ao ajuste feito para balancear o voo do veículo aéreo.

Há várias maneiras de se fazer o trim de uma aeronave, mas uma das mais eficientes de se fazê-lo é diretamente pelo rádio controle através dos botões de trim. Este processo é feito ajustando a potência entregue aos motores a partir de botões do controle remoto, há um botão para cada eixo do Drone, como mostrado na Figura 26.

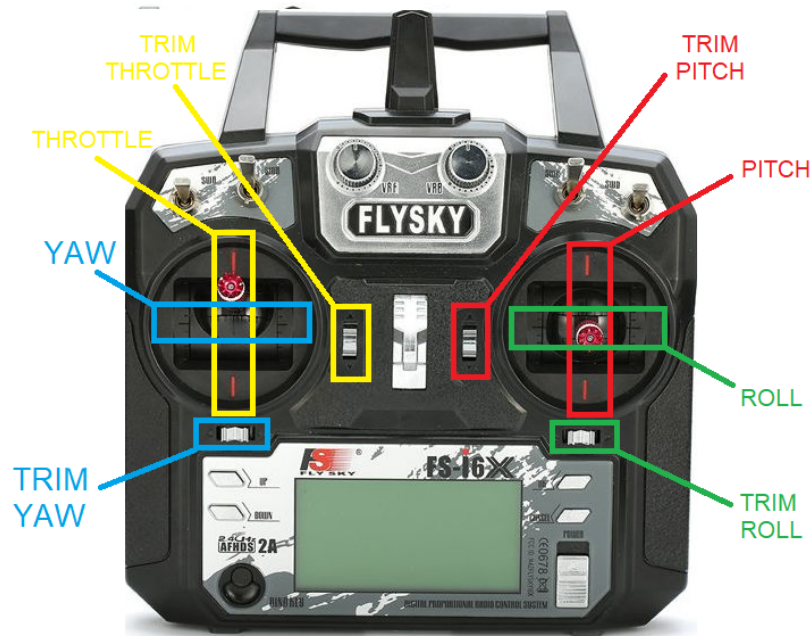


Figura 26: Botões de trim no FlySky FS-I6

Como o projeto objetiva o voo controlado autonomamente, o processo de trimagem não pode depender das configurações presentes no controle, sendo necessário portanto passar os dados ajustados para o firmware da APM. O Mission Planner permite que os parâmetros de trim do rádio controle sejam salvos na controladora de voo, basta programar uma chave no próprio controle para receber a função de “Save Trim”.

Foi feito, portanto, para o projeto, as seguintes etapas de ajuste de trim:

- O processo deve ser feito em um local sem vento, sem obstáculos e onde o Drone possa voar em baixa altitude.
- O veículo é colocado em sua área de decolagem, que deve ser o mais plano possível.
- A bateria
- é ligada e espera-se a luzes da APM assinalarem que o Drone pode ser armado.
- As hélices são colocadas e o Drone é armado.
- Aqui é dada potência aos poucos aos motores do Drone elevando o throttle, deve-se observar se o veículo já tende a sair para alguma direção, mesmo antes de alçar voo.

- Se o Drone estiver notoriamente tendendo para algum lado já é possível ajustar o trim, deve-se mover o trim para o lado contrário ao movimento, ou seja, se o veículo estiver indo para frente o ajuste é feito movendo o trim do pitch para baixo, e se o veículo estiver indo para direita o botão de trim do roll deve ser movido para a esquerda. Isto é feito até que o movimento seja corrigido.
- O throttle é elevado até o veículo sair do chão e planar. Uma vez no ar o piloto deve tentar estabilizar o Drone com o intuito de pará-lo no ar.
- É observado se há uma tendência do Drone se mover em uma determinada direção, se isso ocorrer os botões de trim são ajustado para corrigir este problema, como explicado anteriormente.
- Sempre são repetidas as ações de estabilizar o Drone, com o intuito de pará-lo no ar, observar se ainda é apresentado alguma tendência de movimento horizontal e de correção do trim, até que o Drone esteja devidamente balanceado.
- Uma vez que o Drone consiga se manter inerte sem interferência do piloto, é feito o pouso do veículo.
- O Drone é desarmado e o botão de Save Trim é acionado, jogando para o firmware os parâmetro ajustados.
- Os botões de trim devem ser centralizados novamente, encerrando o processo de trimagem.

4.5.2. Auto Tune

O Auto Tune é mais uma das ferramentas da APM que permite um ajuste fino dos parâmetros de voo. Esta configuração encontra os melhores parâmetro de controle PID para os movimentos de pitch e roll.

Assim como o Save Trim, o comando do Auto Tune deve ser programado em uma das chaves do rádio controle. Neste processo o Drone irá fazer manobras automáticas com o intuito de obter dados sobre o seu controle PID, permitindo encontrar os parâmetros ideais para o veículo.

Portanto, este processo deve ser ativado quando o Drone está em voo e com a bateria totalmente carregada. Este processo demora entre 5 e 8 minutos, quando o Drone para de executar manobras. Após a conclusão o Drone deve ser pousado.

4.6. Análise dos Modos de voo

Para que o veículo aéreo seja capaz de voar autonomamente é necessário que este seja capaz de realizar o controle de sua atitude, altitude e de sua posição. O controle de atitude é realizado em qualquer modo de voo que seja e é baseado nos controles de parâmetros PID (Proportional, Integral and Derivate) dos eixos de Pitch e Roll.

No entanto, existem modos de voo específicos para o controle de altitude e de posição, sendo assim, o Modo Automático é uma incorporação destes dois e qualquer um dos três modos, controle de altitude, posição ou automático, são acionados a partir do controle remoto ou da estação de controle.

As variáveis necessárias para o controle são adquiridas pela unidade inercial da APM, a MPU6000, que são as medidas angulares de onde o drone se encontra. O papel do controlador PID é modelar a ação do controle, operando sobre o sinal de erro. Este é a diferença entre o ângulo que se deseja e o ângulo que foi medido, dessa forma, o controle de ângulo em malha fechada para cada eixo do quadrirotor baseia-se no sinal de erro. O controle do ângulo está esquematizado na Figura 27.

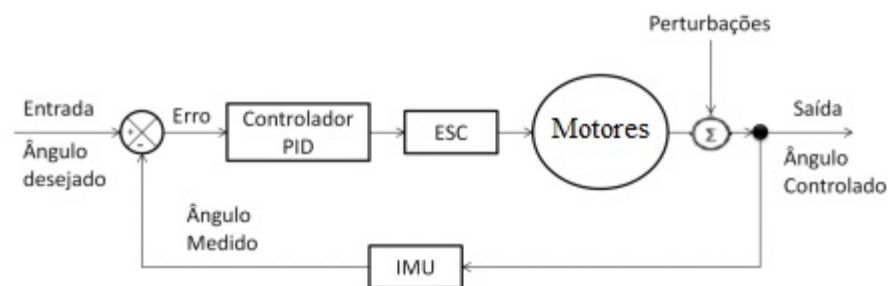


Figura 27: Esquema do funcionamento do controle PID no controle de atitude.

O sinal contínuo de erro na entrada do controlador é amostrado e convertido em sinais digitais, enquanto a saída do controlador é convertida num sinal analógico contínuo alimentando o processo. As entradas do controlador são as posições calculadas pelo código responsável e os valores medidos pelos sensores e a saída do controlador contém os valores ajustados dos ângulos.

Como é possível perceber na Figura 28, a saída do controlador PID é uma combinação de três ações e cada uma reage de forma distinta ao erro presente nos sistemas, de forma que o controle proporcional ajusta a variável de controle de forma proporcional ao erro multiplicado por um ganho KP, o controle integral ajusta a variável de controle baseando-se no tempo em que o erro acontece multiplicado por um ganho KI e o controle derivativo ajusta a variável de controle tendo como base a taxa de variação do erro multiplicado por um ganho KD.

$$u(t) = Kp * e(t) + \frac{Kp}{Ti} \int e(t)dt + Kp Td * \frac{d e(t)}{dt}$$

Figura 28: Descrição matemática do controle PID.

4.6.1. Modos de Voo Simples

Nos modos de voo simples não há controle de posição do drone e nem de rotas, todo o controle autônomo é baseado em medidas inerciais do drone e na mudança de altitude detectada pelo barômetro. Portanto, para os modos de voo Stabilize e AltHold o GPS não é necessário, essa dependência, ou não, do GPS é que difere o modo de voo ser simples ou complexo.

Na Figura 29 abaixo é mostrado, em forma de diagrama, o caminho percorrido em código para os modos de voo simples, quando o piloto entra com um comando no controle remoto até a resposta de saída no sinal PWM. Todas as tarefas do diagrama são chamadas em um ciclo de 100Hz.

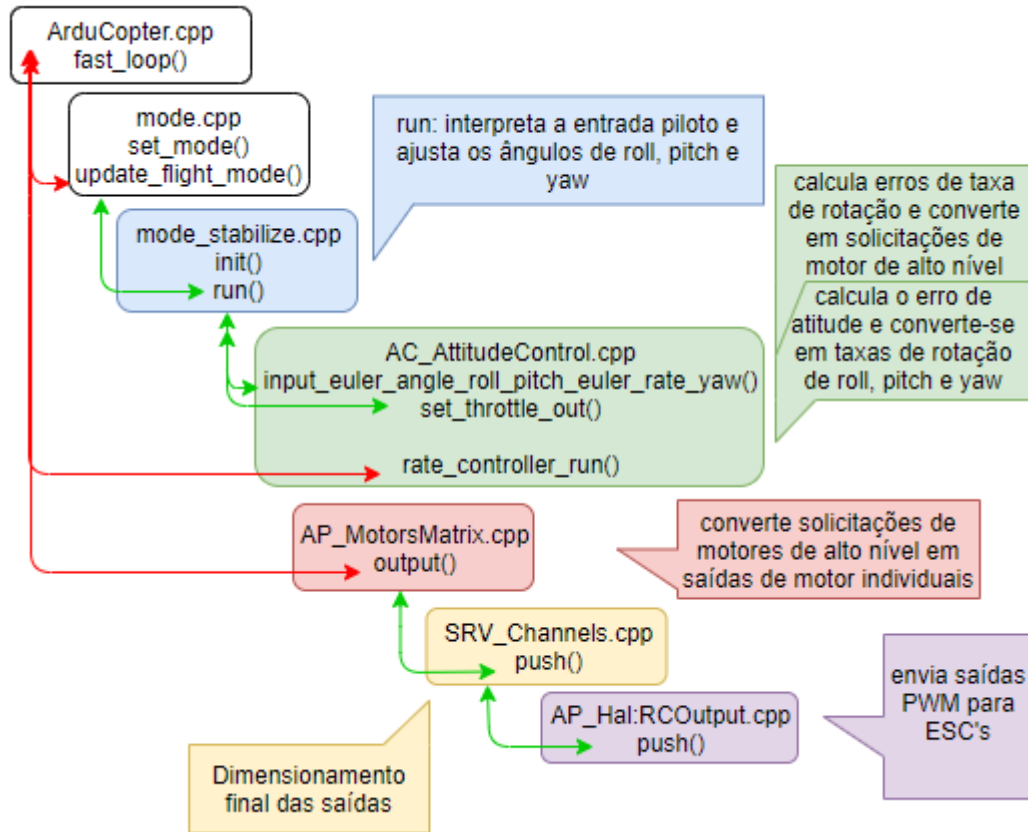


Figura 29: Arquitetura comum utilizada nos modos simples.

Através do diagrama vemos todo o protocolo de chamada de bibliotecas e funções da controladora de voo para multirotores, e essa arquitetura é a mesma para todos os modos de voo simples. A seguir é descrito todo este protocolo utilizando o modo Stabilize como exemplo, mas também aplica-se ao modo AltHold e todos os demais simples.

- A função “update_flight_mode()” que pertence à mode.cpp é chamada. Esta função verifica o modo de voo do veículo, isto é, a variável “control_mode”, que depende da chave seletora do modo de voo do rádio controle. Posteriormente é chamada a função que possui o modo de voo apropriado, nesse caso o “stabilize_run”. A função “stabilize_run()” pode ser encontrada no arquivo “control_stabilize.cpp” anexo tal.

- A função `stabilize_run` é responsável por converter a entrada do usuário (localizada em `g.rc_1.control_in`, `g.rc_2.control_in`, etc) em um ângulo de inclinação, taxa de rotação e taxa de subida. Por exemplo, converte a entrada de roll e pitch do usuário para ângulos de inclinação em graus, a entrada de yaw é convertida em uma taxa de rotação em graus por segundo e a entrada de aceleração é convertida em uma taxa de subida em centímetros por segundo.
- a última coisa que a função `stabilize_run` deve fazer é passar esses ângulos e taxas desejados para a bibliotecas Controle de Atitude, mantida na pasta “AC_AttitudeControl”.
- A biblioteca “AC_AttitudeControl” fornece 5 maneiras possíveis de controlar a atitude do veículo, sendo as mais comuns 3 descritas abaixo.
 - `angle_ef_roll_pitch_rate_ef_yaw()`: essa situação aceita ângulos diretos para o roll e para o pitch, mas para o yaw aceita apenas uma taxa de mudança. Por exemplo, receber entradas de roll = -1000, pitch = -1500 e yaw = 500 significa inclinar o veículo para 10 graus, avançar para 15 graus e girar à direita em 5 graus/segundo, tendo como referência a Terra, ou seja, os graus são de acordo com o norte desta.
 - `angle_ef_roll_pitch_yaw ()`: essa maneira aceita ângulos diretos para roll, pitch e yaw. Como é possível perceber, a entrada do yaw não significará mais uma taxa e sim um ângulo direto, diferente da situação anterior. Portanto para entrada de yaw = 500, nessa situação, significará um giro de 5 graus a leste do norte do veículo, tendo como referência a Terra, ou seja, os graus são de acordo com o norte geográfico.
 - `rate_bf_roll_pitch_yaw ()`: nesta forma todas as entradas aceitas são taxas em graus por segundo, tanto para pitch, como para yaw e roll. Porém, a referência neste método não é mais a Terra, passando a ser o próprio frame, ou seja, a própria estrutura do veículo. Por exemplo, fornecendo para esta função roll = -1000, pitch = -1500, yaw = 500 o veículo rodará para a esquerda a 10 graus por segundo, inclinará a frente para baixos em

15 graus por segundo e girará em torno do seu próprio eixo z a 5 graus por segundo.

Após qualquer chamada para essas funções, a função `rate_controller_run()` da “AC_AttitudeControl.cpp” é chamada. Ela converte a saída dos métodos listados acima em entradas roll, pitch e yaw que são enviadas para a biblioteca “AP_Motors” através das funções “set_roll, set_pitch”, “set_yaw” e “set_throttle”.

- A biblioteca “AP_Motors” contém o código “AP_MotorsMatrix”. Esse código é responsável por converter os valores de roll, pitch, yaw e throttle, recebido da biblioteca “AC_AttitudeControl”, em saídas absolutas para o motor, valores PWM. Portanto, as bibliotecas de nível mais alto usariam essas funções:
 - `set_roll ()`, `set_pitch ()`, `set_yaw ()` : aceita valores de roll, pitch e yaw no intervalo de -4500 até 4500. Estes não são ângulos desejados ou mesmo taxas, mas apenas um valor. Por exemplo, `set_roll (-4500)` significaria rolar para a esquerda o mais rápido possível.
 - `set_throttle()`: aceita um valor de aceleração absoluta no intervalo de 0 a 1000. Onde, zero equivale a motores desligados e 1000 equivale a motores com aceleração máxima.
- A função “output_armed” é responsável por implementar a conversão desses valores de roll, pitch, yaw e throttle em saídas pwm. Essa conversão geralmente inclui a implementação de medidas de estabilidade, que lida com priorização de um eixo de controle sobre outro quando os pedidos de entrada estão fora dos limites físicos do frame. Isto é, não é possível realizar aceleração máxima e rotação máxima em todos os motores de um quadricóptero, pois na execução de alguns movimentos, como movimento roll, alguns motores devem ser menos acelerados do que outros. Na parte inferior da função “output_armed” existe uma chamada para o `hal.rcout-> write()` que passa os valores desejados do pwm para a camada AP_HAL.

- Em particular, a função `hal.rc_out_write()` fará com que o PWM especificado, recebido da biblioteca `AP_Motors`, apareça no pino `pwm` apropriado para a placa, ou seja, apenas um arranjo para o hardware.

4.6.2. Modos de Voo Complexos

Como dito anteriormente, estes modos são considerados complexos pelo fato de utilizarem o Módulo de GPS em seus algoritmos. Na verdade, toda a arquitetura dos modos de voo complexos é muito parecida com a dos mais simples, a única diferença é que nessa são acrescentados 2 protocolos, como mostrado na Figura 30, uma referente à biblioteca para controle de posição e outra referente à biblioteca responsável por traçar rotas.

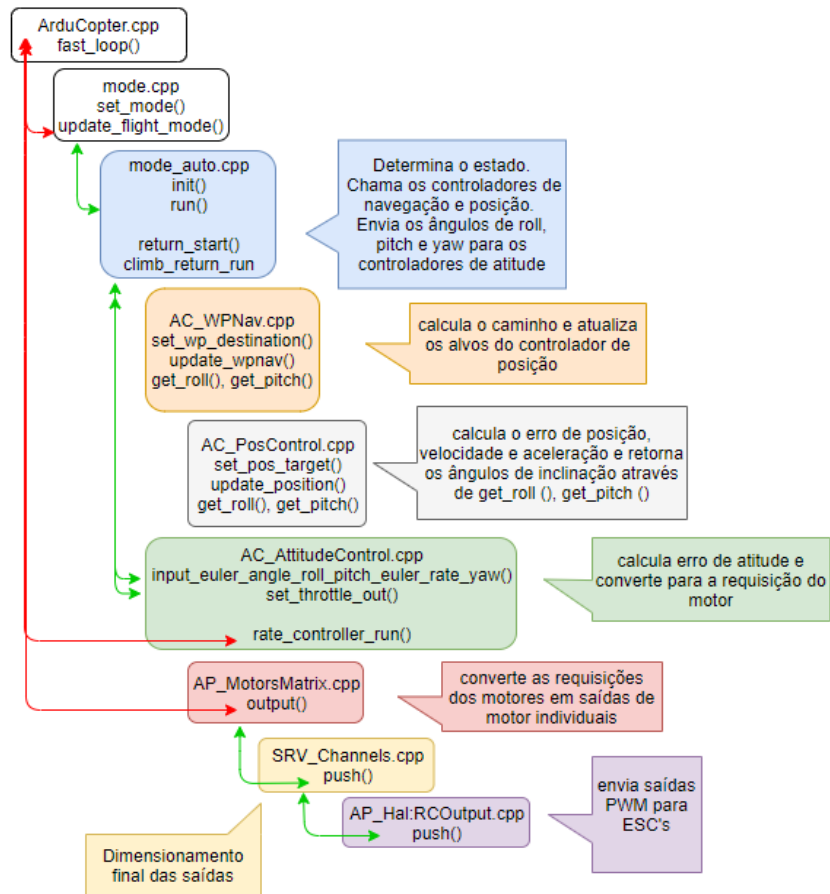


Figura 30: Arquitetura comum dos modos complexos.

Abaixo é descrito para que servem estas duas bibliotecas e seus principais processos:

- A biblioteca “AC_PosControl” permite o controle de posição 3D do veículo. Normalmente apenas os métodos mais simples de controle do eixo Z, altitude, desta biblioteca são utilizados. Isto acontece pois os modos mais complicados de voo de posição 3D, como o Loiter, fazem uso da biblioteca “AC_WPNav”. Portanto, alguns métodos comumente usados dessa biblioteca são:
 - `set_alt_target_from_climb_rate()` : aceita uma taxa de subida em cm/s e atualiza uma altitude absoluta de referência.
 - `set_pos_target()`: aceita um vetor de posição 3D que é um deslocamento, em cm, do ponto de partida do Drone (Home).
- A biblioteca “AC_WPNav” é responsável por calcular a trajetória do Drone em um voo autônomo e atualizar os alvos do controlador de posição. Todas as funções da “AC_WPNav” são muito importante para o voo autônomo e a seguir são descritas algumas delas:
 - `set_wp_origin_and_destination()`: Esta função define um waypoint de origem através do vetor “Vector3f& origin” e um waypoint de destino através do vetor “Vector3f& destination”. A biblioteca ”Location“ é a responsável por transformar os dados de latitude, longitude e altura em vetores. Além disso a variável booleana “terrain_alt” é responsável por definir se as alturas dos waypoints são possíveis, ou seja, estão a uma altura superior ao chão, assinalando verdadeiro. Nesta função é determinado verdadeiro se as alturas “origin.z” e “destination.z” são superiores a do solo.
 - `get_wp_stopping_point_xy()`: Calcula o ponto de parada com base na posição, velocidade e aceleração no ponto atual.
 - `calc_slow_down_distance()`: Calcula a distância antes do wayponit em que o veículo deve começar a desacelerar, supondo que este esteja a toda velocidade.

Se alguma função de “AC_PosControl” for chamada, o código do modo de voo também deve chamar a função “update_z_controller()” da mesma biblioteca. Isso executará os loops PID de controle de posição do eixo Z e enviará um nível de aceleração de baixo nível para a biblioteca “AP_Motors”. Se qualquer função do eixo XY for chamada, a função “update_xy_controller ()”, também de “AC_PosControl”, deverá ser chamada.

4.7. Análise de Logs

Durante todo o voo, o veículo aéreo recolhe dados importantes sobre a navegação, o que é essencial para análise de desempenho deste para verificar se o drone está cumprindo com o desejado.

Então, após a realização de um voo, um registro de log de dados pode ser baixado e aberto com o planejador de missões (Mission Planner). Desta maneira, o software é capaz de representar graficamente as variáveis de voo desejadas.

A análise dos logs permite a validação do projeto, sendo possível acompanhar por um olhar prático se o Drone está tendo o comportamento correto durante o voo. São analisadas 5 variáveis: a altitude, as posições no eixo X e Y e as velocidades no eixo X e Y, a fim de validar o controle de altitude e de posição.

- X: O controle de posição X é analisado a partir da posição desejada para X (variável “DposX”, contida no vetor “NTUN”) e a posição X aferida durante o voo (variável “posX, contida no vetor “NTUN”).
- Y: O controle de posição T é analisado a partir da posição desejada para Y (variável “DposY”, contida no vetor “NTUN”) e a posição Y aferida durante o voo (variável “posY, contida no vetor “NTUN”).
- Z: O controle de altitude e verificado pegando os dados de altitude desejado (variável “Dalt”, contida no vetor CTUN) e a altitude aferida durante o voo (variável “alt”, contida no vetor “CTUN”).

- Vel.X: O controle da velocidade de X é analisado a partir da velocidade desejada de X (variável “DVelX”, contida no vetor “NTUN”) e a aferida durante o voo (variável “VelX, contida no vetor “NTUN”).
- Vel.Y: O controle da velocidade de X é analisado a partir da velocidade desejada de X (variável “DVelX”, contida no vetor “NTUN”) e a aferida durante o voo (variável “VelX, contida no vetor “NTUN”).

Para a análise são utilizados dados dos logs de voo no momento em que o veículo está efetuando um voo autônomo em uma missão simples. Para uma melhor comparação, todos os dados utilizados estão na mesma linha do tempo, mesmo para as diferentes variáveis. Com o intuito de verificar a dispersão entre os dados desejados e os dados medidos também são mostrados gráficos de erro relativo, os dados utilizados para criar estes gráficos foram importados do Mission Planner em um arquivo txt.

Abaixo, na Figura 31, é mostrado o gráficos da posição em X real, linha vermelha, e a posição desejada de X, linha verde. É possível ver que o dado real segue muito bem a linha verde, demonstrando a eficácia do controle no eixo X.

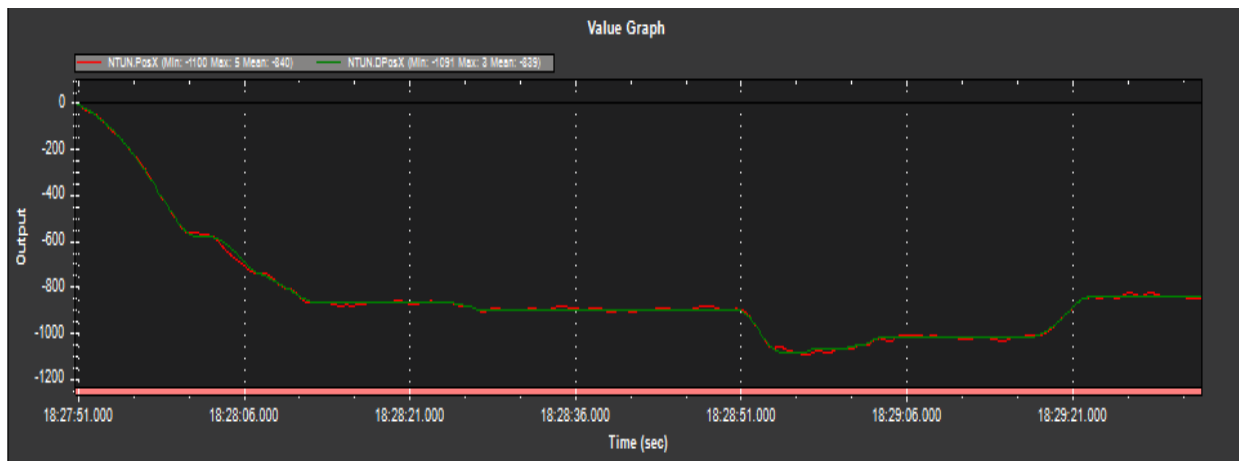


Figura 31: Gráfico da posição desejada, em verde, e a posição real, em vermelho, no eixo X.

A Figura 32 mostra o gráfico do erro relativo, confirmando que o controle foi bem efetuado e o maior valor de erro não passa de 1% do valor da medida desejada.



Figura 32: Gráfico do erro relativo ao eixo X.

Abaixo, na Figura 33, é mostrado o gráficos da posição em Y real, linha verde, e a posição desejada de Y, linha vermelha. É possível ver que o dado real segue muito bem a linha vermelha, demonstrando a eficácia do controle no eixo Y.

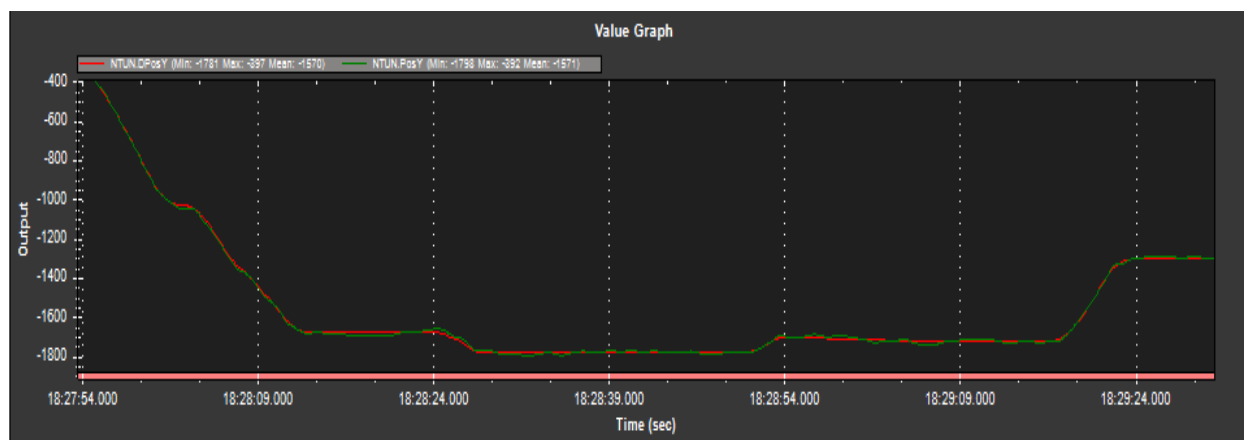


Figura 33: Gráfico da posição desejada, em vermelha, e a posição real, em verde, no eixo Y.

A Figura 34 mostra o gráfico do erro relativo, confirmando que o controle foi bem efetuado e o maior valor de erro não passa de 0.5% do valor da medida desejada.



Figura 34: Gráfico do erro relativo ao eixo Y.

Nos controles da posição X e Y é notado que há um erro maior no início do gráfico, isso se deve pelo fato de estar sendo iniciado o controle automático.

Abaixo, na Figura 35, é mostrado o gráficos da velocidade em X real, linha verde, e a velocidade desejada de X, linha vermelha. É possível ver que o dado real segue muito bem a linha vermelha, porém com menor eficácia do que no controle de posição, mostrando que esta variável é mais difícil de controlar, mas nunca comprometendo a missão.

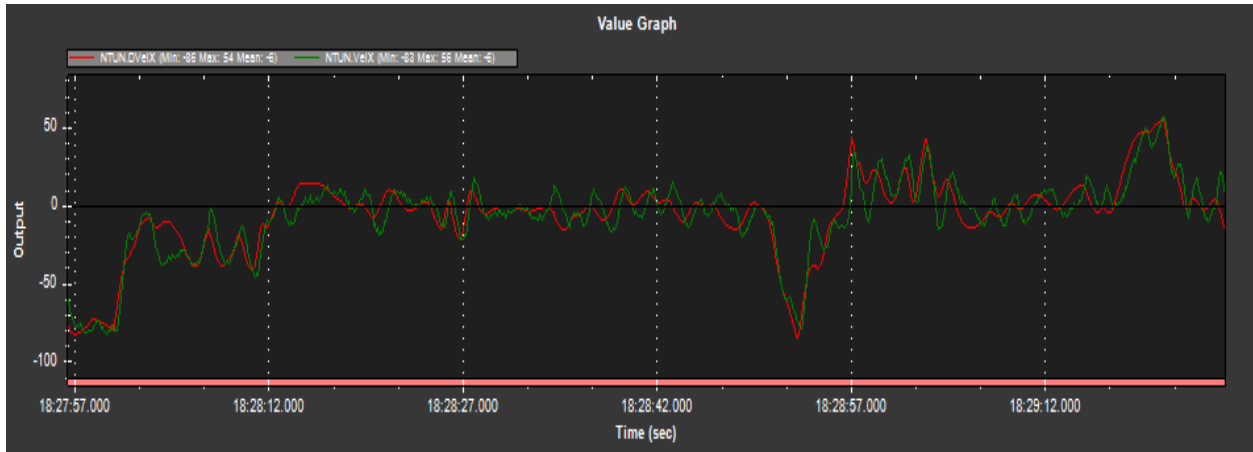


Figura 35: Gráfico das velocidades desejada, em vermelho, e real, em verde, no eixo X.

A Figura 36 mostra o gráfico do erro relativo à velocidade de X, mostrando maiores erros, que podem chegar próximos a 50%. Porém o controle se corrige rapidamente e de forma eficaz, trazendo o valor de volta para o desejado. Confirmando que o controle foi bem realizado.

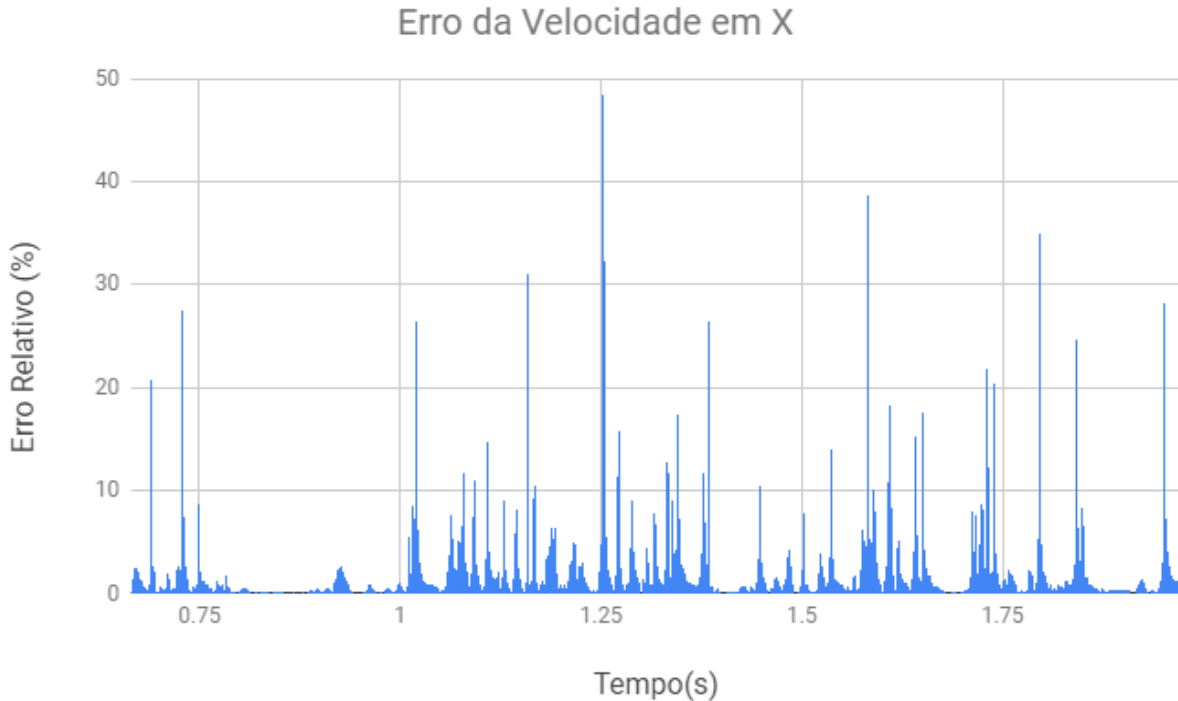


Figura 36: Gráfico do erro relativo à velocidade do eixo X.

Abaixo, na Figura 37, é mostrado o gráfico da velocidade em Y real, linha verde, e a velocidade desejada de Y, linha vermelha. É possível ver que o dado real segue muito bem a linha vermelha, porém com menor eficácia do que no controle de posição, mostrando que esta variável é mais difícil de controlar, mas nunca comprometendo a missão.

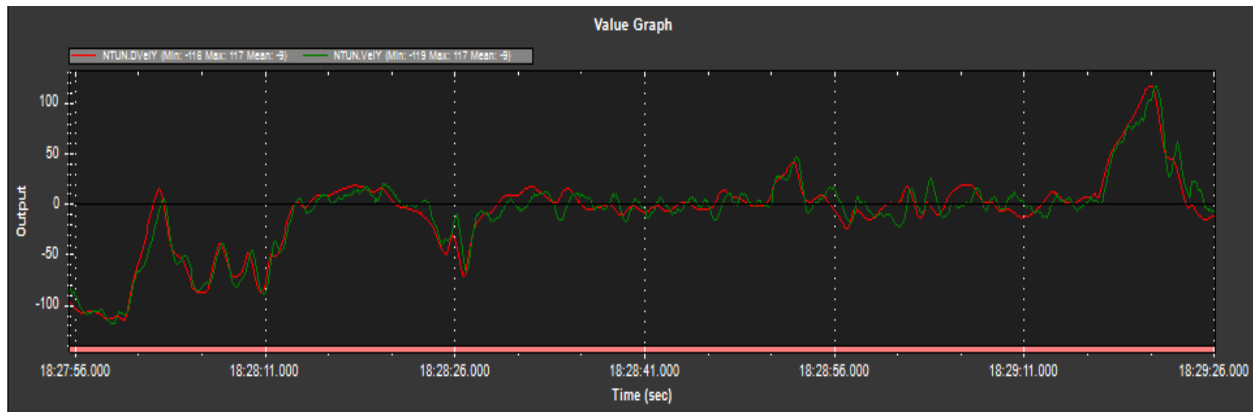


Figura 37: Gráfico das velocidades desejada, em vermelho, e real, em verde, no eixo Y.

A Figura 38 mostra o gráfico do erro relativo à velocidade de Y, mostrando maiores erros, que podem chegar próximos a 50%. Porém o controle se corrige rapidamente e de forma eficaz, trazendo o valor de volta para o desejado. Confirmando que o controle foi bem realizado.

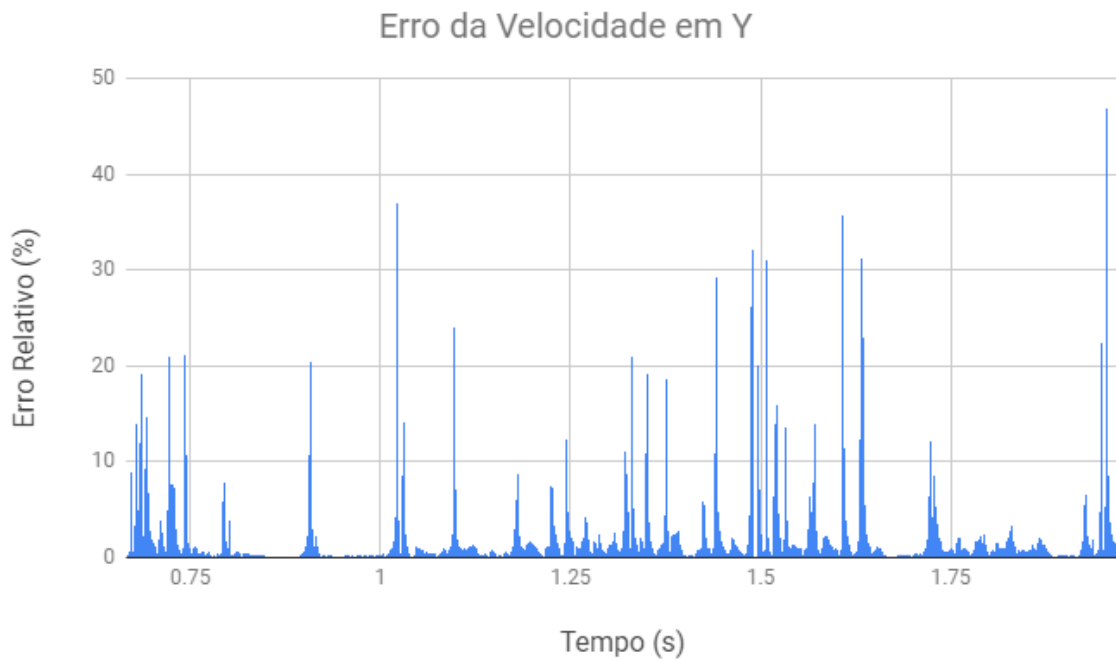


Figura 38: Gráfico do erro relativo à velocidade do eixo Y.

Abaixo, na Figura 39, é mostrado o gráficos da altura real, linha verde, e a altura desejada, linha vermelha. É possível ver que o dado real segue muito bem a linha vermelha, demonstrando a eficácia do controle de altitude.

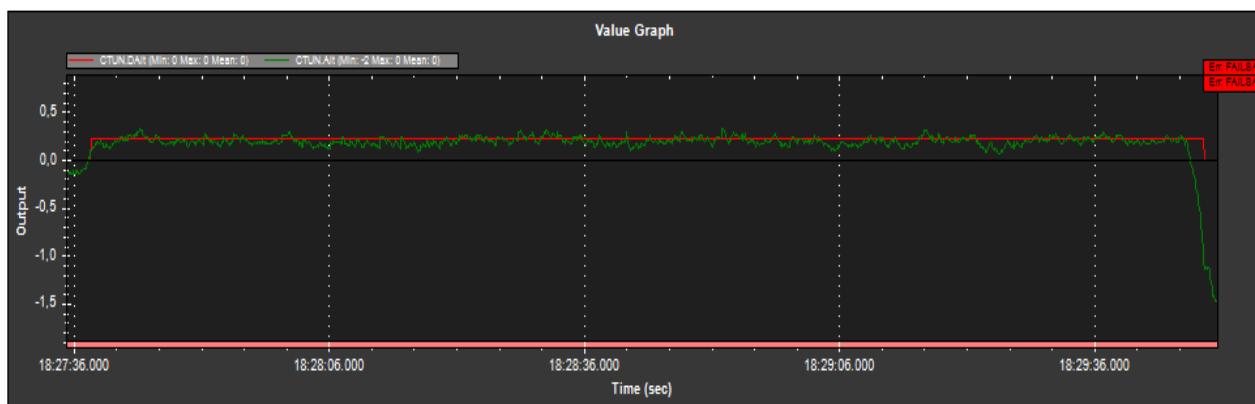


Figura 39: Gráfico da posição desejada, em vermelha, e a posição real, em verde, no eixo Y.

A Figura 40 mostra o gráfico do erro relativo, confirmando que o controle foi bem efetuado e o maior valor de erro não passa de 1%, na maior parte do tempo. Somente no final o erro é maior, isso porque o controle é desligado e passado para o piloto.

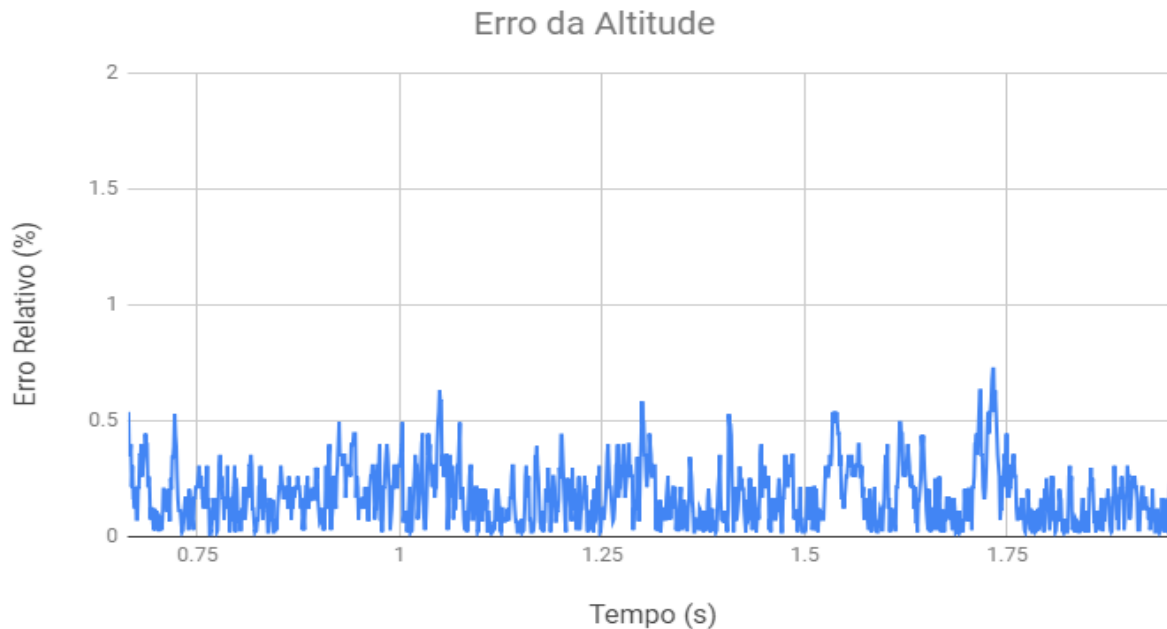


Figura 40: Gráfico do erro relativo a altitude.

5. Considerações Finais

O projeto de um Drone traz grande desafio, deve ser feito um bom planejamento teórico e levar em conta todas as variáveis apontadas durante a revisão bibliográfica. Por ser um veículo aéreo qualquer erro de cálculo ou operação pode causar um acidente, a perda de um componente ou do veículo inteiro.

Como apresentado nos Resultados, todos os procedimentos durante o trabalho foram realizados e concluídos com precisão e sempre apresentando os valores necessários, o que evidencia que o planejamento foi feito corretamente, desde as escolhas dos componentes.

Durante o processo de fabricação propriamente dito do Drone, todos os processos foram feitos sistematicamente, com muita cautela e paciência. É muito importante que após a conclusão de qualquer etapa seja testado o funcionamento destas. O resultado obtido após o final da montagem tem características importantes, como a boa distribuição de carga e compactação da estrutura, que evidenciam uma boa conclusão desta tarefa.

A etapa de configuração é muito vezes subestimada, mas é essencial para o voo autônomo. Qualquer indício de mal funcionamento de algum módulo do veículo deve ser corrigido.

A estação de controle é uma ferramenta muito importante, com ela é possível observar o funcionamento das variáveis do Drone em tempo real. Em uma das etapas de calibração do Drone, o auto tune, a aeronave ainda não dispunha da ferramenta de telemetria e um mal funcionamento do barômetro aconteceu, levando a perda do veículo. Este acidente poderia ter sido evitado se o seu controle de altitude estivesse sendo monitorado, portanto é indicado a utilização da telemetria em cada etapa.

Portanto com a análise dos logs e o resultados apresentados é possível concluir que todo o projeto foi realizado com sucesso.

6. Referências Bibliográficas

GARRET, Felipe. **Como funciona um drone? Entenda a tecnologia por trás desses robôs.** Disponível em: <<http://www.techtudo.com.br/noticias/noticia/2015/04/como-funciona-um-drone-entenda-tecnologia-por-tras-desses-robos.html>>. Acesso em: 13 jun. 2017.

BARATO, Bruno . **Projeto de um Sistema de Controle para Veículos Aéreos Não Tripulados.** Disponível em: <http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180450/Tce-26082014.../Barato_Bruno.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2017.

CALEIRO, JOÃO PEDRO. **Como os drones vão mexer com a economia.** Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/economia/como-os-drones-vao-mexer-com-a-economia/>>. Acesso em: 15 jun. 2017.

UNMANNEDTECH. **UT-Q650 Quadcopter Assembly Guide.** Disponível em: <<http://www.unmannedtech.co.uk/manuals/ut-q650-assembly-guide>>. Acesso em: 09 jun. 2017.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica.** E. Blucher, 2002. Acessado em: 26 de Março de 2017.

MULTICOPTER. **Como funciona um drone.** Disponível em: <https://multicopter.com.br/drone.asp>> Acesso em: 22 de Março de 2017.

DOCTOR DRONE. **Controladoras de Voo.** Disponível em: <<http://doctordrone.com.br/controladoras-de-voo-flight-controller/>> Acesso em: 22 de Março de 2017.

TEK BLOG. **Controladoras de Voo para drones.** Disponível em: <<http://tekblog.com.br/controladoras-de-voo-drones-naza-kk2-apm/>> Acesso em: 22 de Março de 2017.

ROBOTSHOP. **SimonK ESC User Guide.** Disponível em: <<http://www.robotshop.com/media/files/pdf/lynxmotion-simonk-esc-guide.pdf>> Acesso em: 25 de Março de 2017.

LEKSELL, Frederik. **Manual of Sensorless Brushless Speed Controller.** Disponível em: <<http://frederik.se/wp-content/uploads/2015/12/HW-01-V4.pdf>>. Acesso em: 28 mar. 2017.

ARDUINO E CIA. **Sensor GY-80 - Acelerômetro Giroscópio Magnetômetro e Barômetro.** Disponível em: <<http://www.arduinoecia.com.br/2014/09/sensor-gy-80-acelerometro-bussola-barometro.html>> Acesso em: 26 de Março de 2017.

MECÂNICA INDUSTRIAL. **O que é controle Eletrônica de Velocidade.** Disponível em: <<https://www.mecanicaindustrial.com.br/179-o-que-e-controle-eletronico-de-velocidade/>> Acesso em: 27 de Março de 2017.

PALPITE DIGITAL. **Como fazer um drone caseiro com Arduino?.** Disponível em: <<https://www.palpitedigital.com/como-fazer-drone-caseiro-arduino/>>. Acesso em: 25 de Março de 2017.

PWC. **Global market for commercial applications of drone technology valued at over \$127bn.** Disponível em: <http://pwc.blogs.com/press_room/2016/05/global-market-for-commercial-applications-of-drone-technology-valued-at-over-127bn.html>. Acesso em: 15 jun. 2017.

CH ROBOTICS. **Understanding Euler Angles.** Disponível em: <<http://www.chrobotics.com/library/understanding-euler-angles>>. Acesso em: 05 jun. 2017.

DEV TEAM, Arupilot. **Mission Planner Overview**. 2016. Disponível em: <<http://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-overview.html>>. Acesso em: 8 ago. 2018.

BRAZIL, Plano. **Drones: Armas do presente e do futuro**. 2015. Disponível em: <<http://www.planobrazil.com/drones-armas-do-presente-e-do-futuro/>>. Acesso em: 14 ago. 2018.

GOV, Anac. **Requisitos Gerais para Aeronaves não Tripuladas de uso Civil**. 2017. Disponível em: <http://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94-emd-00>>. Acesso em: 14 ago. 2018.

RODRIGUES, Sergio. **Drone, do zangão ao avião**. 2013. Disponível em: <<https://veja.abril.com.br/blog/sobre-palavras/drone-do-zangao-ao-aviao/>>. Acesso em: 9 ago. 2018.

STUDART, Alberto. **Quadricópteros, aprenda um pouco mais sobre esta maravilhosa máquina**. 2015. Disponível em: <<https://veja.abril.com.br/blog/sobre-palavras/drone-do-zangao-ao-aviao/>>. Acesso em: 9 ago. 2018.

INSTRUMENTS, National. **Explicando a Teoria PID**. 2011. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/3782/pt/>>. Acesso em: 9 ago. 2018.

MÁRCIO FREITAS, Carlos. **Controle PID em sistemas embarcados**. 2014. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/control-pid-em-sistemas-embarcados/>>. Acesso em: 10 ago. 2018.