

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC**

**CURSO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

**FABIO DUARTE EUZEBIO**

**PROJETO DE CONTROLE DE UM DRONE QUADRICÓPTERO:  
IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLES PARA VOOS AUTÔNOMOS**

**CRICIUMA**

**2015**

**FABIO DUARTE EUZEBIO**

**PROJETO DE CONTROLE DE UM DRONE QUADRICÓPTERO:  
IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLES PARA VOOS AUTÔNOMOS**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado para obtenção do grau de Bacharel no curso de Ciência da Computação da Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC.

Orientador: Prof. Esp. Sergio Coral

**CRICIUMA**

**2015**

**FABIO DUARTE EUZÉBIO**

**PROJETO DE CONTROLE DE UM DRONE QUADRICÓPTERO:  
IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLES PARA VOOS AUTÔNOMOS**

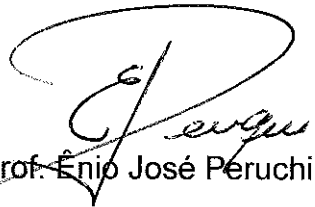
Trabalho de Conclusão de Curso aprovado pela Banca Examinadora para obtenção do Grau de Bacharel, no Curso de Ciência da Computação da Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC, com Linha de Pesquisa em Automação

Criciúma, 22 de junho de 2015.

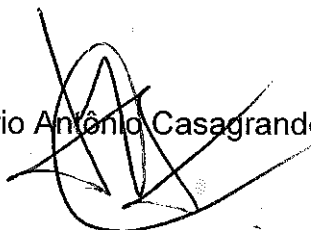
**BANCA EXAMINADORA**



Prof. Sérgio Coral - Especialista - UNESC - Orientador



Prof. Enio José Peruchi - Especialista - UNESC



Prof. Rogério Antônio Casagrande - Mestre - UNESC

A **Deus**, pelo seu infinito amor, por ter suprido todas as minhas necessidades, por me abençoar muito mais do que eu mereço, por iluminar o meu caminho.

Aos meus **Pais**, exemplos de luta e simplicidade, por nunca terem medido esforços para me proporcionar a melhor educação, esperando ansiosamente por este momento.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus em primeiro lugar por esta conquista. Não há maior recompensa na vida que atingir qualquer meta através de nosso esforço. Eu sei que nada disto seria possível sem seu apoio.

Agradeço aos meus Pais, pois mais do que a educação formal que me ofereceram, eles sempre se esforçaram para serem os melhores, agradeço pela vida que me ofereceram, por todo o amor e apoio incondicionais que sempre me disponibilizaram. Minha formação humana foi a coisa mais importante que eles fizeram por mim. Eu só posso retribuir tentando ser o melhor filho que pais como eles merecem ter, aos dois agradeço por tudo.

Agradeço também a minha esposa Daiane e ao meu filho Luiz Felipe, que de forma especial e carinhosa me deram força e coragem, me apoiaram e iluminaram os meus pensamentos, e eu agradeço a Deus todos os dias por ter eles na minha vida.

Aos colegas de classe, que durante o curso partilharam, das dúvidas e conhecimentos, elevando os níveis das discussões, contribuindo assim, para uma melhor apropriação dos conhecimentos científicos.

Estendo o agradecimento aos professores que contribuíram com seus conhecimentos ao longo da formação do curso. Em especial ao Prof. Sérgio Coral, pela orientação na produção do trabalho de conclusão de curso.

Aos amigos que fiz nesta universidade, e a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que eu concluísse este trabalho de conclusão de curso.

**“No fim tudo dá certo, e se não deu certo é porque ainda não chegou ao fim.”**

**Fernando Sabino**

## RESUMO

Os Drones foram criados inicialmente com objetivos militares, eram utilizados em missões que eram prejudiciais para humanos. Graças ao avanço da tecnologia este tipo de aeronave pode ser utilizado em diversos tipos de aplicações como vigilância, inspeção, filmagem, fotografia e diversão. Neste trabalho foi realizado um levantamento histórico do uso de veículos aéreos não tripulados(VANTs) e as classificações existentes para os mesmos. Em seguida descreve os princípios de funcionamento dos quadricópteros e conceitua os componentes que o compõem, além de descrever as ferramentas necessárias e características importantes para a construção de um quadricóptero. Neste trabalho foi desenvolvido um projeto para controle autônomo de um veículo aéreo não tripulado(Drone), do tipo quadricóptero, que é caracterizado por quatro motores numa estrutura cruzada em forma de X. Em seu centro são embarcados vários sensores necessários para sua automação, utilizando-se de um processo para permitir que o quadricóptero seja capaz de tomar decisões, realizando partes de uma missão de forma autônoma, efetuando deslocamento geográfico premeditado a partir de coordenadas. Foi desenvolvida uma aplicação Web para telemetria com objetivo de estabelecer a interface entre o utilizador e Drone, atuando como fonte de dados para captação de dados do sistema em tempo real. Graficamente é possível localizar com êxito a sua posição no mapa utilizando o GPS, e acompanhar a leitura dos sensores da Unidade Inercial, assim como enviar comandos e coordenadas para execução de missões autônomas. Foram realizados diversos testes de voo para assegurar que o Drone seria capaz de voar e se manter estável sem complicações, seguindo a sequência das etapas de desenvolvimento e todas as especificações e metas estabelecidas no projeto.

**Palavras-chave:** Drone. Arduino. Protótipo Autônomo. Sistema de Navegação. MultiWii. Quadricóptero. Veículos aéreos não tripulados.

## ABSTRACT

Drones were originally created for military purposes, they were used in missions that were harmful to humans. Thanks to advancement in technology this type of aircraft can be used in various types of applications such as surveillance, inspection, filming, photography and fun. This work represents a historical survey of the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) and existing classifications for the same. Then describes the operating principles of quadricopters and conceptualizes the components that comprise it, and describes the necessary tools and important features for building a quadricopter. This work developed a project for autonomous control of an unmanned aerial vehicle (drone), the quadricopter type, which is characterized by four engines on a cross-shaped structure X. At its center are shipped various sensors needed for its automation using a process to allow the quadricopter be able to make decisions, making parts of a mission autonomously, making geographical displacement calculated from coordinates. A Web application for telemetry in order to establish the interface between the user and Drone, acting as a data source to capture real-time system data was developed. Graphically it is possible to successfully locate your position on the map using GPS, and follow the reading of the inertial sensor unit, as well as send commands and coordinates to execute autonomous missions. Several flight tests were conducted to ensure that the drone would be able to fly and remain stable without complications, following the sequence of development stages and all specifications and targets set in the project.

**Key words:** Drone. Arduino. Autonomous prototype. Navigation system. MultiWii. Quadricopter. Unmanned aerial vehicles.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Bombardeiro Aéreo Não Tripulado de Charles Perley, 1863. ....	109
Figura 2 - Sperry-Curtis aérea Torpedo o primeiro verdadeiro UAV do mundo, 1916. .....	110
Figura 3 - O Bug Kettering pronto para decolagem, 1918.....	111
Figura 4 - Modelo Global Hawk (HALE). ....	113
Figura 5 - Modelo MQ-9 Reaper (MALE). ....	114
Figura 6 - Modelo RQ-7 Shadow 200 (TUAV).....	114
Figura 7 - Close-range UAV's - Observer.....	115
Figura 8 - Modelo Lockheed Martin Desert Hawk III ( <i>Muav</i> ). ....	116
Figura 9 – Modelo Wasp (MAV). ....	117
Figura 10 – Modelo Prox-Dynamics “Pico-flyer” (NAV) ....	117
Figura 11 - Disposição dos propulsores do quadrotor.....	119
Figura 12 - Bréguet-richet Quad-rotor Helicopter. ....	120
Figura 13 - Jerome-de Bothezat Quad-rotor or Flying Octopus.....	121
Figura 14 – Quadrotor de Etienne Oemichen.....	122
Figura 15 - Modo de voo com configuração em X (a) e com configuração em + (b). .....	124
Figura 16 - Atitudes do quadrirrotor.....	125
Figura 17 - Variações nas velocidades angulares e respectivos resultados em movimentações lineares e angulares (atitudes). ....	126
Figura 18 - Motor Brushless .....	127
Figura 19 - Terminais de entrada e saída de um ESC .....	129
Figura 20 - Hélices de diferentes materiais, passos e tamanhos. ....	130
Figura 21 - Arduino Mega 2560 R3 .....	133
Figura 22 – Integrated Development Environment (IDE).....	135
Figura 23 - Giroscópio Mecânico de Foucault.....	139
Figura 24 - Frame Quadcopter Q450 .....	148
Figura 25 - Motor Turnigy Modelo D2830/11 1000KV .....	150
Figura 26 - Tabela de configuração do produto.....	150
Figura 27 - Diâmetro e passo da hélice.....	151
Figura 28 - Comparação das hélices utilizadas.....	152
Figura 29 - ESC Hobbypower 30A .....	153

Figura 30 - Arquitetura do sistema .....	156
Figura 31 - Arduino Mega 2560 R3 .....	157
Figura 32 - 3DR Radio Telemetry Kit 433Mhz.....	159
Figura 33 - Rádio HobbyKing Modelo HK6S .....	160
Figura 34 - Módulo GPS ME-1000RW .....	161
Figura 35 - Pinagem do conector de saída.....	161
Figura 36 - Controle em malha fechada .....	165
Figura 37 - Bateria Lion Power 3s 11.1v 2200mAh .....	168
Figura 38 - Módulo GY-80 10DOF 9 Eixos IMU .....	169
Figura 39 - Posicionamento correto do sensor no Frame .....	170
Figura 40 - Sensor ultrassônico HC-SR04 .....	172
Figura 41 - Aba principal da interface web para telemetria .....	174
Figura 42 - Aba navegação da interface web para telemetria .....	174
Figura 43 - Etapas de montagem do protótipo .....	176
Figura 44 - Montagem final completa do Drone .....	177
Figura 45 - Primeiro teste de voo .....	178
Figura 46 - Buzzer Lipo .....	178
Figura 47 - Teste de voo 4 .....	180
Figura 48 - Estrutura de madeira para testes.....	181
Figura 49 - Teste de voo 6 .....	182
Figura 50 - Teste de voo 7 .....	182

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Preços dos componentes que utilizados no projeto final.....	147
--	-----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AD	Analógico Digital
BEC	Battery Eliminator Circuit
BLDC	Brushless Direct Current
CA	Corrente Alternada
CAD	Computer-Aided Design
CC	Corrente Contínua
COM	Communication port
DSP	Processador Digital de Sinais
ESC	Electronic Speed Controller
FAI	Federação Aeronáutica Internacional
FM	Frequência Modulation
GPL	GNU General Public License
GPS	Global Positioning System
HTA	Heavier Than Air
I2C	Inter-Integrated Circuit
IDE	Integrated Development Environment
IMU	Inercial Measurement Unit
LCD	Display de Cristal Líquido
LiPo	Polímero de Lítion
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
MIPS	Milhões de Instruções por Segundo
PID	Proporcional, Integrativo e Derivativo
PMC	Prefeitura Municipal de Criciúma
PWM	Pulse Width Modulation
RAM	Random Access Memory
RF	Rádio Frequência
RPH	Remotely Piloted Helicopter
RPM	Rotações Por Minuto
SCL	Serial-Clock
SDA	Serial-Data

TWI	Two-Wire Interface
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
UCAR	Unmanned Combat Armed Rotorcraft
UCAV	Unmanned Combat Air Vehicle
USB	Universal Serial Bus
VANT	Veículo Aéreo não Tripulado
VTOL	Vertical Take-Off and Landing
VTUAV	Vertical Take-off UAV

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>101</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	102
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	102
1.3 JUSTIFICATIVA .....	103
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	105
<b>2 DRONE</b> .....	<b>107</b>
2.1 DEFINIÇÃO.....	107
2.2 A HISTÓRIA DOS VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS(VANT'S).....	108
2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS VANT'S .....	112
<b>3 QUADRIRROTORES</b> .....	<b>119</b>
3.1 O PRINCÍPIO DA HISTÓRIA DOS QUADRIRROTORES.....	120
3.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO .....	123
3.3 MOTOR BRUSHLESS .....	127
3.4 ELETRONIC SPEED CONTROL .....	128
3.5 BATERIA.....	129
3.6 HÉLICE PROPULSORA.....	130
<b>4 MICROCONTROLADOR</b> .....	<b>132</b>
4.1 ARDUINO.....	133
<b>5 SENSORES</b> .....	<b>137</b>
5.1 ACELERÔMETRO .....	138
5.2 GIROSCÓPIO .....	138
5.3 MAGNETÔMETRO .....	140
5.4 ALTÍMETRO .....	140
5.5 GPS.....	141
<b>6 COMUNICAÇÃO SEM FIO DE LONGO ALCANCE</b> .....	<b>142</b>
<b>7 TRABALHOS CORRELATOS</b> .....	<b>143</b>
<b>8 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO DO DRONE</b> .....	<b>145</b>
8.1 METODOLOGIA.....	146
<b>8.1.1 Frame de Montagem</b> .....	<b>147</b>
<b>8.1.2 Atuadores</b> .....	<b>149</b>
8.1.2.1 Sistema de Propulsão .....	149
8.1.2.2 Motores .....	149

8.1.2.3 Hélices.....	151
8.1.2.4 ESC .....	153
<b>8.1.4 Arquitetura do Sistema .....</b>	<b>154</b>
8.1.4.1 Placa Microcontroladora.....	157
8.1.4.2 Telemetria .....	158
8.1.4.3 Controle Remoto .....	159
8.1.4.4 GPS.....	160
<b>8.1.5 Firmware de Controle.....</b>	<b>162</b>
8.1.5.1 Controle Proporcional, Integrativo e Derivativo (PID) .....	164
8.1.5.2 Sistema de Navegação autônoma .....	166
<b>8.1.6 Alimentação do Sistema .....</b>	<b>167</b>
<b>8.1.7 Sensores Utilizados .....</b>	<b>168</b>
8.1.7.1 Unidade Inercial-IMU.....	169
8.1.7.2 Acelerômetro .....	170
8.1.7.3 Giroscópio .....	171
8.1.7.4 Magnetômetro .....	171
8.1.7.5 Barômetro.....	171
8.1.7.6 Sonar.....	172
<b>8.1.8 Interface Web para Telemetria .....</b>	<b>173</b>
8.2 RESULTADOS OBTIDOS.....	175
<b>8.2.2 Testes de Voo .....</b>	<b>177</b>
8.2.2.1 Algoritmo PID de ajuste automático .....	183
<b>9 CONCLUSÃO .....</b>	<b>185</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>187</b>
<b>APÊNDICE(S).....</b>	<b>192</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No panorama da aviação, surgiram diversos modelos aeronáuticos para atenderem necessidades específicas do homem, contudo, havia sempre a presença concreta de um piloto em tais aparelhos. Com a evolução tecnológica, sistemas mais elaborados puderam ser criados, de forma que as aeronaves vieram a funcionar fisicamente distantes de quem os controlava, ou de forma autônoma. Surge, então, Drone, ou Zangão que na sua tradução do inglês, é o nome popular adotado por qualquer tipo de Veículo Aéreo Não Tripulado (ou VANT), uma aeronave que não necessita de pilotos embarcados. Os VANT's, no geral, são munidos de elevado número de sensores e mecanismos capazes de realizarem diversas tarefas.

Planejado inicialmente com objetivos militares, os primeiros Drones foram concebidos para serem usados em missões que eram prejudiciais para humanos, em que a aeronave carregava explosivos para serem lançados em locais específicos, sem colocar em risco a vida do piloto. Estes tipos de aeronave também eram fabricadas para uso em inteligência militar, apoio aéreo e controle de tiro de artilharia, como também para outras operações como patrulhamento urbano, ambiental e de fronteiras, atividades de busca e resgate, entre outros (KEANE, 2013, tradução nossa).

Hoje as pesquisas estão voltadas para a tentativa de se produzir aeronaves de combate que tenham condições de agir de forma autônoma, com a intuição próxima de um ser humano, visando a substituição de pilotos de caças de guerra. O que não se sabe é se isso vai acontecer em um futuro próximo, já que a substituição do homem pela máquina é um fator enigmático, e existem inúmeras implicações e consequências envolvendo sua operação, como a autoridade do comando de uma aeronave e a responsabilização por todos os acontecimentos sucedidos durante a realização do voo (AUSTIN, 2010, tradução nossa).

Embora este conceito de aeronave não seja novo, a dificuldade de estabilização e o desempenho ruim dos primeiros protótipos limitaram seu desenvolvimento. Considerando que uma das características específicas das

aeronaves que tem configuração de quadricóptero é a capacidade de realização de grandes movimentações em voos verticais e horizontais em baixas velocidades, é preferível que este tenha o menor tamanho possível com intuito de minimizar o peso, afim de realizar manobras e tarefas não executadas por outras aeronaves inclusive as tripuladas (SÁ, 2012).

Este tipo de veículo também pode ser usado em aplicações voltadas às áreas de vigilância, inspeção, filmagem, fotografia e diversão, e em situações, como por exemplo, em missões militares, onde a vigilância por aeronave tripulada não pode ser realizada por conta de riscos, custos e outros fatores (STROJNY, 2009, tradução nossa).

Neste trabalho, além de aplicar diversos conhecimentos teóricos adquiridos durante a formação acadêmica, propõe-se o desenvolvimento de um algoritmo de controle capaz de interpretar os diversos sensores e dispositivos de geolocalização, de altitude, de campos magnéticos, de aceleração e sensores de mudança de direção. Todos acoplados a um protótipo de Drone do tipo quadricóptero, numa estrutura em forma de X, e que utiliza de quatro motores para decolagem. O software será desenvolvido sob a plataforma arduino, permitindo a aplicação de técnicas avançadas de controle em tempo real, um controle que realize os procedimentos necessários para que a aeronave execute partes de uma missão de forma autônoma.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Implementar um software para controle autônomo de um Drone, realizando partes de uma missão de forma autônoma, efetuando deslocamento geográfico premeditado a partir de coordenadas.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) conhecer os projetos existentes para a montagem de um quadricóptero de custo mais acessível;
- b) desenvolver protótipo de hardware com Arduino;

- c) implementar um software capaz de efetuar a leitura dos diversos sensores do sistema, para controle de estabilidade de voo e execução de partes de missões autônomas;
- d) desenvolver uma aplicação para estabelecer a interface com o sistema.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Um dos maiores desafios para o homem sempre foi a façanha de poder voar, desde os tempos mais remotos a humanidade observa na natureza variados seres que tem essa capacidade e utilizam-se disto como um instrumento de sobrevivência. O seres humanos utilizaram de muitas formas para alcançar este feito, e assim aplicaram isto para os transportes bélicos, transporte de passageiros, de cargas e até diversão. Com todas essas aplicabilidades para o voo, muitos veem tentando aperfeiçoá-los de diversas formas com o passar do tempo, chegando hoje a era dos estudos com voos não tripulados Unmanned Air Vehicles (UAV) (VALENTI et al, 2004, tradução nossa).

O uso de VANT's ou Drones não é necessariamente novo, contudo, só recentemente, com o avanço na tecnologia de processamento de dados, desenvolvimento de softwares, materiais cada vez mais leves, equipamentos de navegação global, como GPS e sensores de posição e a miniaturização de componentes, assim como muitas outras das tecnologias existentes hoje, como por exemplo, satélites, laser, computadores e a internet, esse tipo de tecnologia se expandiu e reforçam a capacidade de desenvolvimento de projetos nessas áreas.

Também existem as necessidades bélicas, com a finalidade de sobrevoar em regiões consideradas hostis ou de difícil acesso sem oferecer riscos a seus tripulantes, como aplicações militares.

Existe um crescente investimento por parte de governos, empresas e universidades visando o desenvolvimento dos Drones, e com isso o mercado em volta dessa tecnologia também é aquecido, exigindo cada vez mais

profissionais e pesquisadores para atuar na área. Tais veículos tem um potencial comercial elevado, principalmente em aplicações de inspeção de infraestruturas como pontes e hidrelétricas, e supervisão de instalações industriais.

Ainda há uma infinidade de outros usos para os Drones. Na área militar, é possível vigiar todos os 24253 quilômetros de fronteiras com apenas 19 voos de um Drone. Incêndios florestais, invasões de terras indígenas, desmatamento ilegal, conflitos agrários ou mineração ilegal seriam assim descobertos em tempo real (BRANCATELLI, 2014).

O Drone também poderia ajudar em operações táticas, dando informações para uma ataque preciso a pistas clandestinas de voo, utilizadas para o tráfico de drogas. Na agricultura, o Drone conseguiria encontrar falhas nas plantações, aéreas com excesso ou falhas e pontos onde é preciso utilizar agrotóxicos (BRANCATELLI, 2014).

Atualmente devido ao avanço tecnológico, vem sendo bastante utilizadas também para fins civis. Entre outras aplicações tem-se; utilização em fotos aéreas, medições de grandes áreas, vistoriar e acompanhar obras públicas como rodovias, elaboração de mapas e relatórios, inspeção para verificar levantamento de pragas na agricultura, detalhamento topográfico.

Outra situação prática para o uso dos Drones seria em uma situação de desastre, como o do avião Air France em 2009. Seus sensores poderiam encontrar o material da fuselagem da aeronave, economizando milhões de dólares gastos nas longas operações de busca no meio do oceano. E toda a operação do avião-robô poderia ser feita automaticamente, da decolagem ao pouso (HYLTON, 2011, tradução nossa).

É notável o crescimento do uso de Drones, principalmente, no reconhecimento de áreas que possam apresentar risco à vida humana. Assim, com a grande disponibilidade de Drones no mercado para o público em geral, a preços mais acessíveis, os quadricópteros têm sido popularizados para diversas funcionalidades, uma vez que ele não exige campos abertos para pouso e decolagem podendo realiza-los verticalmente. Além disso, ele possui características interessantes como capacidade de pairar no ar, ser menos

sensível a turbulências e voar em baixa velocidade.

Nos últimos anos vem se tornando uma área atrativa de pesquisa devido à possibilidade de substituição do homem em várias atividades, dentro destes tipos de aeronaves, os quadricópteros vêm ganhando destaque em estudos voltados para a área de modelagem dinâmica e desenvolvimento de métodos de controle automático para estabilização e regulação de voo devido à complexidade de controle (SÁ, 2012). A preferência pelo estudo dos Drones se dá em decorrência do conhecimento que se tem a respeito da complexidade em mantê-lo estável e apto para o voo e sabendo da importância dessa área de atuação no projeto de aeronaves.

Pesquisadores e relatórios governamentais apontam que, no futuro, múltiplos robôs voadores serão capazes de atuar, até sob a forma de enxames, cooperativamente e de modo autônomo (UAS Center of Excellence, 2010, tradução nossa), funcionando como uma rede coordenada de sensores que cumprirão missões complexas sem nenhuma intervenção humana (VACHTSEVANOS, 2004, tradução nossa).

Assim os robôs voadores entrarão de vez no imaginário popular das pessoas, levando desde a criação de um Drone-motoboy de uma loja virtual para efetuar entregas, à aeronaves complexas com uma infinidade de funções e uma autonomia impressionante. “Oportunidades não faltam. A hora para os Drones é agora.” (FANTON, 2014, p. 62).

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Na parte inicial do trabalho, isto é no Capítulo 2 é apresentada uma breve introdução sobre Drones, definições, conta um pouco da história dos veículos aéreos não tripulados, as classificações existentes para os VANT's e a utilidade desses veículos aéreos.

No capítulo 3, informações sobre quadricópteros, além do levantamento histórico dos quadricópteros, será apresentado o princípio de funcionamento, explicando a relação entre os empuxos gerados por cada um dos propulsores e os movimentos básicos realizados pela aeronave, tais como:

roll, pitch yaw, também descreve sobre os componentes, e da eletrônica a bordo do quadricópteros tais como: Motor Brushless, ESC, Bateria e Hélice Propulsora.

No capítulo 4 define microcontroladores, traz informações sobre em que época eles surgiram e seu princípio de funcionamento, ainda no capítulo 4 é apresentado o hardware Arduino e seu ambiente de desenvolvimento Open-Source, e a facilidade de utilização do ambiente para programadores iniciantes.

No capítulo 5 traz os conceitos dos vários sensores que podem ser implementados no desenvolvimento de um Drone tais como: Acelerômetro, giroscópio, magnetômetro e altímetro.

No capítulo 6 descreve alguns conceitos sobre comunicação sem fio de longo alcance No capítulo 7 são apresentados quatro trabalhos correlatos, no qual foram utilizados como fonte de pesquisa para possibilidade de aplicação no projeto.

No capítulo 8 é descrito acerca do trabalho desenvolvido, apresenta todas as etapas metodológicas do desenvolvimento do protótipo e resultados obtidos.

Por fim na conclusão são feitas as considerações finais e propostas de trabalhos futuros, tendo como base o que foi desenvolvido neste projeto.

## 2 DRONE

Drones são provavelmente os mais avançados equipamentos na área da robótica, aeronáutica e eletrônica. Equipados para resistir a trabalhos pesados e ambientes hostis, esses equipamentos podem ter diversas utilidades. Nos últimos anos, vem aumentando o interesse de pesquisadores e empresas em plataformas autônomas, que possam substituir o homem em certas atividades que podem ser consideradas perigosas para ele (SÁ, 2012). O uso de Drones tem crescido rapidamente nos últimos anos, porque ao contrário de aeronaves tripuladas podem permanecer no ar por muitas horas. Esse tipo de aeronave pode ser controlado remotamente ou pode voar autonomamente através de planos de voo controlado por softwares em seus sistemas embarcados que trabalham em conjunto com o GPS.

Existe um crescente investimento por parte de governos, empresas e universidades visando o desenvolvimento dos Drones, incrementando a área de pesquisa em robótica (BRANCATELLI, 2014). Esses tipo de aeronave tem um potencial comercial elevado, há uma infinidade de utilidades para os Drone que será tratado detalhadamente mais a diante. Sendo um modelo específico de VANT descrito neste projeto.

### 2.1 DEFINIÇÃO

Basicamente existem três tipos de aeronaves, excluindo mísseis, que voam sem pilotos. Eles são: VANT's, o termo VANT foi traduzido do inglês Unmanned aerial vehicle (UAV), Veículos Pilotados Remotamente (RPV) e Drones. Esses veículos são denominados Veículos Aéreos Não Tripulados, são todo e qualquer tipo de aeronave que não necessita de pilotos embarcados para ser guiada (FAHLSTROM, 2012, tradução nossa). Esses aviões são controlados a distância por meios eletrônicos e computacionais, sob a supervisão e controle humanos, com ou sem a sua intervenção, por meio de componentes eletrônicos programáveis. Segundo a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2012, p. 2) a definição de VANT é:

Veículo Aéreo Não Tripulado – VANT: Aeronave projetada para operar sem piloto a bordo e que não seja utilizada para fins meramente recreativos. Nesta definição, incluem-se todos os aviões, helicópteros e dirigíveis controláveis nos três eixos, excluindo-se, portanto, os balões tradicionais e os aeromodelos.

## 2.2 A HISTÓRIA DOS VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS(VANT'S)

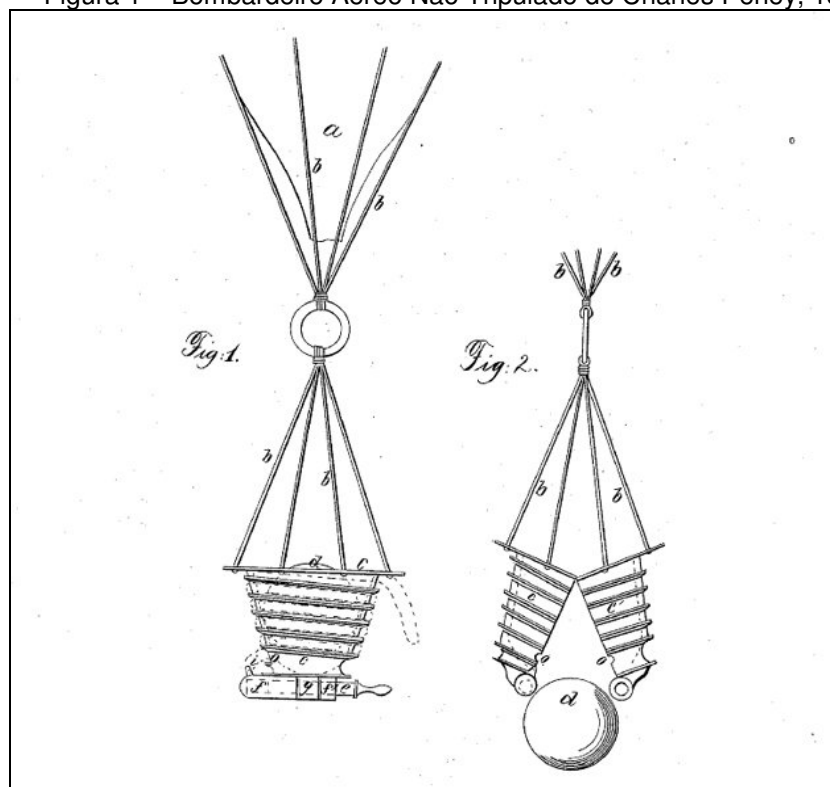
A história dos aviões não tripulados se funde com a história de todas as aeronaves. O registro que se tem do uso de fluviabilidade para alcançar voo não tripulado é tão antiga quanto o século três, quando general chinês Zhuge Liang (180-234 ad) usou balões de ar quente que trazia em seu interior uma espécie de lamparina a óleo, para sinalização militar e para afastar as tropas inimigas durante a noite para fazê-los pensar que havia uma força divina a seu favor (BARNHART, 2012, tradução nossa).

Drones têm uma longa história. Um dos primeiros usos registrados de aeronave não tripuladas foi por austríacos em 22 de agosto de 1849. Eles lançaram cerca de duzentos balões não tripulados montados com bombas contra a cidade de Veneza. Alguns desses balões atingiram seu objetivo, e outros retornam as linhas austríacas por causas do vento forte. Além disso, os balões tinham um alcance limitado porque os explosivos tinham que estar ligados ao fio do detonador. Esta ideia de balões bomba, foi mais tarde estendido para uso durante a Guerra Civil americana, quando balões de ar quente equipados com explosivos utilizavam fusíveis cronometrados (POLLOCK, 2014, tradução nossa).

Em fevereiro de 1863, dois anos após o início da Guerra Civil, um inventor de Nova York chamado Charles Perley registrou uma patente para um bombardeiro aéreo não tripulado. Perley desenhou um balão de ar quente que poderia transportar um cesto carregado com explosivos ligados a um mecanismo de tempo (figura 1). O temporizador abriria uma espécie de cesta articulada como uma garra, quando expirasse o tempo do fusível cronometrado, liberando assim os explosivos para fora. No entanto, devido à imprevisibilidade das correntes de ar e os padrões climáticos, seu projeto permaneceu impreciso e perigoso, e o bombardeiro aéreo de Perley nunca foi

utilizado com sucesso, e as pesquisas em outros projetos foram ampliadas (GALLAGHER et al, 2014, tradução nossa).

Figura 1 – Bombardeiro Aéreo Não Tripulado de Charles Perley, 1863.



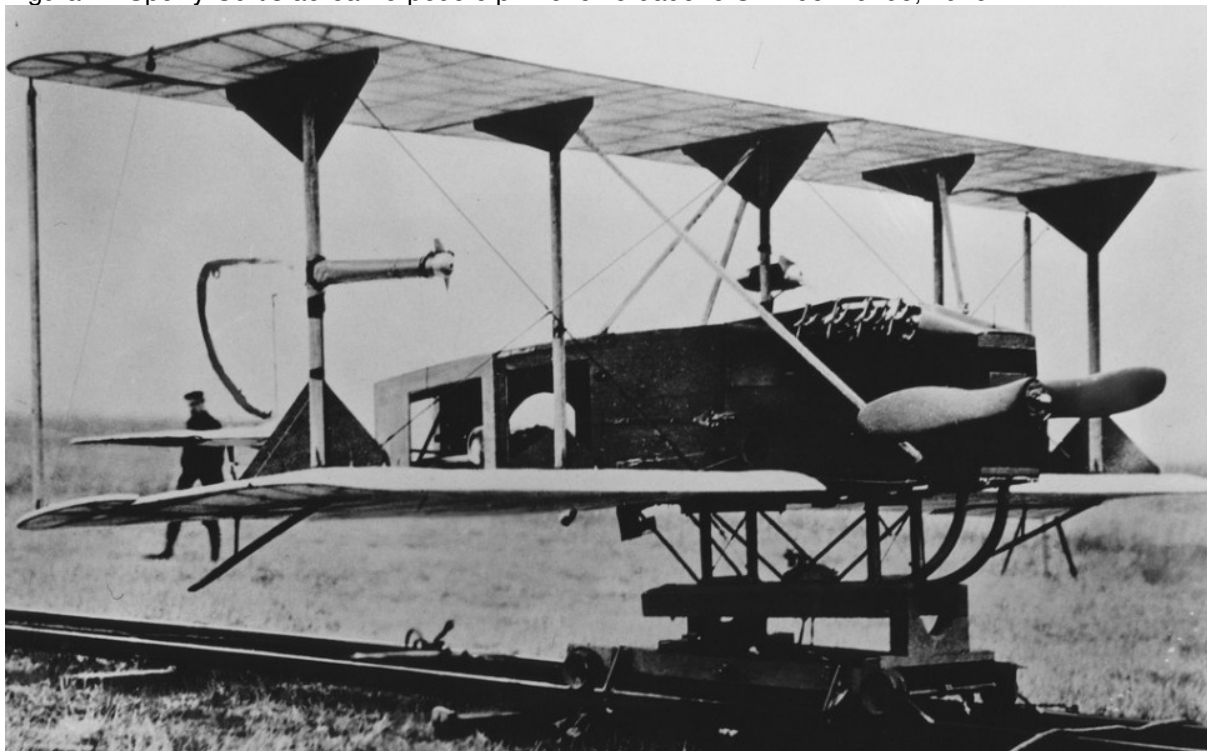
Fonte: U.S. Patent Office (2014).

Nos anos que antecederam e durante a I Guerra Mundial, o desenvolvimento começou a se expandir ainda mais, especialmente com as demandas de guerra para aviões de combate, com a necessidade de controles mais eficazes para os veículos aéreos não tripulados um passo importante foi dado por Nicola Tesla, cientista atribuídos por muitos como inventor real do rádio moderno, que posteriormente, esta acabou se transformando em uma das primeiras ideias para a produção de torpedos rádio controlados utilizados pela marinha americana (BARNHART, 2012, tradução nossa).

Em 1916, Elmer A. Sperry inventou o giroscópio estabilizador automático, e seu objetivo era melhorar a estabilidade e controle de aeronaves. Nesta mesma época o governo americano financiou um projeto que seria a primeira aeronave não tripulada com intenções de uso na guerra. Sperry usou seu avanço tecnológico para converter a US Navy Curtiss N-9 uma aeronave

de treinamento militar para o primeiro UAV rádio controlado (GALLAGHER, 2014, tradução nossa). O projeto foi capaz de resistir a uma longa série de impasses, travamentos e falhas definitivas de várias peças, tudo o que poderia dar errado aconteceu. Catapultas de lançamentos falharam, motores não funcionavam, capotamentos da aeronave, e interferências do vento. Sperry e sua equipe perseveraram até 06 de março de 1918. A Sperry aérea Torpedo como era chamado (figura 2), voou com sucesso cerca de oitenta quilômetros carregando uma bomba de aproximadamente cento e trinta e seis quilogramas em vários voos de teste (BARNHART, 2012, tradução nossa).

Figura 2 - Sperry-Curtis aérea Torpedo o primeiro verdadeiro UAV do mundo, 1916.



Fonte: Nonami et al (2010).

Para não ser ultrapassado pela Marinha, o exército dos EUA investiu em um conceito bomba aérea semelhante ao do torpedo aéreo. Charles Kettering (da Famosa General Motors) que já havia patenteado o motor elétrico de partida, fechou contrato com o governo americano para a produção de suas aeronaves não tripuladas. Ele queria construir um torpedo mais simples, mais barato do que a versão de Sperry. Demorou cerca de três anos para desenvolver e era chamado de Kettering aérea Torpedo, mais conhecido como

o "Kettering Bug" ou simplesmente "Bug". Um avião de aproximadamente cento e trinta e seis quilogramas com a capacidade de transportar uma carga igual ao seu peso, o Bug era essencialmente um torpedo aéreo que poderia ser lançado em um alvo pré-programado. Ele apresentava a maior parte dos mesmos aspectos técnicos como o torpedo Sperry (giroscópio, barômetro, contat-rotações etc.) (NEWCOME, 2004, tradução nossa).

Figura 3 - O Bug Kettering pronto para decolagem, 1918.



Fonte: BARNHART (2012).

Os primeiros voos de teste, em 1918, quando foi dado o nome de 'The Bug' (figura 3), não ocorreram bem. Testes subsequentes foram mais bem sucedidos, o Bug pode voar cerca de cento e sessenta e um quilômetros de distância a 55 km/h e transportar aproximadamente oitenta e dois quilogramas de cargas explosivas. Ao contrário do torpedo aéreo da Marinha, que nunca foi colocado em linha de produção, o Bug foi o primeiro VANT a ser produzido em série (FAHLSTROM, 2012, tradução nossa).

No entanto, os programas da Marinha e do Exército foram combinados, e mais tarde, testes competitivos favoreceram o torpedo Curtis-Sperry, e o projeto do Bug Kettering foi abandonado. Assim, quando primeira Guerra Mundial terminou, o interesse oficial em torpedos aéreos não tripulados diminuíram, até o final dos anos 1930 e o advento da segunda guerra mundial (NEWCOME, 2004, tradução nossa).

No início da Segunda Guerra Mundial, Adolf Hitler encomendou uma bomba voadora, Talvez o veículo aéreo não tripulado mais conhecido da Segunda Guerra Mundial foi o alemão Fieseler Fi 103, também chamado de Vengeance Weapon-1 (V-1), ou Buzz Bomb devido ao som marcante e característico que o seu motor propulsor a jato produzia em voo. Ele transportava uma ogiva de aproximadamente novecentos quilogramas, cerca de duzentos e quarenta quilômetros, e tinha um sistema de orientação sofisticada composta por giroscópios, barômetros, e um anemômetro, que foi usado para calcular a distância voada (BARNHART et al, 2012, tradução nossa).

Os alemães lançaram cerca de vinte mil V-1s em alvos aliados, principalmente em Londres e Antuérpia, na Bélgica.

Outro país que desenvolveu um VANT com o advento da Segunda Guerra Mundial foi a Inglaterra. Na década de 1930, conhecido pelo nome Queen Bees (Abelhas Rainha), foi projetado para uso como um alvo aéreo durante as missões de treinamento. O Queen Bees era controlado por rádio e podia voar a uma altura de mais de cinco quilômetros e viajar uma distância máxima de quatrocentos e oitenta e três quilômetros a mais de 160 km/h. Ele foi o primeiro UAV recuperável e, portanto, reutilizável (GALLAGHER, 2014, tradução nossa).

Em 1937, o inglês, Reginald Denny Leigh, e dois norte-americanos, Walter Righter e Kenneth, depois de verem UAVs como ferramentas críticas em técnicas de treinamento e de combate, trabalharam no desenvolveram uma série de UAVs chamados RP-1, PR-2, PR-3, e RP-4 utilizados para prática de tiro ao alvo. (FAHLSTROM, 2012).

Nas décadas seguintes (1950-1970), durante a guerra da coreia e do Vietnã, os norte-americanos desenvolveram a Teledyne Ryan Q-2 Firebee. A adaptabilidade e natureza totalmente recuperável do Firebee mostra o início do conceito moderno que conhecemos de um UAV.

### 2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS VANT'S

Embora existam vários tipos de UAV's, eles são geralmente classificados de acordo com sua capacidade ou pelo tamanho necessário para cada tipo de missão. No entanto, é possível que um sistema possa empregar mais de um tipo de veículo aéreo para cobrir diferentes tipos de missão, o que pode representar um problema em sua designação. No entanto, estas definições são constantemente alteradas quando avanços da tecnologia fazem com que um sistema menor possa assumir as funções de um sistema superior. Esses limites são muitas vezes imprecisos, de modo que as definições listadas a seguir são consideradas como referências, pois estão sujeitos a mudanças. Os termos em uso atualmente cobrem uma gama de sistemas, são eles (AUSTIN, 2010):

a) High Altitude Long Endurance (HALE) (Alta altitude longo alcance): pode voar a mais de 15.000 metros de altitude e ficar mais de 24 horas em pleno voo. Eles são utilizados para missões de reconhecimento e vigilância de longo alcance (tipo global), Eles geralmente são operados por forças aéreas de bases fixas. Dependendo do tipo de missão eles podem possuir uma variedade de sensores específicos, capazes de fornecerem Inteligência, Vigilância e Reconhecimento (ISR) e informações sobre uma vasta área geográfica, sem oferecer risco a população (figura 4);

Figura 4 - Modelo Global Hawk (HALE).



Fonte: NORTHROP GRUMMAN CORPORATION (2014).

b) Medium Altitude Long Endurance (MALE) (média altitude e longo alcance) - operam em alturas entre 5000 e 15000m, com mais de 24 horas de autonomia. As suas funções são semelhantes aos sistemas

HALE mas geralmente operam a um pouco mais próximos de sua base, mesmo assim superam os 500km, figura 5;

Figura 5 - Modelo MQ-9 Reaper (MALE).



Fonte: POLLOCK (2014).

c) Medium Range or Tactical UAV (TUAV) (Alcance Médio ou UAV tático) - com alcance entre 100 e 300 km. Estes veículos aéreos são menores e possuem sistemas de operação mais simples do que os HALE e MALE e são operados também por terra e forças navais, figura 6;

Figura 6 - Modelo RQ-7 Shadow 200 (TUAV).



Fonte: ARMY-TECHNOLOGY.COM (2014).

d) Close-Range UAV - utilizado por grupos de combate do exército, entre outras operações militares, navais e diversas aplicações civis. Eles geralmente operam em faixas de até cerca de 100 km e têm, provavelmente, o mais prolífico dos usos em ambos os campos, incluindo diversas funções como reconhecimento, designação de alvos, monitoramento, segurança, vigilância, inspeção de linhas de transmissão de energia e monitoramento de tráfego, figura 7;

Figura 7 - Close-range UAV's - Observer



Fonte: (AUSTIN, 2010).

e) MUAV ou Mini UAV - relaciona-se com UAV abaixo de um certo peso (ainda a ser definido), provavelmente abaixo de 20 kg, mas não tão pequeno como o MAV, capaz de ser lançado com as mãos e operar em intervalos de até 30 km. Eles também são usados por grupos de batalha móveis e em particular para diversos fins civis, figura 8;

Figura 8 - Modelo Lockheed Martin Desert Hawk III (*Muav*).



Fonte: AUSTIN (2010).

f) Micro Air Vehicles (MAV) - O MAV foi inicialmente definido como um UAV por ter uma envergadura maior do que 150 mm, mas isso já foi consolidado. O MAV é principalmente necessário para operações em ambientes urbanos, especialmente em edifícios. É necessário que se voe lentamente, e de preferência a pairar no ar e ser capaz de ficar bem próximo a paredes sem bater. Os MAV's são geralmente feitos de maneira que se possa ser lançado à mão e, por serem bem leves estão muito vulneráveis à turbulências atmosféricas. Todos os tipos são propensos a ter problemas com quedas, figura 9;

Figura 9 – Modelo Wasp (MAV).



Fonte: NONAMI (2010).

g) Nano Air Vehicles (NAV) - Estes são propostos como sendo do tamanho de sementes de plátano, podem chegar a ter dimensões inferiores a 5cm, com um peso próximo de 10g, mesmo estas dimensões não estão dentro da escala de nano, o uso de “nano” refere-se que estas aeronaves exigem a incorporação de nanotecnologia dentro dos subsistemas, como processadores, motores, baterias, sensores etc. Sua utilidade real ainda não foi totalmente definida, mas podemos incluir voar dentro e ao redor de interiores de edifícios e outras estruturas naturais, tais como cavernas, para fornecer informações sobre a posição de estruturas de conteúdo e condições, figura 10.

Figura 10 – Modelo Prox-Dynamics “Pico-flyer” (NAV)



Fonte: AUTIN (2010).

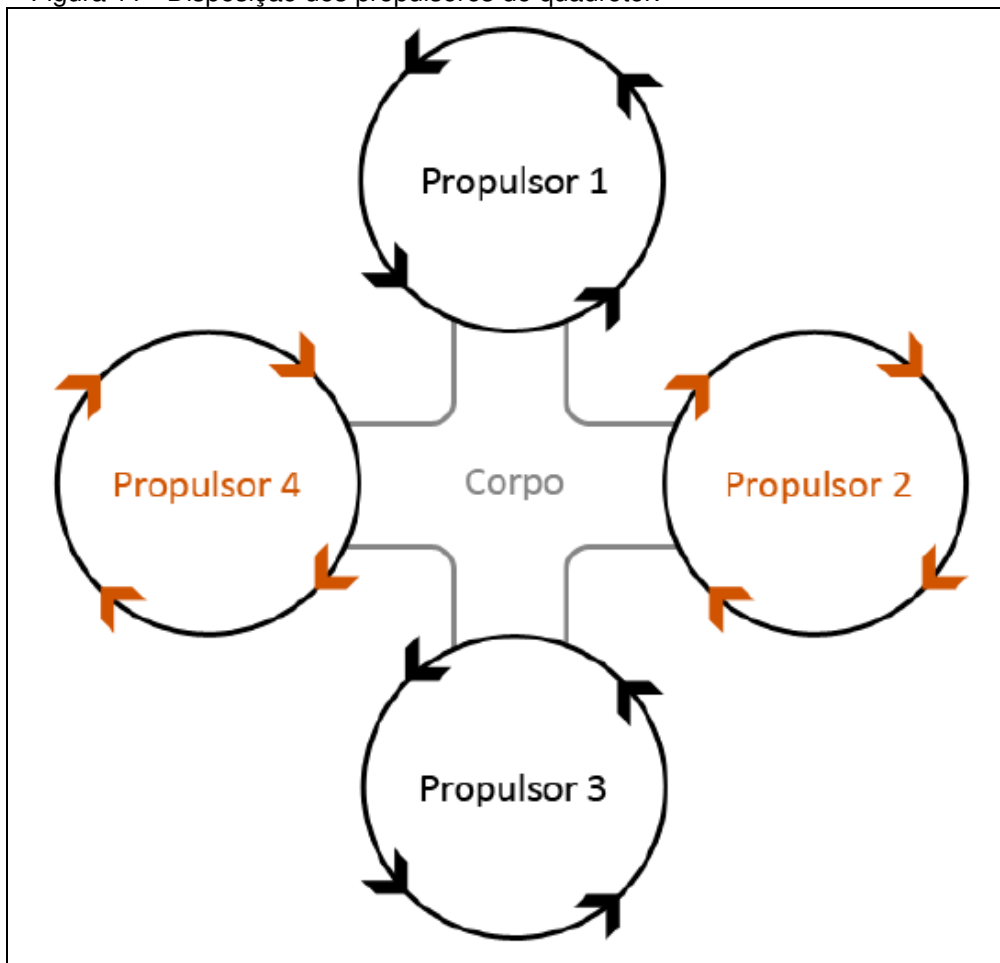
Algumas dessas categorias possivelmente até o TUAV em relação ao tamanho podem utilizar configurações de asas rotativas, e são muitas vezes

referidos pelo termo *Remotely Piloted Helicopter (RPH)* ou *Vertical Take-off UAV (VTUAV)*, Se um veículo aéreo é capaz de decolagem vertical, geralmente é também capaz de uma aterragem vertical, e o que pode ser, por vezes, de uma importância operacional ainda maior, pairar no ar durante uma missão. Aeronaves de asa rotativa, também são menos suscetíveis a turbulência do ar em comparação com a de asa fixa nesse grupo de pequena carga. O desenvolvimento também está progredindo em direção a projetos de veículos de combate aéreos não tripulados de asa fixa que podem lançar armas ou até mesmo participar de combates no ar, que são características do Unmanned Combat Air Vehicle (UCAV). Helicópteros armados também estão em desenvolvimento e estes são conhecidos como Unmanned Combat Armed Rotorcraft (UCAR). No entanto, HALE, MALE e TUAV estão cada vez mais sendo adaptados para transportar armas, a fim de reduzir o tempo de reação para um ataque em um alvo descoberto por seu reconhecimento.

### 3 QUADRIRROTORES

Quadrirrotores são veículos aéreos de asas rotativas (popularmente conhecidas como hélices), decolagem e pouso vertical, Vertical Take-Off and Landing (VTOL) e mais pesados que o ar, Heavier Than Air (HTA), com quatro rotores em configuração de cruz, nos quatro vértices extremos da estrutura cruzada (CAMPERA et al, 2013). A posição dos motores de cada propulsor fica de forma que o empuxo seja gerado na mesma direção, onde os motores adjacentes giram em sentido contrário conforme mostrado na figura 11. As forças exercidas pela hélice são perpendiculares ao plano dos motores, o centro de massa é localizado no centro do veículo, em relação a um helicóptero tradicional e, no seu centro, possui todos os equipamentos de medição, controle, comunicação e energia (MUNÕZ, 2012; VASCONCELOS, 2013).

Figura 11 - Disposição dos propulsores do quadrotor.

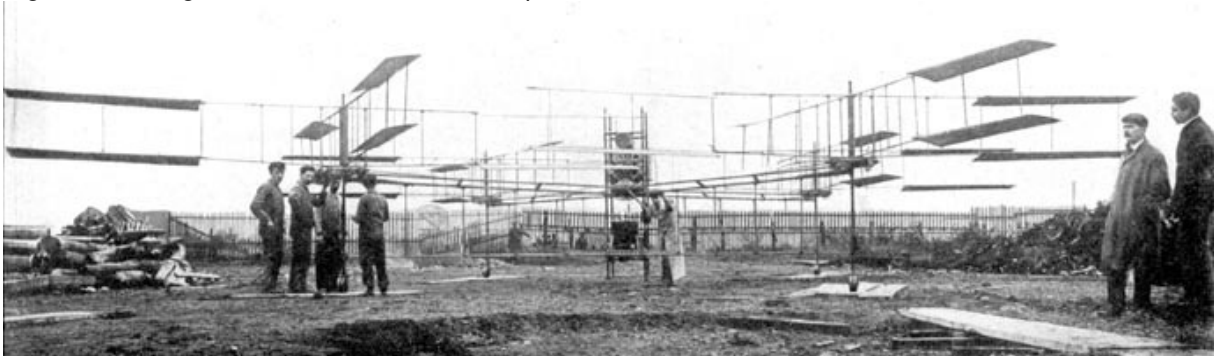


Fonte: CAMPERA et al (2013).

### 3.1 O PRINCÍPIO DA HISTÓRIA DOS QUADRIRROTORES

Os Quadrirrotores surgiram no princípio dos anos 1900 e vários exemplares foram criados nos vinte anos seguintes. Inicialmente, a ideia seria transportar um piloto que controlasse os quatro rotores, a primeira proposta de uma aeronave com possibilidade de voo vertical e utilização de um sistema de rotor aconteceu no ano de 1907, Louis Bréguete e seu irmão Jacques sob a orientação do Professor Richet, realizaram experiências e testes meticulosos de formas de aerofólio com entendimento na teoria aerodinâmica essencial do helicóptero, começaram a construir o primeiro quadrotor, criaram o chamado Bréguet-Richet Quad-Rotor Helicopter (figura 12), mais sofisticado e provavelmente com maior possibilidade para alcançar voo vertical. O veículo possuía um motor único de 40/45 HP (30/34 kW), tinha um peso de 578 kg, incluindo o peso de tripulantes, O controle dos rotores era feito através de uma alavanca mecânica e um par de rotores girava em sentido contrário ao outro par, a potência aos motores foi fornecida por gasolina e transmissão de correia, sendo relatados vários voos em baixa altitude de poucos segundos, consta-se que, a altura máxima alcançada foi de 1,5m, não conseguindo obter a estabilidade necessária à sua pilotagem. Apesar dos resultados insatisfatórios, Charles Richet e os irmãos Breguet introduziram a teoria dos pares de rotores que rodam em sentidos opostos, o que ainda hoje é utilizada (LEISHMAN, 2000, tradução nossa; PFEIFER, 2013).

Figura 12 - Bréguet-richet Quad-rotor Helicopter.

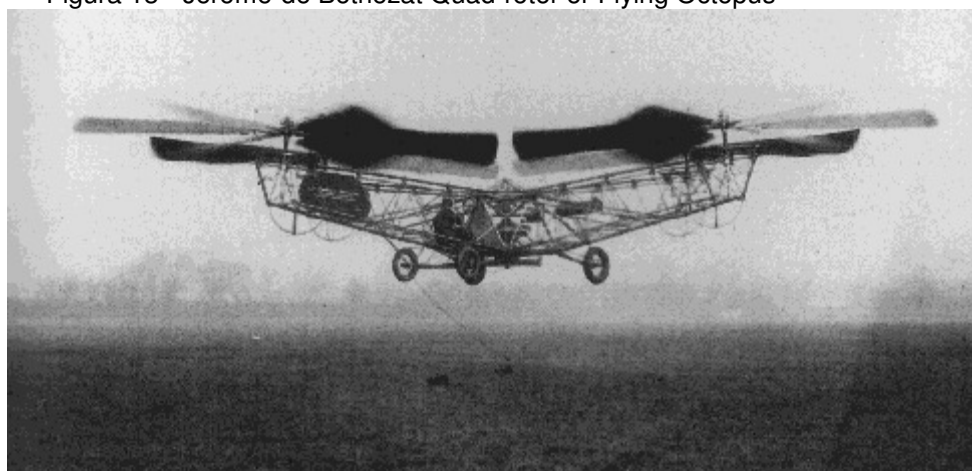


Fonte: LEISHMAN (2000).

Em 1922, um imigrante russo dos Estados Unidos chamado Georges de Bothezat construiu um dos maiores helicópteros de seu tempo, sob contrato do exército dos EUA. Bothezat tinha sido aluno do Prof. Zhukowski na Rússia e tinha escrito um dos primeiros manuscritos de técnicas na aerodinâmica de rotação de asa. Era um quadrirrotor em forma de cruz onde nas extremidades estavam fixados seus rotores e um conjunto de quatro rotores menores serviam para ajudar a controlar a máquina. O helicóptero quadrotor, conhecido simplesmente como o helicóptero de Bothezat (figura 13), foi construído por de Bothezat e Ivan Jerônimo nos hangares de Wright Field perto de Dayton, Ohio. Ivan Jerônimo foi o co-criador (LEISHMAN, 2000, tradução nossa; SÁ, 2012).

O primeiro voo acabou por ser um êxito surpreendente para uma máquina que tinha sido construído sem prototipagem. O desajeitado De Bothezat quad-rotor ou "Flying Octopus" voou com sucesso muitas vezes, embora em baixas altitudes e velocidades de avanço lento. No entanto, por causa da insuficiente performance, custos financeiros elevados, e do crescente interesse militar em autogiros da época, o projeto foi cancelado (LEISHMAN, 2000, tradução nossa; SÁ, 2012).

Figura 13 - Jerome-de Bothezat Quad-rotor or Flying Octopus



Fonte: LEISHMAN (2000).

Outro Quadrirrotor na história dos VANT's de asa rotativa, desenvolvida também por volta de 1922 por Etienne Oemichen, um empregado da empresa de automóveis francesa Peugeot, era um quadrirrotor em um estilo

similar ao do de Bothezat, mas com oito rotores adicionais para controle e propulsão, tudo ligado ao mesmo motor (figura 14). Pesava cerca de 800 kg, possuía um motor de 180HP (134 kW), possuía alto grau de controlabilidade e estabilidade para a época, realizou mais de mil testes de voo durante a década de 1920 batendo vários recordes de tempo de voo e distância percorrida. Oehmichen estava fazendo voos razoáveis e sua máquina, e provou que uma máquina de voo vertical poderia ser estável e um pouco manobrável, embora pesado (HIRSCHBERG, 2000, tradução nossa).

Em maio de 1924, ele foi premiado pela Federação Aeronáutica Internacional (FAI) por demonstrar o primeiro helicóptero a voar em um padrão de circuito fechado de 1 km, o que levou 7 minutos e 40 segundos a uma velocidade média de apenas 7,8 km / h (4,9 mph). A máquina, no entanto, não era praticável para qualquer uso realistas (LEISHMAN, 2000, tradução nossa).

Figura 14 – Quadrotor de Etienne Oehmichen



Fonte: LEISHMAN (2000).

Durante muito tempo o quadrirrotor deixou de ser explorado, pois os resultados obtidos não eram bons o suficiente para continuar com o projeto por causa da sua dificuldade de estabilização (SÁ, 2012).

No entanto, nos últimos anos, devido ao desenvolvimento da tecnologia de miniaturização de sensores, Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), e também, com a tecnologia de baterias, mais leves e com maior tempo de uso, a comunidade científica têm desenvolvido vários trabalhos utilizando Quadrirrotores, estudos acerca da estabilização de voo do quadrirrotor, agora automática, foram retomados para utilizá-lo no âmbito das

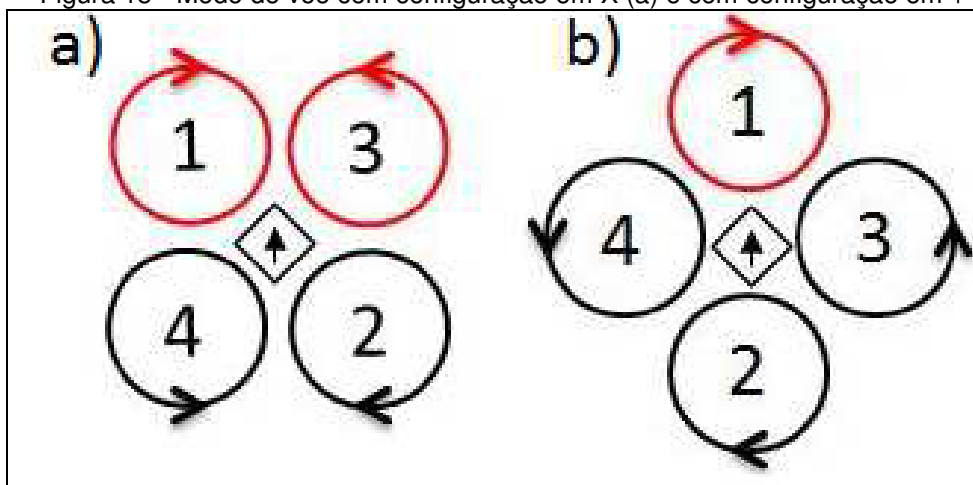
UAVs, visto que mecanicamente este é mais simples que um helicóptero convencional de mesmo porte, o que diminui custos de construção e manutenção; além de permitir uma maior proximidade e interação com ambiente, pois durante o voo armazena menos energia cinética em um rotor por este ser menor (sustentação dividida em quatro rotores), e em caso de um rotor colidir com outro corpo, os estragos são menores. Assim, os quadrirrotores de hoje são muito mais avançados. Eliminou-se a necessidade de um piloto a bordo do veículo, diminuindo, significativamente, as dimensões do mesmo (PFEIFER, 2013; SKIBA, 2012; MELO, 2010).

### 3.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Um quadrirrotor possui um esqueleto que pode ser utilizado com configuração em “X” ou configuração em “+”, relativamente a direção preferencial de voo, como pode ser visto na figura 15. Nela pode-se observar que os dois rotores dispostos ao longo do eixo X giram no sentido anti-horário, enquanto os rotores do eixo Y giram no sentido horário. Isto é necessário para eliminar o efeito torque gerado pelos rotores (SÁ, 2012). Logo, hélices adjacentes devem girar em sentidos opostos, da mesma forma usada pelos irmãos Breguet em 1907 (LEISHMAN, 2000).

Nas extremidades ficam os motores, e cada uma da hélices é responsável por uma parcela do empuxo total necessário para decolar e sustentar o quadrirrotor.

Figura 15 - Modo de voo com configuração em X (a) e com configuração em + (b).

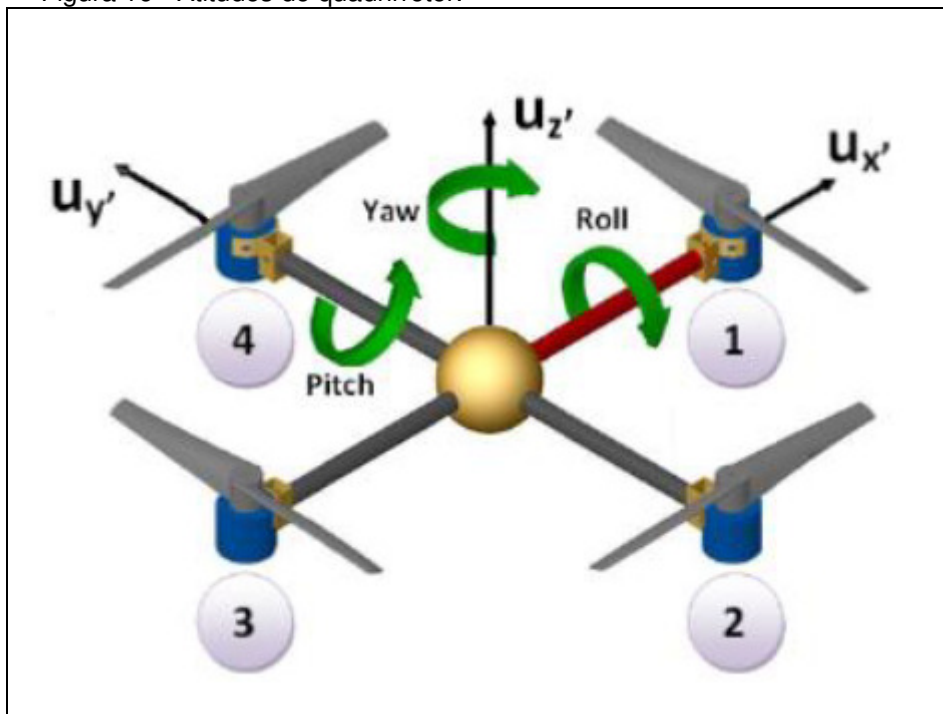


Fonte: NASCIMENTO (2011).

A posição absoluta do quadricóptero é descrita por três coordenadas ( $x, y, z$ ) do centro de massa em relação ao plano de referência terra. Sua atitude absoluta é descrita por três ângulos de Euler de ( $\omega \theta \Phi$ ). Estes três ângulos são chamados respectivamente ângulo de guinada (ou Yaw, em inglês), ângulo de inclinação (ou Pitch, em inglês) e ângulo de rolagem (ou Roll, em inglês) conforme mostrado na figura 16, eles permitem os movimentos do quadricóptero não considerando a execução de acrobacias (PEGORARO, 2013).

Estes ângulos são muito importantes para implementação das técnicas de controle, pois ao exercer variações nestas atitudes tem-se projeção da propulsão de cada hélice para uma direção, tornando possível o deslocamento do quadricóptero no eixos X e Y (PFEIFER, 2013).

Figura 16 - Atitudes do quadrirrotor.



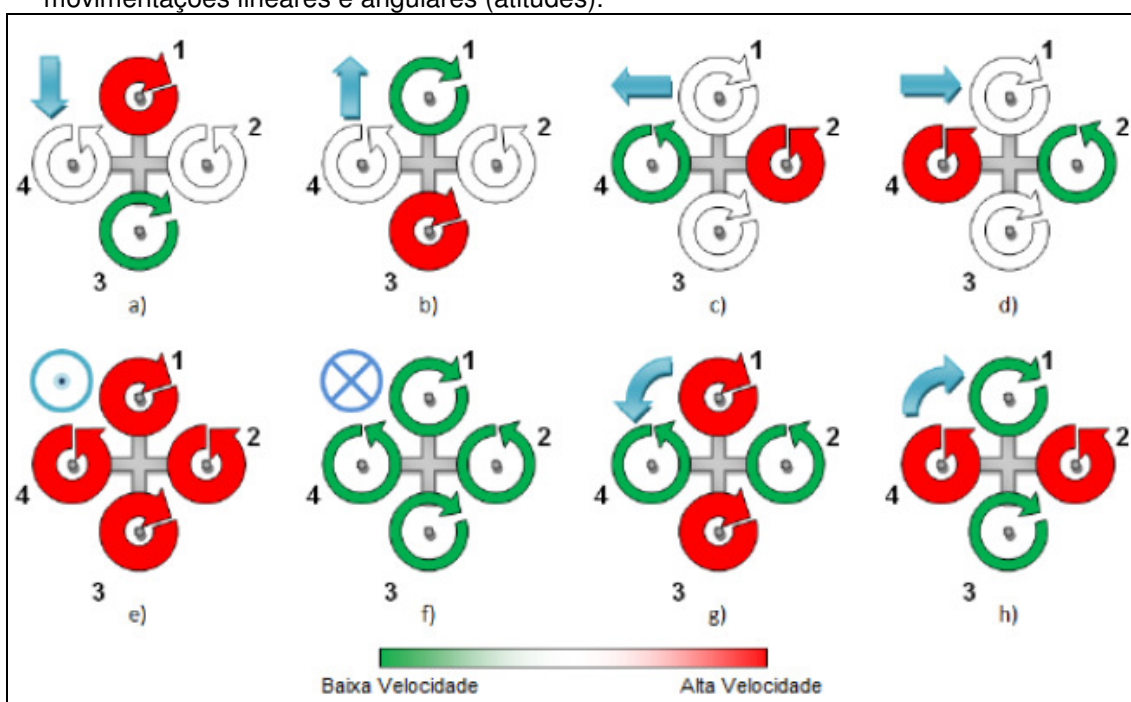
Fonte: PFEIFER (2013).

Quando o quadrirrotor gira em torno do eixo  $x$  tem-se o movimento de rolagem (ângulo Roll), este movimento é conseguido variando-se as velocidades dos rotores 1 e 3, de uma mesma quantia mas de maneira oposta, enquanto que os rotores 2 e 4 permanecem com velocidades iguais. Por exemplo, aumentando-se a velocidade do rotor 1 deve-se diminuir velocidade do rotor 3, e se, os rotores do quadrirrotor giram todos a uma velocidade que vença a força peso causada pela aceleração da gravidade, então, o veículo movimentar-se-á sobre o eixo  $x$ , pode-se dizer que este movimento é para trás ou para frente como mostrado na figura 17, atitudes “a” e “b” (SÁ, 2012).

A movimentação do quadrirrotor em torno do eixo  $y$  é conhecida como Pitch e é realizada de forma análoga a descrita anteriormente, só que agora variando o empuxo produzido pelos rotores 2 e 4 e mantendo constantes os empuxos produzidos por 1 e 3. Quando o rotor 2 girar com velocidade angular maior que 4, o quadrirrotor realizar a uma rotação no sentido positivo(esquerda) em torno do eixo  $y$  e quando a velocidade do rotor 4 for maior que a do rotor 2 a rotação será no sentido negativo (direita) conforme mostra a figura 17, atitudes “c” e “d” (PEGORARO, 2013).

O movimento em torno do seu eixo vertical Z, ou seja, uma guinada, é feito pelo comando Yaw (guinada). Para fazer este giro, seja no sentido horário ou anti-horário, basta aumentar igualmente a velocidade de dois rotores que giram no mesmo sentido, do mesmo modo que se diminui a velocidade dos outros dois motores, e vice-versa. Isto é mostrado na figura 17, atitudes “g” e “h” (SÁ, 2010).

Figura 17 - Variações nas velocidades angulares e respectivos resultados em movimentações lineares e angulares (atitudes).



Fonte: PFEIFER (2013).

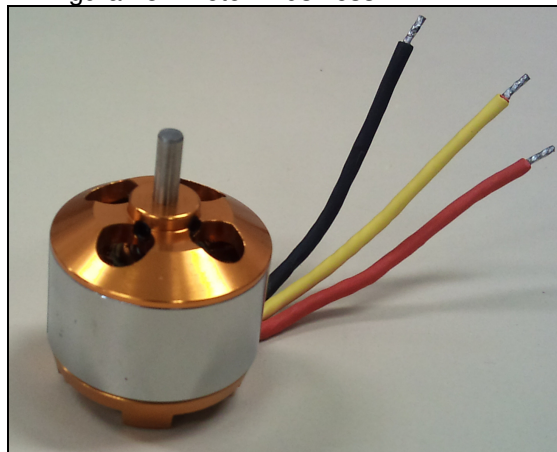
Além dos comandos de posição absoluta do quadricóptero, existe o movimento vertical, que se dá através do comando *throttle* (aceleração), aumentando a velocidade de rotação, o que amplia as forças de elevação. Se as forças aplicadas forem de mesma intensidade para os quatro motores, o quadricóptero irá deslocar-se na vertical de baixo para cima e se esta velocidade diminuir, as forças sofrem um decréscimo. Para ganhar (perder) altitude, basta um aumento (diminuição) proporcional das velocidades dos rotores, conforme mostrado na figura 17, “e” e “f” (MELO, 2010). Todos os movimentos elementares podem ser combinados possibilitando o quadricóptero se movimentar em qualquer direção no espaço.

### 3.3 MOTOR BRUSHLESS

Para a geração do empuxo nas hélices, diversos tipos de motores podem ser utilizados, cada um com suas características. Dentre os diversos tipos de motores, os mais comuns a serem utilizados em aplicações com UAV's são motores de corrente contínua com escovas ou sem escovas denominado Brushless DC Motor (BLDC) (PFEIFER, 2013).

Os motores mais utilizados em aeronaves do tipo quadricóptero são motores brushless (figura 18), ou sem escovas, utilizados por serem muito potentes e eficientes, possuem melhores características de curva de velocidade versus torque, rápida resposta dinâmica, operação sem ruídos dentre outros, apesar de suas pequenas dimensões. Estes motores são versões reduzidas de motores trifásicos síncronos, de ímãs permanentes. Algumas vantagens em relação aos motores DC (COSTA, 2012; PFEIFER, 2013).

Figura 18 - Motor Brushless



Fonte: COSTA (2012).

Os Motores brushless são considerados motores síncronos, onde o rotor é constituído somente de ímãs permanentes polarizados, não necessitando assim de nenhuma alimentação, logo não necessitam de escovas. O estator é composto por bobinas que irão produzir o campo magnético responsável pelo movimento (ALVES, 2012).

Os principais parâmetros para a escolha para este tipo de motor são: tensão de trabalho, corrente máxima e um dado que indica rpm/Volt ou simplesmente chamado de KV; este último determina a rotação máxima que o motor pode atingir (GALLAGHER, 2014).

Ao contrário dos motores de Corrente Contínua (CC), o motor brushless é alimentado por Corrente Alternada (CA). Para gerar um sinal trifásico utiliza-se um circuito eletrônico conhecido como Electronic Speed Controller (ESC) (ALVES, 2012).

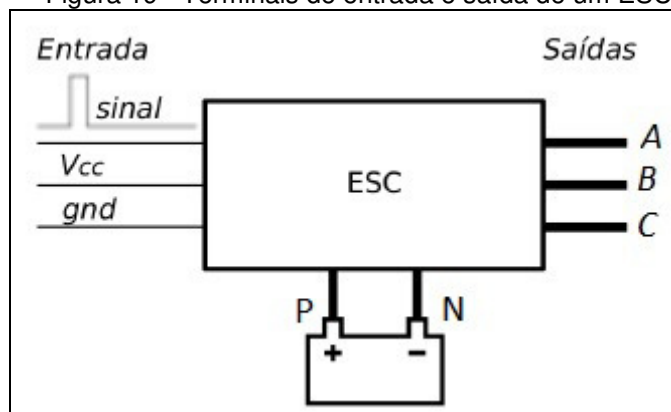
### 3.4 ELETRONIC SPEED CONTROL

A sigla ESC traduzida para o português significa (controlador eletrônico de velocidade). Como o nome já sugere este dispositivo é utilizado para controlar a velocidade de giros de motores elétricos controlados por ele.

Um ESC é basicamente dividido em duas partes: uma de controle e outra de potência. A primeira, normalmente é constituída por um microcontrolador, que a partir de um sinal Pulse-Width Modulation (PWM) (*setpoint*) com período de 20ms, gera três outros, normalmente trapezoidais e defasados entre si de 120°. O período destes pode variar de fabricante para fabricante, sendo que valores típicos são 8KHz e 16kHz (MELO, 2010).

O controlador eletrônico de velocidade é um equipamento que produz correntes senoidais trifásicas a partir de uma fonte de energia de corrente contínua. Esse controlador pode regular a frequência das senóides através de um sinal PWM, e portanto controlar a velocidade dos motores (COSTA, 2012).

Figura 19 - Terminais de entrada e saída de um ESC



Fonte: ALVES (2012).

Observando a figura 19, os terminais A, B e C representam a saída trifásica do controlador e devem ser ligados ao motor brushless. VCC e GND são os terminais de alimentação do circuito interno de controle e P e N são os terminais de alimentação do circuito interno de potência. O terminal denominado de (sinal) é a entrada do sinal de controle do ESC (ALVES, 2012).

### 3.5 BATERIA

Uma das desvantagens de veículos do tipo quadricóptero, é o alto consumo de energia necessário para alimentar os quatro motores. Para a grande demanda de energia da aeronave, é necessário um compromisso entre peso, capacidade de carga, e corrente imediata. Uma bateria que possui um bom desempenho é a bateria de Polímero de Lítio (LiPo). São as mais utilizadas em aplicações de aeromodelismo. As baterias de LiPo são baterias mais leves que os outros tipos de baterias vendidas comercialmente, tendo um peso de aproximadamente 188g. Esta bateria fornece energia tanto para os motores quanto para os circuitos eletrônicos (SÁ, 2012).

A escolha da bateria deve analisar o número de células, a capacidade de carga, em mAh, e a capacidade de corrente imediata. O número de células determina a tensão de saída da bateria, por exemplo 7,4 V com duas células, ou 11,1 V com três células. É preferível se usar baterias de 11,1 V, pois a corrente circulante será menor, e portanto também as perdas, para uma mesma potência (ALVES, 2012).

A escolha errada da bateria pode ter consequências leves, como baixa autonomia, ou severas, como a inutilização da bateria. Uma demanda alta de corrente imediata pode comprometer a estrutura química do polímero, corrompendo irremediavelmente a bateria ou parte das células, caso a essa demanda não seja considerada na escolha (COSTA, 2012).

### 3.6 HÉLICE PROPULSORA

As hélices são as peças mais simples de um quadricóptero, normalmente elas são fabricadas em nylon, fibra de vidro ou fibra de carbono (figura 20) (COSTA, 2012). Existem vários modelos de hélices, que são caracterizadas pelo seu diâmetro, passo e tipo. Essas informações são padronizadas numericamente numa sequência de dígitos, e cada fabricante possui suas designações para tipo de hélices, mas podemos resumí-los em dois grupos: para baixas rotações, normalmente utilizadas em modelos Slow Flyers (SF, RD) e para médias/altas rotações (E, HD, Sport).

Figura 20 - Hélices de diferentes materiais, passos e tamanhos.



Fonte: COSTA (2012).

Um ponto importante nas hélices das aeronaves são a maneira que elas ficam dispostas e o seu sentido de rotação, e também se deve ter em conta o limite de rotação de uma hélice, se não se o respeitar, as hélices

podem se deformar, perder eficiência e até mesmo partir. Por vezes não se dão às hélices a devida importância mas no que diz respeito aos quadrirrotores elas têm um papel preponderante para a eficiência do modelo escolhido.

Na maior parte dos casos, são necessárias duas hélices com o passo normal e 2 outras com passo reverso, isto para que os motores ao funcionarem em rotações opostas anulem o torque Gerado. Outro detalhe importantes na escolha é o diâmetro da hélice, e o seu passo, que é relativo à inclinação de suas pás. O passo da hélice representa o avanço obtido pela hélice em uma rotação (COSTA, 2012).

## 4 MICROCONTROLADOR

Os microcontroladores surgiram aproximadamente dez anos após o surgimento dos primeiros microprocessadores, trata-se de uma evolução da indústria da eletrônica digital para atender as necessidades do mercado. A necessidade se dava pela dificuldade em termos de custos e complexidade dos circuitos digitais em sistemas embarcados que precisasse de um processamento de dados (PEREIRA, 2005).

A definição do microcontrolador seria um componente eletrônico de tamanho reduzido (popularmente chamado de CI ou CHIP), dotado de uma "inteligência" programável, com todos os componentes necessários ao controle de um processo (SOUZA, 2008).

O controle de processos deve ser entendido como o controle de periféricos, tais como: LED, botões, display de segmentos, Display de Cristal Líquido (LCD), resistências, relés, sensores diversos (pressão, temperatura, etc) e muitos outros. São chamados de controles lógicos, pois a operação do sistema baseia-se nas ações lógicas que devem ser executadas, dependendo do estado dos periféricos de entrada e/ou saída (SOUZA, 2008).

O microcontrolador é programável, pois toda a lógica de operação que foi mencionada é estruturada na forma de um programa e gravada dentro do componente. Os microcontroladores permitem o desenvolvimento de projetos compactos e sofisticados, semelhantes em desempenho aos dos microprocessadores, mas com custos muito menores (FORMIGA, 2005).

Um microcontrolador difere de um microprocessador em vários aspectos. Primeiro e o mais importante, é a sua funcionalidade. Para que um microprocessador possa ser usado, outros componentes devem-lhe ser adicionados, tais como memória e componentes para receber e enviar dados. Resumindo, isso significa que o microprocessador é o verdadeiro coração do computador. Por outro lado, o microcontrolador foi projetado para ter tudo num só (SOUZA, 2003).

Um microcontrolador é um pequeno computador com memória e um processador que controla as funções de vários dispositivos cotidianos. Alguns

microcontroladores são projetados para se conectar com facilidade a computadores de mesa para programação para fins especializados. O Arduino é um exemplo de um desses microcontroladores fáceis de programar, é possível construir dispositivos eletrônicos porque você pode controlar suas funções por meio de linguagens de programação (KARVINEN, 2011).

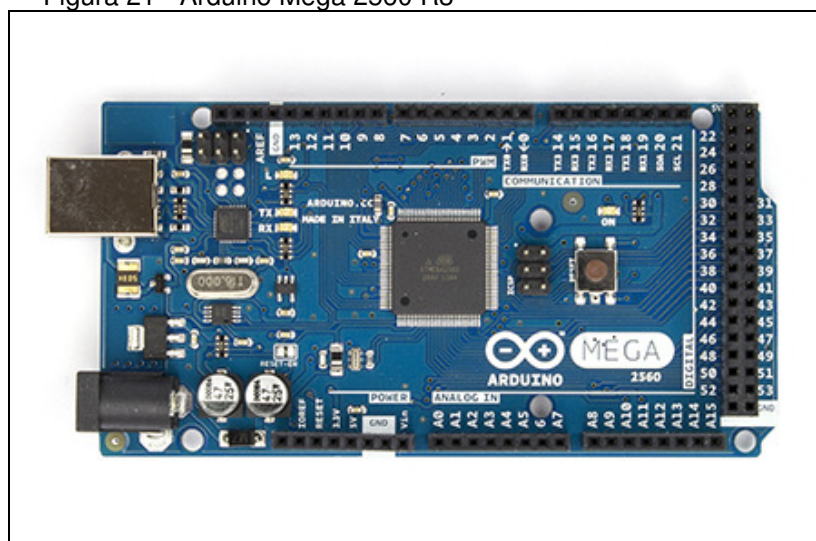
#### 4.1 ARDUINO

Segundo McRoberts, 2011, p. 22:

Um Arduino é um microcontrolador de placa única e um conjunto de software para programá-lo. O hardware consiste em um projeto simples de hardware livre para o controlador, com um processador Atmel AVR e suporte embutido de entrada/saída. O software consiste de uma linguagem de programação padrão e do bootloader que roda na placa.

Em outras palavras, arduino é uma plataforma Open-Source de prototipagem eletrônica baseada em uma placa microcontroladora simples, conta com ambiente de desenvolvimento para escrever os softwares para placa, e são fáceis de usar. O Arduino é o que chamamos de plataforma de computação física ou embarcada, ou seja, um sistema que pode interagir com seu ambiente por meio de hardware e software (ARDUINO.CC, 2014, tradução nossa).

Figura 21 - Arduino Mega 2560 R3



Fonte: ARDUINO.CC (2014).

Arduino é composto por duas partes principais: o Placa Arduino (figura 21), que é a peça de hardware que você trabalha quando você constrói seus dispositivos; e o IDE Arduino, a parte de software que você executa em seu computador. Você usa o ambiente de desenvolvimento para criar um esboço (um pequeno programa de computador) para fazer o upload para a placa Arduino. O programa diz a placa o que fazer (BANZI, 2011, tradução nossa).

Antigamente trabalhar com hardware significava construir circuitos do zero, usando centenas de componentes diferentes, utilizava um circuito diferente para cada aplicação específica, fazendo alterações necessárias, tipo: cortar fios, conexões de solda etc. Com o surgimento das tecnologias digitais e microprocessadores, essas funções que uma vez eram implementadas com fios foram substituídos por programas de software. O software é mais fácil modificar do que o hardware. Com algumas teclas pressionadas, você pode mudar radicalmente a lógica de um dispositivo e tentar duas ou três versões na mesma quantidade de tempo que você levaria para soldar um par de componentes eletrônicos (BANZI, 2011, tradução nossa).

O Arduino pode ser utilizado para desenvolver projetos interativos, através de entradas vindas de uma variedade de sensores ou interruptores, e pode controlar uma variedade de luzes, motores e outras saídas físicas. O Microcontrolador na placa é programável usando a linguagem de programação Arduino (baseado em Wiring) e a IDE do Arduino é baseada em Processing. O Projeto pode rodar em modo Stand-Alone ou pode se comunicar com um software rodando em um computador como por exemplo Flash, Processing, MaxMSP (ARDUINO.CC, 2014, tradução nossa).

O Integrated Development Environment (IDE) (figura 22), um software livre no qual você escreve o código na linguagem que o Arduino compreende (baseada na linguagem C). O IDE permite que você escreva um programa de computador, A “mágica” acontece quando você carrega o esboço para o hardware, o código criado é traduzido para linguagem C, que é a que o arduino entende (mais complicada de entender para iniciantes), é passado para

o compilador avr-gcc, um importante software de código aberto que faz a tradução final para o língua compreendida pelo microcontrolador. Esta última etapa é muito importante, porque é onde Arduino torna nossa vida mais simples, afastando o máximo quanto possível, das complexidades da programação de microcontroladores. O Arduino, então, executará essas instruções, interagindo com o que estiver conectado a ele. Essas ferramentas levam os detalhes complicados de programação de microcontroladores a envolvê-lo em um pacote fácil de usar (ARDUINO.CC, 2014, tradução nossa; MCROBERTS, 2011).

Figura 22 – Integrated Development Environment (IDE).



Fonte: ARDUINO.CC (2014).

O ambiente de programação Arduino é fácil de usar para iniciantes, ele é publicado como ferramentas de código aberto, mas suficientemente flexível para usuários avançados para desenvolverem seus projetos, também disponível para a extensão por programadores experientes interessados (ARDUINO.CC, 2014, tradução nossa).

O hardware e o software do Arduino são ambos open-source, o que significa que o código, os esquemas, o projeto etc. podem ser utilizados

livremente por qualquer pessoa e com qualquer propósito. Como os projetos são de fonte aberta, qualquer placa-clone é 100% compatível com o Arduino e, dessa forma, qualquer software, hardware, shield etc. também será 100% compatível com o Arduino genuíno. O Arduino também pode ser estendido utilizando os shields (escudos), que são placas de circuito contendo outros dispositivos (por exemplo, receptores GPS, displays de LCD, módulos de Ethernet etc.), que você pode simplesmente conectar ao seu Arduino para obter funcionalidades adicionais. Os shields também estendem os pinos até o topo de suas próprias placas de circuito, para que você continue a ter acesso a todos eles (MCROBERTS, 2011).

## 5 SENSORES

De modo a tornar o veículo autônomo é necessário obter informações acerca da atitude e da posição no referencial de coordenadas terrestres. Os controles e movimentos do quadricóptero, geralmente são obtidos por vários sensores como: acelerômetros, giroscópios, altímetros e magnetômetros e a posição geográfica do veículo pode ser determinada por GPS ou por outras tecnologias para ambientes onde o GPS não é eficiente.

Os sensores são componentes importantes e que possibilitam que o veículo se mova de forma mais real e estável possível, e assumem um papel fundamental no veículo pois toda a eficiência do controle depende da precisão das medidas efetuadas por estes sensores. Os sensores utilizados nos projetos de aeronaves tem como função estimar a orientação e posição do centro de massa do quadricóptero, permitindo assim o controle do veículo. No entanto, cada sensor apresenta características particulares (principalmente relacionadas à natureza das grandezas físicas medidas) que afetam a forma como os dados fornecidos pelo mesmo devem ser tratados (SOUZA, 2011).

Estes sensores são muito úteis na aterrissagem e decolagem do veículo e poderão também ser utilizados na detecção de obstáculos.

Mas apenas utilizando os sensores referidos no parágrafo anterior não é possível tornar o voo totalmente autônomo pois torna-se difícil determinar a real posição do veículo no plano  $X$  e  $Y$ . Outros sensores deverão ser utilizados de modo a tornar o voo totalmente autônomo incluindo GPS, sensor de pressão barométrica e um de temperatura para determinação de altitudes superiores a *seis metros* no caso de ambientes exteriores (SOUZA, 2011).

## 5.1 ACELERÔMETRO

Um acelerômetro em termos básicos é um instrumento para medir aceleração. Em outras palavras pode-se dizer que é um componente que se baseia em leis da física para medir aceleração e por consequência a velocidade e localização do objeto ao qual o acelerômetro pertence. Essas medições podem ser feitas em direções de uma, duas e até três dimensões, o que faz deste equipamento um instrumento muito útil. O acelerômetro é um dispositivo que mede a sua variação de velocidade em um dado sentido com relação a cada eixo. Os acelerômetros de três eixos informam as inclinações relacionadas aos eixos tridimensionais (XYZ).

Existem vários modelos de acelerômetro como: o acelerômetro capacitivo, o acelerômetro piezoelétrico, o acelerômetro piezoresistivo e, o mais popular, acelerômetro eletro-mecânico. O Acelerômetro Eletro-Mecânico (MEMS) é o modelo de acelerômetro mais usado, ele possui sensores que detectam a aceleração e a vibração em até três dimensões. Estes sensores são sensíveis e versáteis, permitindo acrescentar novas capacidades, tornando-os mais eficazes.

O movimento medido por este sensor é convertido em um sinal analógico ou digital. No projeto de um veículo aéreo este sensor deve ser preferencialmente inserido o mais próximo possível do centro de gravidade do Quadrotor, para evitar medições falsas, ou seja, medições que não são condizentes com seu atual estado espacial (NASCIMENTO, 2011; SOUZA, 2011).

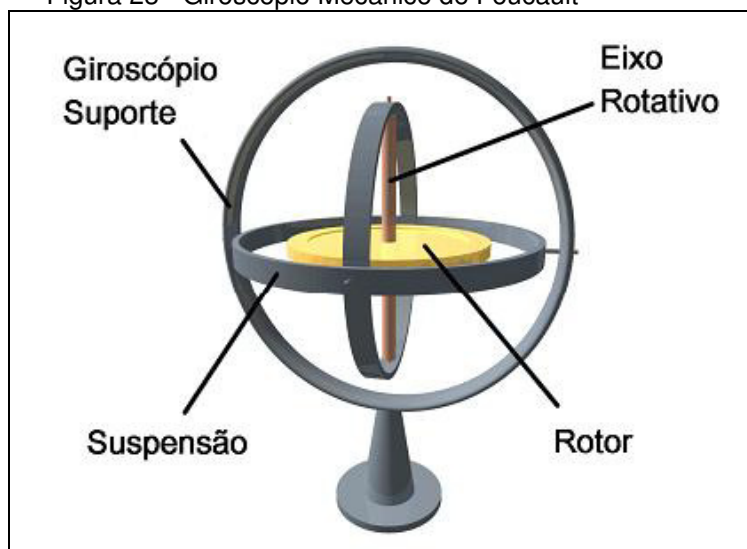
## 5.2 GIROSCÓPIO

O giroscópio, que foi inventado em 1950 por Jean Bernard Léon Foucault, consiste em uma roda giratória, cujo eixo é livre para tomar qualquer orientação e gira no centro de uma estrutura “Gimbal”, que consiste em dois anéis concêntricos. Assim, os anéis podem mover-se para qualquer lado, mantendo-se a roda a girar sempre no mesmo plano paralelo ao original.

Foucault tinha o intuito de demonstrar o movimento de rotação da terra. Conforme podemos observar a figura 23 de um giroscópio, nota-se que ele é um dispositivo que gira em torno de seu próprio eixo, e que quando submetido a uma força ele tende a mudar a orientação do eixo de rotação, fazendo que este eixo invés de mudar de direção, como faria normalmente um corpo que não girasse, ele muda sua orientação para uma direção perpendicular a direção "intuitiva".

Os giroscópios utilizam propriedades mecânicas para produzir estruturas dentro dos semicondutores para medir movimentos e detecção de movimento angular. Eles possuem sensores que possuem duas saídas separadas para cada eixo ao mesmo tempo, uma de valor de saída não amplificado para detectar o movimento angular, e outro valor com uma amplificação de 4 vezes para medidas de alta definição e altas frequências (STMICROELECTRONICS, 2014, tradução nossa).

Figura 23 - Giroscópio Mecânico de Foucault



Fonte: NASCIMENTO (2011).

O giroscópio é um dispositivo de medição ou manutenção de orientação, baseado nos princípios de momento angular. O eixo em rotação tem um efeito de memória que guarda direção fixa em relação ao círculo máximo dispensando as coordenadas geográficas. Este dispositivo informa a inclinação atual em cada eixo. (NASCIMENTO, 2011).

### 5.3 MAGNETÔMETRO

O Magnetômetro é um instrumento usado para medir a intensidade, direção e sentido de campos magnéticos em sua proximidade. Assim, informam baseados no campo magnético do planeta o norte absoluto. Esse dado dará ao veículo um referencial absoluto que poderá ser utilizado nos algoritmos de controle e navegação da aeronave.

Os Magnetômetros são capazes de medir campos magnéticos, assim como a sua orientação. Estes dispositivos têm sido utilizados em aplicações direcionadas para direção ou navegação, como bússolas. Porém, com o desenvolvimento tecnológico, houve uma evolução nesses sensores de forma que ficaram menores, mais precisos, com menor consumo de energia e compatíveis com uma grande parte de dispositivos eletrônicos (NASCIMENTO, 2011).

### 5.4 ALTÍMETRO

O altímetro é um sensor que mede a altitude atual da aeronave. Existem dois tipos de altímetros: os barométricos e os baseados em radar. Os altímetros do tipo barométrico medem a pressão atmosférica e calculam a altura atual de acordo com a pressão, dessa maneira o dispositivo informa a altura em relação ao nível do mar. Já os sensores baseados em radar emitem uma onda em direção ao solo e calcula a altura através do tempo levado para a onda ir e voltar (NASCIMENTO, 2011).

Este sensor é muito importante para controlar o quadricóptero, visto que este dispositivo pode informar a altitude na qual se encontra o *Drone*, permitindo manter o mesmo estável a uma altura desejada, sendo útil também nas operações de decolagem e pouso. Para que se possa medir a altitude do quadricóptero, o sonar deverá ser colocado no centro da estrutura e apontar para baixo (VIEIRA, 2011).

## 5.5 GPS

O *Global Positioning System* (GPS) é a abreviatura de NAVSTAR GPS

(NAVSTAR GPS-NAVigation System with Time And Ranging Global Positioning System). É um sistema de rádio navegação baseado em satélites foi criado e desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos, originalmente com fins militares estratégicos, mas a partir de meados da década de oitenta o seu uso foi estendido a aplicações civis, tendo passado por uma contínua evolução desde então, principalmente no que diz respeito aos equipamentos eletrônicos e programas computacionais que permite a qualquer usuário saber a sua localização, velocidade e tempo, vinte quatro horas por dia, sob quaisquer condições atmosféricas e em qualquer ponto do globo terrestre (PEGORARO, 2013).

O cálculo da posição é determinado a partir da determinação da distância entre o receptor e os satélites. Através das distâncias de pelo menos três satélites, podemos determinar a nossa posição relativa a esses três satélites através da intersecção de três circunferências cujos raios são as distâncias medidas entre o receptor e os satélites. Esse cálculo é também chamado de triangulação.

Um dispositivo de Sistema de Posicionamento Global é um sensor de útil e comumente utilizado para a UAV. Como a maioria das pessoas sabe, um dispositivo GPS pode ser usado para ajudar a determinar as suas próprias posições altitude, longitude e latitude. Um dispositivo GPS tipicamente recebe um sinal a partir de um satélite para calcular estas posições (GALLAGHER, 2014).

O GPS é um sistema de posicionamento (coordenação) relativo ou absoluto, utilizável em qualquer ponto da terra ou nas suas imediações atmosféricas. Atualmente, e cada vez mais, é utilizado nos mais diversos domínios (PEGORARO, 2013).

## **6 COMUNICAÇÃO SEM FIO DE LONGO ALCANCE**

A comunicação sem fio entre controles remotos e aeromodelos é feita por rádio comunicação, uma forma de transmissão de dados baseada em sinais eletromagnéticos em frequências específicas, independente de meio físico.

Em aeromodelismo, para se controlar uma aeronave ou embarcação remotamente, utilizasse um link de Rádio Frequência (RF) do tipo Frequency Modulation (FM) composto por um rádio transmissor e um rádio receptor, cuja portadora pode ser de 72MHz ou 2,4GHz, onde tais frequências são liberadas pelo órgão competente (ANATEL no Brasil) para este fim (MELO, 2010).

É realizada através de um par transceptor, ou seja, um conjunto formado por rádio transmissor e rádio receptor. O transmissor é o módulo responsável por enviar, a partir das entradas de um controlador humano, um sinal de radiofrequência contendo informações ao rádio receptor no quadrirrotor. É no transmissor que a corrente elétrica é transformada em ondas

eletromagnéticas, enviadas ao veículo. O receptor é o módulo responsável por receber os dados, transformando o sinal recebido em corrente elétrica novamente.

A comunicação do quadricóptero com o computador é feita através da placa de desenvolvimento, através de conexão serial feita por um transmissor dedicado. O transmissor que será usado na aeronave real, em modo autônomo deve ter longo alcance, para que seja possível determinar o estado da aeronave e relatórios de inspeção. (COSTA, 2012).

## **7 TRABALHOS CORRELATOS**

Muitos trabalhos estão sendo realizados em relação ao quadricóptero, principalmente nestes últimos anos, algumas dezenas de trabalhos já foram realizados, a maioria destes trabalhos trata de dissertações para atingir o grau de mestre. A seguir discorrer-se-á um breve comentário sobre alguns trabalhos correlatos.

Bresciani em tese apresentada na Lund University, desenvolveu um protótipo de quadricóptero, em que utilizou um controle do tipo PID embarcado em um processador do tipo ARM7. Os sensores utilizados para o controle do protótipo foram um sonar e um módulo infravermelho para estimar a altura do protótipo do chão e um módulo IMU, que possui vários sensores internos para medir a orientação (atitude) do quadricóptero (BRESCIANI, 2008, tradução nossa).

Uma equipe da Universidade Federal de Uberlândia desenvolvem um hardware para o controle autônomo embarcado de um quadricóptero. Contextualizam sobre importância atual dos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT's), suas vantagens e desafios tecnológicos. A partir disto, são apresentados os princípios de voo de aeronaves e também uma fundamentação teórica quanto ao sistema de navegação para a seleção adequada dos sensores e outros componentes do hardware proposto. O sistema final integra uma placa controladora de voo, ArduPilot, e um microcontrolador, STM32F4, é selecionado também um software para estação de terra. Os resultados obtidos garantiram o funcionamento adequado do sistema, o qual apresenta um relevante potencial para o incentivo de diversas pesquisas no âmbito do controle autônomo de VANT's (SILVA et al, 2013).

Também, Guimaraes na sua Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN para obtenção do título de Mestre em Ciências, propôs o desenvolvimento de um quadricóptero e controles de estabilização, com alta capacidade de carga, em uma determinada altitude, sob ângulos de rolagem, guinada e arfagem pré-definidos. A abordagem de controle de estabilização baseia-se numa transformação das variáveis de entrada do sistema afim de realizar o controle de forma desacoplada. Uma arquitetura de hardware e software foi especialmente desenvolvida e implementada para o proposto protótipo experimental usado para testar e validar a abordagem de controle proposta. Os resultados mostraram que os controladores implementados utilizando a estratégia de desacoplamento conseguiram estabilizar o quadricóptero com sucesso, tanto nos ângulos de rolagem e guinada quando na arfagem. Também foi implementado e testado com sucesso um controle de altitude (GUIMARAES, 2012).

A dissertação de Mestrado de Sá, submetida a coordenação do programa de Pós-graduação em Engenharia de Teleinformática da Universidade Federal do Ceará, propôs o desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado do tipo quadricóptero, o seu modelo dinâmico, além das simulações e dos testes de um controlador PID embarcado para estabilização

da estrutura projetada. Os componentes escolhidos para a construção da plataforma atenderam a todos os requisitos de tamanho e peso para que fosse possível o voo, bem como a integração destes componentes. O quadricóptero desenvolvido pode levar cargas extras de até 1 kg, possibilitando levar câmeras de vídeo ou outros dispositivos. O controle PID proposto apresentou bons resultados na estabilização dos ângulos em simulação, sendo sua eficiência verificada nos testes iniciais utilizando a plataforma real. O controlador PID diferenciado demonstrou nas simulações uma resposta mais suave para estabilização, que comparado com o controlador PID clássico pode ser uma melhor alternativa para controle de estabilização (SÁ, 2012).

Um projeto mais recente é apresentado à escola de engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo por Callegaro, ele desenvolveu um veículo aéreo quadricóptero que utilizou a realimentação proveniente de uma unidade inercial composta por vários sensores, para uma sistema de estabilização por meio de controladores discretos do tipo PID, provendo também mecanismo para controle do mesmo. Os sinais provenientes da unidade inercial foram tratados por meio do filtro de Kalman para serem utilizados nos cálculos dos ângulos. O projeto como um todo apresentou resultados positivos e propiciou o estudo de aplicações de diversas áreas envolvidas para o desenvolvimento de um projeto em engenharia, permitindo a abordagem de áreas como processamento digital de sinais, controle, circuitos elétricos e eletrônicos, sistemas digitais, linguagens de programação etc. (GALLEGARO, 2014).

## **8 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO DO DRONE**

Este capítulo aborda o desenvolvimento do trabalho final que visa construir um Drone com uma estrutura do tipo quadricóptero, mostrar detalhadamente cada componente utilizado para construção mecânica e eletrônica da plataforma, e como objetivo principal, implementar um algoritmo de controle autônomo de navegação, onde o sistema de controle receberá por parâmetro coordenadas geográficas, e com base nas leituras dos sensores embarcados, permitir que o Drone seja capaz realizar partes de uma missão de

forma autônoma. O Drone efetuará o deslocamento geográfico até o ponto de coordenada desejada. Contará também com a implementação de uma interface Web para telemetria, que atuará como fonte de dados para captação de dados do sistema em tempo real.

Este trabalho aborda seus conteúdos de maneira simples e objetiva os conceitos necessários ao desenvolvimento de um Drone capaz de efetuar uma missão de forma autônoma. Deseja-se que ele possa posteriormente servir como uma base para pesquisa de acadêmicos interessados no tema.

## 8.1 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho foi caracterizada por pesquisas bibliográficas, visando apresentar de forma significativa a teoria que dá suporte ao estudo aerodinâmico, destacando os principais conceitos que englobam explicações preponderantes para realização de uma análise aerodinâmica, direcionando-os às características de um quadricóptero

Deu-se preferência para artigos publicados em periódicos internacionais, teses e dissertações de mestrado, doutorado. Além disso, foram pesquisados vários projetos que utilizavam o quadricóptero como base para os seus estudos e de preferência com data mais recente, pois isso facilita a identificação dos problemas que ainda são enfrentados em sua construção e controle. Foi observada a relevância dada aos trabalhos citados, via quantidade de citações em outros trabalhos ou por assunto abordado, de forma direta (objetivo) ou no desenvolvimento do trabalho, possibilitando atingir a finalidade a que se propõe este projeto.

Para realização dos objetivos propostos foi cumprida todas as etapas metodológicas. Logo após o levantamento bibliográfico, efetuou-se o arrolamento de requisitos de software e hardware a serem adquiridos ou utilizados, após a conclusão desta etapa tinha-se uma lista de peças e componentes a serem adquiridos. Na tabela 1 é mostrado todos os itens adquiridos, listados com seus valores em reais e suas devidas quantidades.

Tabela 1 - Preços dos componentes que utilizados no projeto final

<b>Descrição dos componentes</b>	<b>Valor unitário</b>	<b>Qtd</b>	<b>Valor Total</b>
Arduino Mega Rev3 2560	R\$ 72,90	1	R\$ 72,90
Frame V3 Pcb 450mm F450	R\$ 115,00	1	R\$ 115,00
Motor Turnigy D2830/11 Brushless	R\$ 54,90	4	R\$ 219,60
Esc 30a Com BEC	R\$ 29,40	4	R\$ 117,60
Bateria Lipo Power 3s	R\$ 89,00	1	R\$ 89,00
TTL 3DR Telemetry Kit 433MHz	R\$ 78,27	1	R\$ 78,27
Hélices Turnigy SF 8 X 4.5	R\$ 16,01	4	R\$ 64,04
IMU GY-80	R\$ 54,90	1	R\$ 54,90
Radio Controle HK6S 6Ch	R\$ 240,00	1	R\$ 240,00
Conector Bullet 3.5mm	R\$ 6,00	4	R\$ 24,00
Sensor Ultra Sônico Hc-sr04	R\$ 6,93	1	R\$ 6,93
Módulo Receptor Gps Me-1000rw	R\$ 99,00	1	R\$ 99,00
Lipo Buzzer Sonoro Digital	R\$ 15,99	1	R\$ 15,99
<b>Total</b>			<b>R\$ 1.197,23</b>

Fonte: Do autor

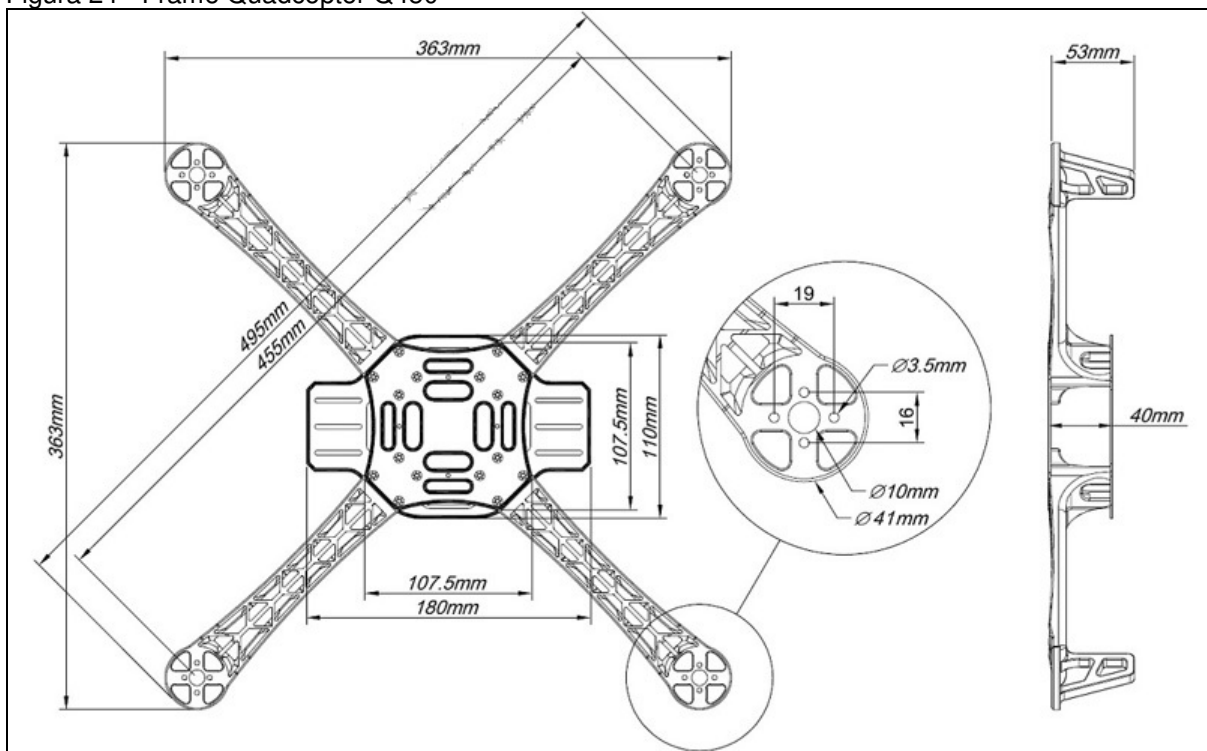
Na etapa seguinte foram realizadas pesquisas práticas dos princípios de funcionamento dos quadricópteros, conceitos de aerodinâmica, pesquisa prática do funcionamento dos motores e seus controladores, sobre manipulação dos dados de todos os sensores envolvidos no projeto. Foram realizados estudos dos conceitos de Sistema de posicionamento Global e de navegação geográfica para serem aplicados no software de controle autônomo do quadricóptero.

A parte física do projeto foi toda baseada na plataforma Open-Source MultiWii. Com os componentes da tabela 1 em mãos, iniciou-se a montagem do protótipo do quadricóptero. Para as atividades de desenvolvimento do hardware foram necessários a aquisição de instrumentação para trabalhar com a parte eletrônica, instrumentos como multímetro, ferro de soldar, estanho para soldas, alicates, fitas isolantes, chaves de fenda e Philips etc. Para a parte do software utilizou-se apenas um computador com entradas USB e a IDE de desenvolvimento para Arduino.

### **8.1.1 Frame de Montagem**

O Quadro escolhido para o projeto foi Q450 V3 Fiber do tipo simples, na cor vermelha e branca, foi efetuada a compra do produto, mas devido problemas logísticos, foi enviado um produto com as mesmas dimensões, porém numa versão mais nova, o quadro modelo Q450 Ghost Edition, também chamado de Frame, possui 455 milímetros de largura e 53 milímetros de altura fabricado em material plástico transparente de boa qualidade, tem peso aproximado 280 gramas (sem componentes eletrônicos). A edição Q450 Ghost (figura 24) é uma versão que contém vários LEDs de alta intensidade em seus braços, adequados para voos noturnos.

Figura 24 - Frame Quadcopter Q450



Fonte: ART OF CIRCUITS (2015).

Esta estrutura possui o formato de X, e possui conexões PCB Q450 recursos integrados para soldar os ESC's direto na estrutura, isso elimina a necessidade de quadro de distribuição de energia externo, ou de um emaranhado de multiconectores, mantendo o layout dos componentes eletrônicos organizados e com um bom aspecto visual.

Para montagem, a estrutura possui mangas de bronze pré-threaded para todos os parafusos do quadro, foi utilizado um tamanho fixo de parafusos

para toda construção, exigindo apenas um tamanho de chave sextavada para montar.

### **8.1.2 Atuadores**

Os atuadores são componentes do quadricóptero que disparam algum evento, geram movimentos, modificam ações, atendendo a comandos que podem ser automáticos ou manuais. O quadricóptero do projeto possui quatro atuadores. Cada atuador é composto pelo conjunto ESC e os componentes do sistema de propulsão como hélices e motores. Será visto mais adiante as propriedades específicas de cada um.

#### **8.1.2.1 Sistema de Propulsão**

O sistema de propulsão é formado pelo conjunto motor e Hélice. A escolha desse conjunto é de suma importância para o projeto, pois a única força de propulsão existente no Drone do tipo quadricóptero é gerada pela força de rotação da Hélice, que é responsável pela suspensão da aeronave. Para o projeto foi considerado na escolha do sistema de propulsão características do motor e hélice onde o resultado torna o sistema mais eficiente. Para que seja possível o voo, a força gerada pela rotação das quatro hélices deve ser maior que o peso total da aeronave.

#### **8.1.2.2 Motores**

O motor brushless utilizado no quadricóptero é da marca Turnigy modelo 2830/11 1000KV<sup>1</sup> e pode ser visto na figura 25. Os motores Turnigy são já bem conhecidos entre os aeromodelistas inclusive este que está entre os mais baratos da marca conforme pesquisa efetuada.

---

<sup>1</sup>Um motor 1000 KV significa que seu eixo gira 1000 voltas por minuto por cada volt

Figura 25 - Motor Turnigy Modelo D2830/11 1000KV



Fonte: Mercadolivre.com (2015).

Segundo fabricante sua eficiência, durabilidade e confiabilidade o tornam uma ótima opção como escolha do motor no projeto. Suas principais características são apresentadas na figura 26.

Figura 26 - Tabela de configuração do produto

Kv(rpm/v)	1000	
Weight (g)	52	
Max Current(A)	21	
Resistance(mh)	0	
Max Voltage(V)	15	
Power(W)	210	
Shaft A (mm)	3.17	
Length B (mm)	30	
Diameter C (mm)	28	
Can Length (mm)	14	
Total Length E (mm)	45	

Fonte: HOBBYKING.COM (2015).

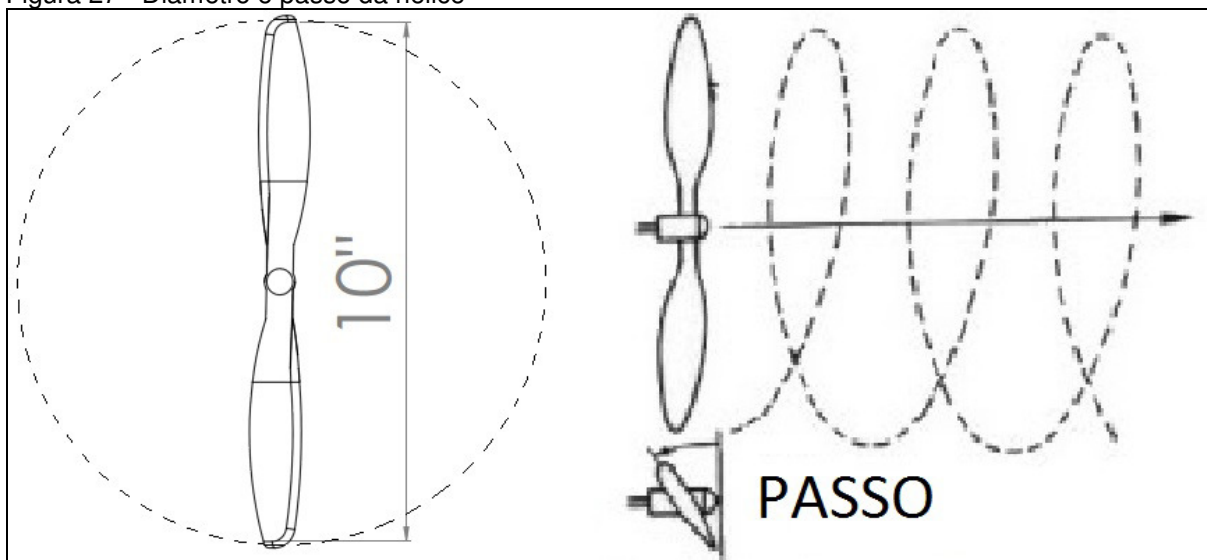
A hélice sugerida para este motor está entre 8 X 4 polegadas se estiver utilizando a bateria do tipo 4S, 10 X 4.7 se a bateria for do tipo 3S e 10 X 7 se do tipo 2S, o ESC recomendado com corrente de trabalho 30A. Junto com motor adquirido veio parafusos de fixação e suporte, com tamanho adequado para colocação no Frame Q450, Adaptadores de hélice Spinner. Diferente dos motores de corrente contínua (CC) o motor do tipo brushless é

alimentado por corrente alternada (CA). Para disparar o motor é necessária um sinal trifásico que gerado pela ESC. A hélice escolhida para o motor descrito e o funcionamento do ESC são discutidos nas próximas seções.

### 8.1.2.3 Hélices

Para escolher as hélices levou-se em consideração a disponibilidade de configurações de comprimento e passo, e a compatibilidade dessas configurações com os motores.

Figura 27 - Diâmetro e passo da hélice



Fonte: ALVES (2012).

A escolha da hélice está diretamente relacionada com a força de propulsão dos motores, Portanto, quanto maior for o comprimento da hélice, maior será o torque inicial necessário para fazê-las girarem. O tamanho é dado pelo diâmetro do círculo descrito quando a hélice gira, enquanto que o passo da hélice representa o avanço obtido pela hélice em uma rotação (figura 27).

Deve-se considerar também a existência de um conjunto de hélices equivalentes com passo invertido, porque quando o quadricóptero estiver em funcionamento, dois dos seus motores girarão no sentido horário, enquanto os outros dois irão girar no sentido anti-horário. Isto acontece para compensar o

momento angular do corpo em torno do eixo Z conforme já mencionado no Capítulo 3.

Para execução do projeto foram testados três diâmetros diferentes de hélices 8X4, 9X4.5 e 10X4.7, com o objetivo de testar os efeitos sobre a dinâmica de voo resultantes da alteração do momento de inércia sobre os motores utilizados. Utilizou-se dois pares de hélices rotativas e contra rotativas (com ângulo de incidência das pás invertido). Na figura 28 é possível perceber a diferença de diâmetro entre as três hélices utilizadas.

Figura 28 - Comparação das hélices utilizadas



Fonte: Do autor

Dentre os vários materiais em que as hélices são fabricadas, escolheu-se as fabricadas em material plástico ABS, não são as melhores como as de fibra de carbono, mas são baratas e mais seguras, pois são as recomendadas para iniciantes pois são muito propícias a quebras e se, caso acontecesse um acidente por exemplo, uma hélice partisse com o aero em pleno voo e arremessasse uma das pás sobre uma pessoa, os ferimentos seriam insignificantes em comparação com uma hélice fabricada com fibra de carbono que um material rígido e cortante.

A tabela do fabricante do motor Turnigy D2830/11 que foi o motor escolhido para o protótipo recomenda-se o uso de hélices 10X4,7, 10 polegadas de diâmetro, com passo de 4.7 polegadas, que foi o primeiro diâmetros de hélice adquirida, com essa configuração cada motor geraria um força de empuxo de aproximadamente 900 gramas.

#### 8.1.2.4 ESC

O ESC é responsável por gerar o sinal trifásico a partir da corrente contínua fornecida pela bateria de LiPo. O controle de velocidade feito pelo ESC é a partir de uma entrada PWM de 50Hz/60Hz, o sinais de referência são enviados pelo controlador em uma de suas portas PWM. O ESC utilizado é da Marca Hobbypower com a capacidade de fornecer a corrente máxima de 30A. segundo fabricante é aconselhável que a corrente máxima suportada pelo ESC deve ser sempre maior em relação a corrente máxima especificada pelo motor, para evitar a queima do mesmo.

Figura 29 - ESC Hobbypower 30A



Fonte: Do autor

O ESC utilizado é mostrado na figura 29. Ele pode ser alimentado com uma tensão entre 4 e 16 volts, é do tipo 3S, ou seja, é composto por três células e pesa aproximadamente 25g. O ESC adquirido também possui uma

saída estabilizada de 5V/2A chamado de Battery Eliminator Circuit (BEC), que é convertida a partir dos 11.1V da bateria num dispositivo eletrônico interno do ESC, essas características são encontradas em alguns modelos de ESCs, no projeto é utilizado para alimentar o receptor do Rádio Controle, o Arduino Mega 2560, os sensores, o circuito de telemetria 3DR, o modulo BlueTooth, módulo GPS e alguns LEDs acoplados. A escolha do ESC foi feita com base na corrente do motor e bateria utilizada.

### 8.2.3 Componentes mecânicos

A escolha da estrutura mecânica é muito importante pois impacta relativamente na performance e estabilidade da aeronave. O quadricóptero possui uma estrutura mecânica simples, trata-se de uma estrutura Cruzada em forma de X, onde o circuito de controle, sensores, circuitos de comunicação, alimentação ficam agrupados no centro de massa do veículo, e nas pontas do Quadro ficam os motores e Hélices.

### 8.1.4 Arquitetura do Sistema

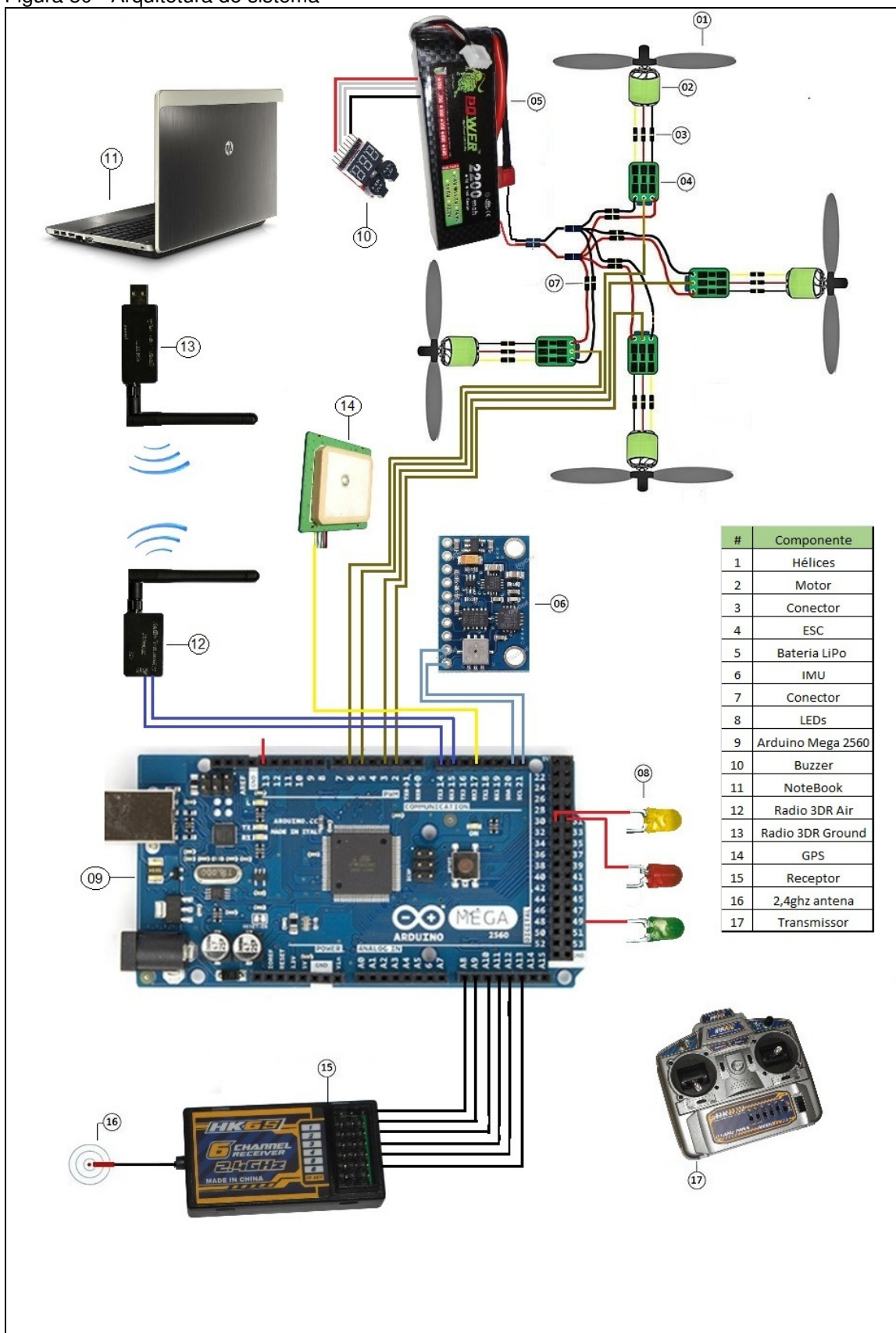
O quadricóptero do projeto é constituído de um conjunto de quadro motores do tipo brushless, e cada motor com uma hélice de oito polegadas com passo de quatro e meio, do tipo SF projetadas para baixas rotações, os motores estão localizados nos extremos de uma estrutura em forma de X, Frame como é chamada. Cada motor está ligado a um ESC, que é encarregado pelo controle de velocidade. Na prática, este dispositivo possui internamente um microcontrolador e alguns transistores FETs, ele recebe do Arduino um sinal PWM e aciona o motor de acordo com o período da onda PWM. Os ESCs são conectados diretamente a uma bateria do tipo LiPo, de três células capaz de fornecer até 12.6 volts contínuos.

Os ESCs possuem internamente o circuito BEC, que fornece uma saída estabilizada de 5V que é utilizado para alimentação do Arduino Mega

2560, que por sua vez possui um regulador de tensão de 3.3 volts que é utilizado para alimentar a unidade inercial que comunica com o Arduino Mega a partir dos canais SDA e SCL utilizando o protocolo I2C. o módulo receptor do rádio também utiliza a saída de 5 volts dos ESCs, ele recebe o sinal do rádio controle a frequência de 2.4ghz, utilizando modulação PPA ou PCM.

O módulo GPS é alimentado com uma das saídas de 5 volts do Arduino Mega, eles utilizam uma das portas serial para comunicação. O kit 3DR Telemetry Air também utiliza como alimentação uma das saídas de 5 volts do Arduino Mega, ele está conectado a uma das portas serial do Arduino, e recebe o sinal do transmissor na frequência 433Mhz da estação base, vindo interface web que envia as coordenadas para execução da missão autônoma. A estrutura do sistema descrita é mostrada na figura 30.

Figura 30 - Arquitetura do sistema

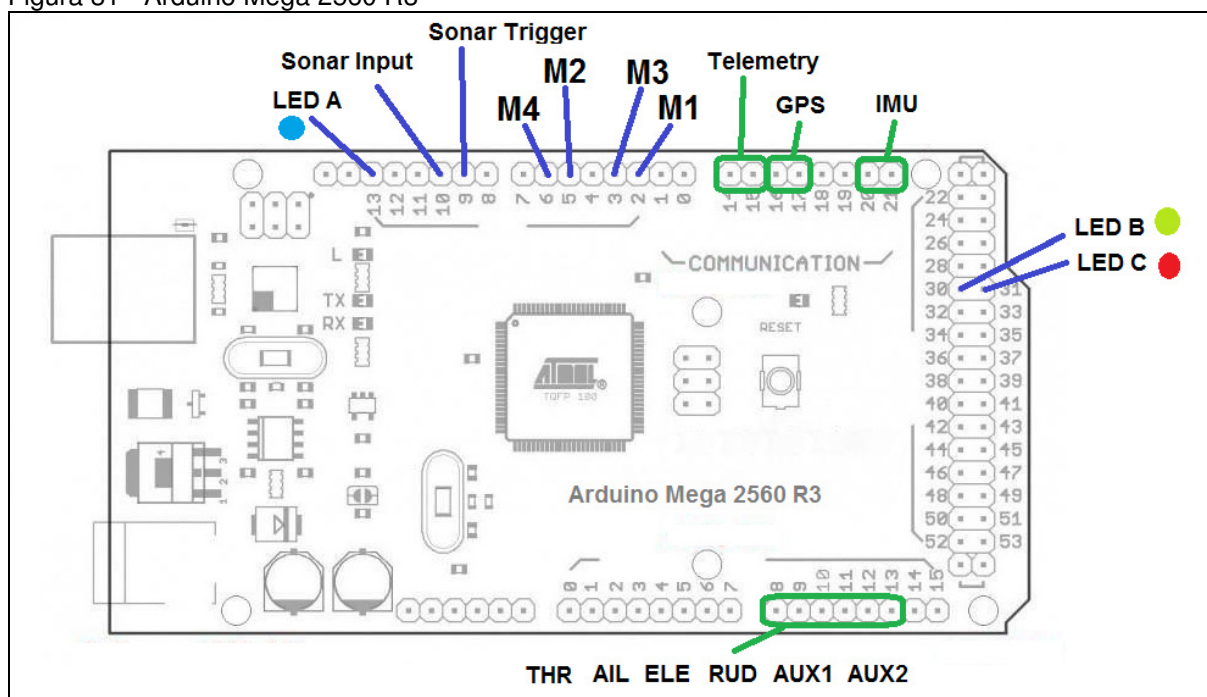


Fonte: Do Autor

### 8.1.4.1 Placa Microcontroladora

A placa microcontroladora contém a unidade de processamento que é responsável pelo tratamento dos dados enviados por rádio, sinais provenientes dos sensores e unidades de comunicação, e execução do algoritmo de controle de estabilização e navegação. A parte de controle e eletrônica do quadricóptero foi desenvolvida sob uma placa de desenvolvimento Arduino Mega2560 (figura 31), é uma placa baseada no microcontrolador ATmega2560, que apesar de seu custo mais elevado, apresenta uma maior capacidade de processamento e versatilidade que outros microcontroladores similares.

Figura 31 - Arduino Mega 2560 R3



Fonte: Do Autor

O Arduino Mega 2560 tem 54 pinos digitais de entrada / saída (dos quais 15 podem ser usados como saídas PWM), através da programação embarcada foi possível gerar os sinais PWM para acionamento dos ESCs que são responsáveis pelo controle de velocidade dos motores. Possui 16 entradas analógicas, sendo que as entradas de 8 à 13 são utilizadas no receptor do rádio. Contem quatro portas seriais de hardware do tipo Universal

Asynchronous Receiver/Transmitter (UART), com um oscilador de cristal a 16 MHz, onde das quatro, três portas estão sendo utilizadas, uma no rádio 3DR responsável pela telemetria, a porta dois faz a comunicação com o módulo GPS e porta um foi conectada ao módulo bluetooth.

Possui um barramento serial multi-mestre que é utilizado para comunicação com a unidade inercial, chamado de Two-Wire Interface (TWI), este na verdade é a implementação do protocolo Inter-Integrated Circuit (I2C), possui este outro nome devido a questões de direitos autorais. São utilizados os pino 20 para o sinal Serial-Data (SDA) que é um sinal bidirecional para os dados, e o pino 21 para o sinal Serial-Clock (SCL) que é o sinal de clock, que é utilizado para sincronizar todas as transferências de dados.

Ele possui uma conexão Universal Serial Bus USB que fornece uma porta virtual para o software no computador, que foi utilizada para gravação do firmware controlador e depuração do software, a placa pode operar de um fornecimento externo de 6 a 20 volts, no projeto ele é alimentado no pino VIN com 5 volts providos pelo BEC do ESC, e a partir do seu próprio regulador de 3.3v alimenta a Unidade Inercial. Foi necessário expandir nossos conhecimentos em linguagem C, pois o arduino é uma placa de desenvolvimento programável em linguagem de alto nível (C, C++), temos que utilizar dos melhores métodos de programação de que a linguagem permite, para otimizarmos o tempo de processamento do software, que é um fator relevante para uma bom funcionamento do controle de estabilidade e navegação.

Se as funções realizadas pelo software não forem bem programadas, vão gastar muito tempo de processamento. O Arduino Mega conta com 256 KB de memória flash para armazenamento de código (dos quais 8 KB é usado para o bootloader), 8 KB de SRAM e 4 KB de memória EEPROM que pode ser lido e escrito com a biblioteca EEPROM onde são gravadas as configurações padrão do quadricóptero.

#### 8.1.4.2 Telemetria

O kit de comunicação por radiofrequência foi constituído por dois módulos transceptores que transmitem dados através de sinalização digital numa frequência de 433 MHz, é bastante compacto, possui alta sensibilidade, e seu desempenho é superior aos modelos mais conhecidos, como o Xbee. Possui alta potência de saída, e um ótimo alcance (aproximadamente um quilômetro), o transmissor é utilizado no quadricóptero em modo autônomo, enviando dados como, estado atual do Drone, e os dados das leituras dos sensores em tempo real. Os rádios e o firmware de controle foram configurados para trabalhar em uma velocidade máxima de transmissão de 250 kbps, onde um rádio fica junto a um computador(Ground) conectado a entrada USB e o outro com o quadricóptero(Air), ambos utilizam um sistema de comunicação half-duplex, com uma interface padrão 5V TTL UART (figura 32).

Figura 32 - 3DR Radio Telemetry Kit 433MHz



Fonte: HOBBYKING.COM (2015).

#### 8.1.4.3 Controle Remoto

Para auxílio nos testes, foi adquirido um controle remoto comercial padrão para aeromodelismo, figura 33, modelo HobbyKing HK6S composto de seis canais, dos quais para o controle do quadricóptero são necessários apenas

4 canais, os outros 2 são canais auxiliares, que foram configurados para ativar o modo de voo autônomo.

Figura 33 - Rádio HobbyKing Modelo HK6S



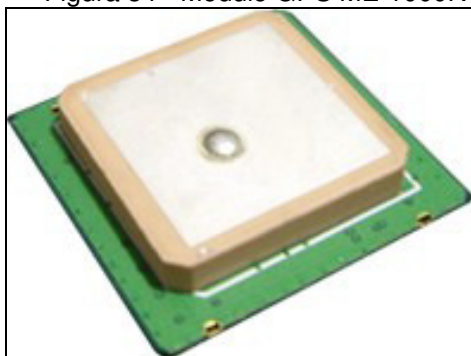
Fonte: HOBBYKING.COM (2015).

O controle HK6S trabalha na frequência de 2.4Ghz, foram efetuados testes para verificar a distância de transmissão e o resultado foi aproximadamente 1000mts. O presente quadricóptero pode ser controlado tanto por controle remoto ou voar autônomo com a ajuda de outros dispositivos acoplados, pode se optar a qualquer momento pela mudança do voo de forma automática ou de forma manual.

#### 8.1.4.4 GPS

O ME-1000RW na figura 34 é um módulo receptor de GPS compacto que funciona a 1Hz, ou seja a cada segundo ele atualiza a sua posição, sua conexão de dados é de 9600 bauds com oito bits de dados, nenhuma paridade e um bit de parada (9600, 8, N, 1), ele é extremamente versátil, pois sua alimentação é flexível, funciona entre 3.8 a 8 volts DC, sua antena é embutida, sendo desnecessário usar antena externa. Isto simplifica e reduz o tamanho do projeto (DatasheetME-1000RW, 2009).

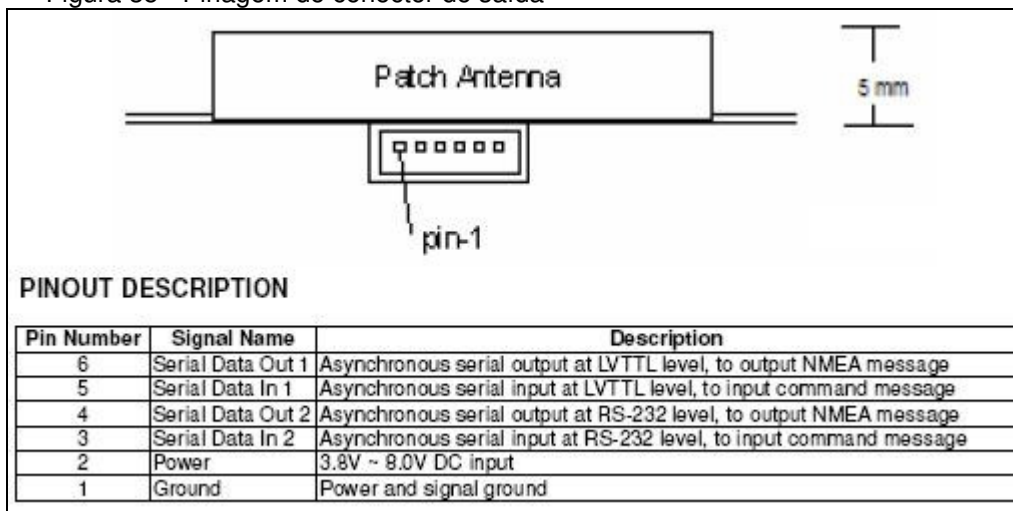
Figura 34 - Módulo GPS ME-1000RW



Fonte: DatasheetME-1000RW (2009).

A antena é conectada ao receptor através de um LNA. (Amplificador de Baixo Ruído). O receptor tem 51 canais de aquisição e 14 canais de rastreamento que são capazes de receber sinais de até 65 satélites GPS e informar a posição e o tempo precisos para serem lidos nas portas seriais. O Módulo possui duas saídas seriais uma nível LVTTTL e outra RS232. Um dos pontos positivos que influenciou na escolha deste módulo é saída LVTTTL (figura 35), ela pode ser ligada diretamente no Arduino Mega sem qualquer outro hardware intermediário para converter os dados (DatasheetME-1000RW, 2009).

Figura 35 - Pinagem do conector de saída



Fonte: DatasheetME-1000RW (2009).

Este módulo GPS possui bateria de backup interna para manter os dados automaticamente, mesmo que desligado, fazendo com que seja rápida

qualquer posterior reaquisição, mesmo com partida a frio. O protocolo transmitido pela interface serial é baseado na especificação da interface da National Marine Electronics Association's (NMEA). A saída de dados deste GPS é padrão NMEA-0183 V3.01. O datum dele é o WGS84, pois todas as coordenadas (latitude e longitude) indicadas pelo GPS são baseadas neste referencial, é o padrão mais utilizado no mundo.

O padrão de dados NMEA é compatível com a plataforma MultiWii, e foi configurado no firmware de controle. As seguintes sentenças NMEA, e suas respectivas informações, são fornecidas por padrão pelo GPS adquirido:

- GGA - Dados de localização, como: horário, latitude, longitude, número de satélites em uso, precisão, altitude em relação ao nível do mar, dados sobre o uso de DGPS;
- GSA - Modo de operação do receptor GPS, satélites usados para navegação e valores de diluição de sinal;
- RMC - Horário, data, posição, direção/sentido da navegação, velocidade;
- VTG - Direção/sentido do deslocamento (se houver deslocamento) e velocidade;
- GSV - Informação individual e coletiva sobre os satélites, como: Número de satélites a vista, identificação de cada um, localização no céu e nível de sinal;

Por usar um chipset Skytraq Venus 6, o ME-1000 é altamente sensível, estável e tem ótima qualidade de recepção - detectando sinais de satélites de até -161dBm. Ele possui no seu corpo um LED que quando pisca intermitente, indica que está recebendo os dados dos satélites.

#### **8.1.5 Firmware de Controle**

O firmware de controle foi desenvolvido sob a plataforma Arduino Mega, que permitiu técnicas avançadas de controle em tempo real, realizando os procedimentos necessários para manter o quadricóptero na trajetória e altitude desejada. No início do projeto o desejo era desenvolver um Drone utilizando o

Arduino e fazer toda a programação de controle de estabilização e navegação desde o zero. Após efetuar várias pesquisas e conversas com pessoas da Engenharia Mecatrônica e Tecnólogos em Automação Industrial, foi visto que além do conhecimento em programação para Arduino, seria necessário conhecimento aprofundado de métodos de controle Proporcional Integral Derivativos (PID) e outros vários conceitos de física e eletrônica. Esse não era o caso, decidiu-se partir para uma solução intermediária. De todos os projetos de controladores de voo para quadricópteros procurados foi escolhido o Software MultiWii.

MultiWii é um projeto de código aberto, é um software de uso geral, capaz de controlar um tricóptero, um quadricóptero ou um hexacóptero. Ele está disponível como software Open Source sob licença GPL. Ele é totalmente compatível com a plataforma Arduino, no mercado existe várias placas controladoras de voo que utilizam este software, ele é uma boa escolha para quem domina a programação com Arduino, ou seja qualquer desenvolvedor pode fazer suas próprias programações com base no código aberto MultiWii.

O software foi inicialmente desenvolvido para suportar o console do Nintendo Wii, giroscópios e acelerômetros. Possui uma comunidade bastante ativa e seu código evolui constantemente, por conseguinte, hoje possui suporte para utilizamos magnetômetros, barômetros digitais, GPS, sonar, e uma plataforma de voo muito estável pode ser alcançada com alguns testes de campo. Antes de fazer o Upload do software para o Arduino Mega foi necessário efetuar algumas configurações importantes no código, as configurações foram definidas no arquivo config.h. Primeiramente foi definido o tipo de aeronave a ser controlada (parâmetro utilizado QUADX).

Minthrottler motor, que é o comando mínimo de aceleração enviado para ESC, é o valor mínimo do motor quando esta e macha lenta (parâmetros utilizado MINTHROTTLE 1100). Maxthrottle motor, que é o valor máximo do comando de aceleração do motor que pode ser aumentado até 2000 (parâmetro utilizado MAXTHROTTLE 1850). Mincommand, que é o valor inicial de comando quando os motores não estão armados (parâmetro utilizado MINCOMMAND 1000).

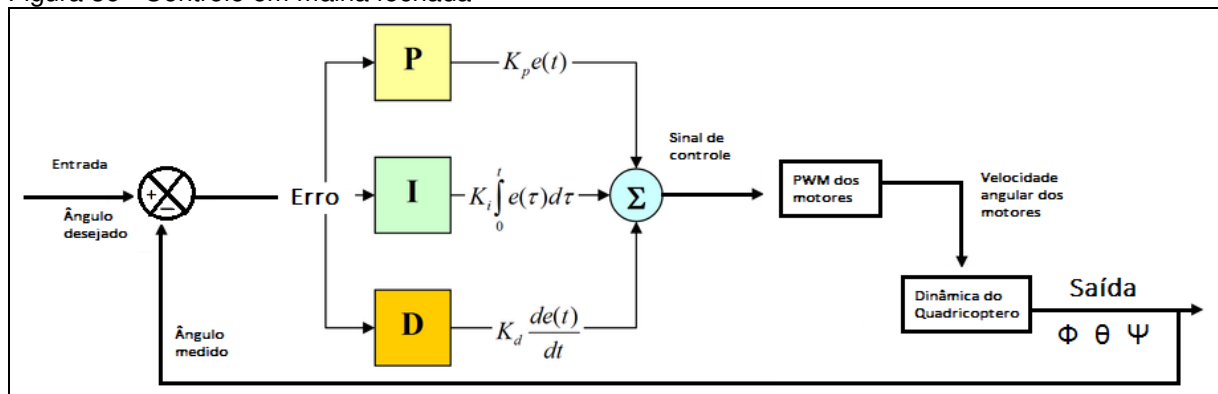
Definição de placas e sensores, onde foi setada a Unidade Inercial adquirida par o projeto (parâmetro utilizado GY\_80). O sonar escolhido para o projeto não estava previsto no código padrão da plataforma MultiWii, sendo necessária a inclusão da biblioteca do sonar HC-Sr04 no código fonte e personalização do tratamento dos dados recebidos por este sensor (parâmetro utilizado HCSR04).

Parâmetro de configuração do Radio TX deadband, defini uma zona neutra do comando do stick do controle remoto, dentro desta variação o controlador considera como ponto morto de comando (parâmetro utilizado DEADBAND 8). Definição de comunicação com o Módulo GPS, foi definido que será utilizado a comunicação serial com o GPS, e a velocidade de comunicação 9600 baudrate que é velocidade padrão do módulo GPS ME-1000RW, o protocolo do GPS setado é o padrão NMEA (parâmetros GPS\_SERIAL 2, GPS\_BAUD 9600, NMEA).

#### 8.1.5.1 Controle Proporcional, Integrativo e Derivativo (PID)

Uma das partes mais importantes do código de controle do quadricóptero é o método de Controle PID, o quadricóptero utiliza um esquema de controle em malha fechada responsável pela sua estabilidade e capacidade para manobras (figura XXX). O controlador PID é o método mais utilizado na indústria. Este controlador é traduzido em linhas de código de software do Arduino e tenta operar sobre o sinal do erro, que seria a diferença entre o ângulo desejado e o estimado, calculando entre uma medição na saída do controlador (medidos pelos giroscópios ou acelerômetro usado como inclinômetro) e um ponto de referência de entrada (posição do stick do rádio controle) utilizando as medidas necessárias para ajustar a saída do processo, são valores ajustados dos ângulos que serão convertidos em sinais PWM que impulsiona os motores para tentar voltar a sua posição inicial.

Figura 36 - Controle em malha fechada



Fonte: Do autor

Controlador PID envolve três parâmetros distintos: o controle proporcional, o controle integral e o controle derivativo. A variação de cada um destes parâmetros alteram a eficácia da estabilização da aeronave.

No controle proporcional a saída do controlador é diretamente proporcional a sua entrada, sendo  $e(t)$  o sinal de erro e  $K_p$  a constante proporcional. Já no controle integral a saída do controlador é proporcional à integral do sinal de erro, onde  $K_i$  é a constante de ganho integral. Para a forma de controle derivativo, a saída do controlador é proporcional à taxa de variação do erro, onde  $K_d$  é o ganho derivativo.

Um controlador com ação proporcional, integral e derivativa (PID) é um controlador que abrange os três modos de controle (SÁ, 2012).

Para que o controle PID possa executar seu papel fundamental no sistema, e que o quadricóptero possa alcançar com eficiência a estabilização, é necessário a configuração dos coeficientes de PID.

Quando aplicado a um quadricóptero os coeficientes destes parâmetros são caracterizados pelo seu comportamento. O coeficiente de proporcionalidade sozinho, pode alcançar a estabilização. Este coeficiente determina a importância de uma ação nos motores em relação aos valores medidos pelos giroscópios, ele determina uma quantidade proporcional de força corretiva baseada no erro angular desde a posição desejada. Quanto maior o desvio, maior a força corretiva. Se aumentarmos o valor do coeficiente proporcional será gerada uma força mais forte para retornar a posição inicial,

se aumentarmos demasiado, ao retornar a posição inicial ele causara uma sobre correção, o que leva a uma outra força contrária para compensar, o sistema irá se tornar instável, amplificando as oscilações. O coeficiente Integral aumenta a precisão da posição angular, ele determina uma quantidade variável de força corretiva baseada no erro angular da posição inicial. Por exemplo, quando o quadricóptero sofre um perturbação e há mudanças de ângulos, o controle integral detecta a alteração de estado e aplica uma correção para os motores para obter o ângulo certo, é um fator para manter a posição. Se aumentarmos o valor para o coeficiente integral vai aumentar a capacidade de manter a posição. Na prática quando pegamos o quadricóptero na mão e tentarmos forçá-los em uma posição, os motores continuarão por um tempo a tentar neutralizar a ação, sem este parâmetro a oposição não duram muito tempo. Neste caso a posição angular pode ser firme e precisa, mesmo com vento irregular. No entanto, o aumento do valor deste coeficiente envolve muitas vezes uma diminuição da velocidade de reação e uma diminuição do coeficiente proporcional como uma consequência. O coeficiente derivado regula a velocidade em que o quadricóptero retorne a posição original, na prática vai amplificar a velocidade de reação do sistema, e em certos casos, um aumento do controle proporcional, de contras, existe uma maior probabilidade de ultrapassagem e oscilações.

O Software MultiWii usa vários loops PID com os seus próprios coeficientes PID, um para cada eixo.

#### 8.1.5.2 Sistema de Navegação autônoma

O sistema de navegação utilizado foi usado como base o código de navegação criado sob a plataforma MultiWii, liberado no fórum oficial MultiWii.com em agosto de 2013, por seu criador EOSBand. A versão funciona com uma placa baseada no microcontrolador AtMega2560 e GPS de série. Para inclusão dos sistema de navegação é necessário que quadricóptero esteja bem calibrado, o modo de estabilização ajustado, funções MAG e BARO tem que estar funcionando corretamente.

Foi incluído no software um novo modo de voo, GPSMODE é modo de navegação, que pode ser configurado para ser habilitado pelo canal auxiliar radio controle. A variável NAV\_STATE é o estado atual do mecanismo de navegação. Para criar uma missão, foi utilizado apenas o comando waypoint, este comando diz ao quadricóptero para ir para uma local especificado, e a altura para execução da rotina, uma vez que a aeronave atingiu a posição desejada ele vai para o próximo ponto, o quadricóptero não espera alcançar a altitude desejada ele vai continuar a missão até que o waypoint<sup>2</sup> seja alcançado.

Antes de se criar uma missão de navegação, é necessário definir os parâmetros de navegação no código fonte em config.h, primeiramente setar a variável USE\_MSP\_WP, que irá habilitar o GPSMODE, definir GPS\_WP\_RADIUS, este parâmetro foi criado devido à falta de precisão em GPS comerciais, é definido um raio de distância para um waypoint desejado, se o quadricóptero passar por dentro desse raio, então é considerado como ponto atingido. Este parâmetro é definido em centímetros. SAFE\_WP\_DISTANCE, este parâmetro define a distância máxima em metros que um waypoint pode ter do outro. Se a distância entre os pontos escolhidos superarem este parâmetro a missão não será executada, isso também vale para a distância entre a posição inicial e o primeiro waypoint. NAV\_SPEED\_MIN, NAV\_SPEED\_MAX, NAV\_SLOW\_NAV, estes parâmetros regulam a aceleração do quadricóptero durante a navegação. MAX é a velocidade máxima que o quadricóptero pode alcançar. MIN é a velocidade mínima que ele pode baixar quando se aproxima de um waypoint. Quando é SLOW\_NAV, então o SPEED\_MIN é ignorado e o quadricóptero fica mais lento, tanto quanto possível quando se aproxima de um waypoint (que permite reduzir a velocidade para zero). A unidade é cm / s para estes parâmetros de velocidade.

### **8.1.6 Alimentação do Sistema**

A bateria utilizada (figura 37) é da marca Lion Power tem capacidade de corrente de 2200mAh, taxa de descarga contínua 30C, esse “C” que vem

---

<sup>2</sup> Um waypoint é um determinado ponto no globo terrestre precisamente definido por coordenadas geográficas através do sistema GPS

nas características operacionais da bateria é o valor da capacidade de descarga, ou seja essa bateria de 30C consegue teoricamente, uma descarga trinta vezes o seu valor nominal. Por exemplo a bateria adquirida ele é uma bateria de 2200mAh e 30C possui uma carga de 2.2Ah, sendo que ela consegue manter  $30 \times 2.2 = 66A$  de corrente nominal.

Figura 37 - Bateria Lion Power 3s 11.1v 2200mAh



Fonte: Do autor

As dimensões da bateria são cento e seis milímetros por trinta e quatro milímetros por vinte e três milímetros e pesa aproximadamente 175gr, o valor nominal de tensão é 11.1v, quando totalmente carregada pode chegar a 12.6V.

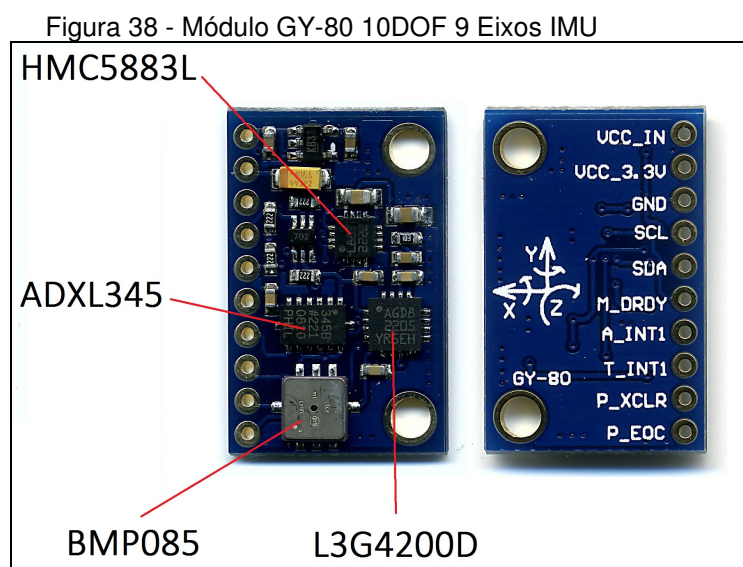
Existem algumas formas de se calcular o tempo de voo com base em algumas informações, uma é pegar o valor da corrente média de consumo do veículo e dividir esse valor pela carga da bateria, neste caso se o quadricóptero consome em média 15A, o tempo de voo será aproximadamente de  $2.2/15 = 0.1466$  horas, ou aproximadamente dez minutos. O tempo de voo nem sempre pode ser aumentado se escolhermos uma bateria maior, se sabe que a bateria é responsável por aproximadamente vinte e cinco por cento do peso do veículo, então fui muito criterioso na escolha desta. O uso de uma bateria maior o quadricóptero ficaria mais pesado, aumentaria o consumo de energia diminuiria a eficiência e o tempo de voo.

### 8.1.7 Sensores Utilizados

Os sensores utilizados compõem o que se chama de unidade inercial IMU (Inercial Measurement Unit) responsável por fornecer os dados sobre aceleração, velocidade, forças gravitacionais e orientação. Esses sensores fazem com que o quadricoptero consiga detectar as alterações do mundo ao seu redor, fazendo seus movimentos fixarem mais reais e estáveis possíveis. Será explicado cada um destes sensores, a sua importância e as suas características a seguir.

#### 8.1.7.1 Unidade Inercial-IMU

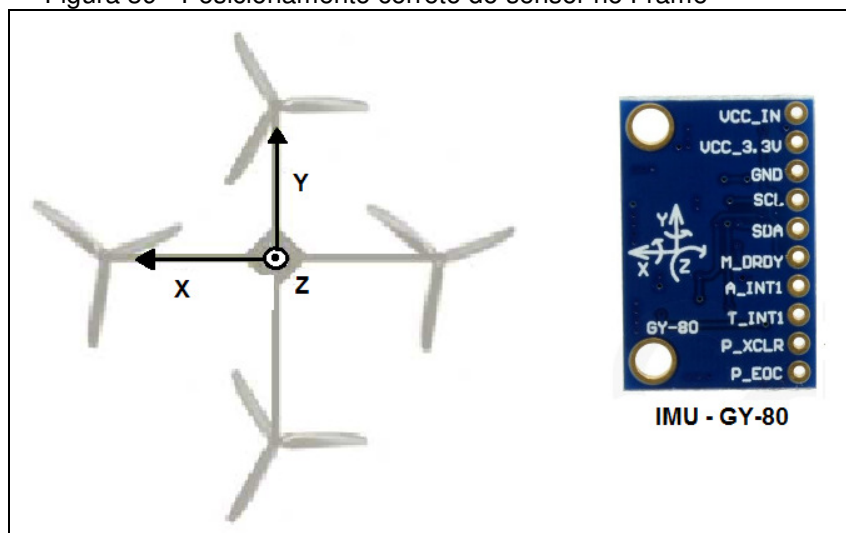
No início do projeto, momento em que estava-se efetuando o levantamento dos sensores a serem utilizados e adquiridos, deparou-se com dispositivo IMU que incluíam a presença da maioria dos sensores necessários, devido ao baixo custo se comparado ao adquirir todos os sensores em separado, e ser de fácil substituição, foi escolhido para o presente projeto a IMU modelo GY80 10DOF que contém o acelerômetro ADXL345, giroscópio L3G4200D, magnetômetro de três eixos HMC5883L e o barômetro digital BMP085, conforme mostra a figura 38 a disposição dos sensores da unidade inercial.



Fonte: Do autor

Na figura 39 é mostrado o posicionamento correto do sensor GY-80, fixado no centro da estrutura, onde as referências mostradas na placa da unidade inercial correspondem a referência mostrada na estrutura.

Figura 39 - Posicionamento correto do sensor no Frame



Fonte: Do autor

### 8.1.7.2 Acelerômetro

O ADXL345 é um acelerômetro de três eixos, relativamente pequeno, de baixo consumo, com alta resolução (13 bits) e que pode medir até  $\pm 16g$ . O ADXL345 é utilizado para fornecer dados métricos acerca da aceleração estática da gravidade em aplicações de sensibilidade de inclinação, sua alta resolução permite medidas de inclinação inferiores a  $1,0^\circ$ . Os dados são obtidos por comunicação I2C. Uma das características que este acelerômetro se sobressai em relação a outros é a frequência de atualização do ADXL345 alcança até 3.2Khz, outra característica interessante para o presente projeto é que ele conta com filtro passa-baixas configurável, já que o sensor é muito susceptível as vibrações causadas pelos atuadores. Para melhorar sua eficiência foi colocado no centro da estrutura mecânica do quadricóptero.

### 8.1.7.3 Giroscópio

Para medir o movimento angular foram utilizados giroscópios do tipo MEMS, que mede a velocidade angular de um objeto em torno do seu eixo de rotação. O giroscópio L3G4200D tem capacidade para três eixos, e tem muitas opções de configuração, incluindo três níveis de sensibilidade selecionáveis, +-250 / +-500 /+-2000 dps, uma variedade de taxa de dados de saída, um FIFO para buffer de dados de saída, e um interruptor de saída programável, tem uma resolução de 16bit e integra filtros passa-baixa. Ele foi configurado no projeto com fundo de escala de 2000dps, que é a maior possível. Os dados são obtidos por comunicação I2C.

Ao efetuar as leituras da velocidade angular dos três eixos (X, Y, Z) do quadrirrotor, é possível conhecer a posição angular de cada eixo, importante para gerenciar os controles de movimento da aeronave.

### 8.1.7.4 Magnetômetro

São utilizados magnetômetros do tipo MEMS para realizar o sensoriamento dos três eixos. O magnetômetro utilizado HMC5883L da fabricante Honeywell, tem a função de medir a orientação de um objeto através de campos magnéticos, funciona como uma bússola digital, que irá indicar o norte geográfico da terra, muito útil para o controle das atitudes da aeronave, esta informação é um referencial absoluto utilizado no algoritmos de controle e navegação.

### 8.1.7.5 Barômetro

O barômetro é um dos tipos de altímetro que é utilizado para medir a altitude atual da aeronave, os barômetros medem a pressão atmosférica e calculam a altura atual de acordo com a pressão, o cálculo da altura é baseado na medida de pressão em relação ao nível do mar. O sensor de pressão utilizado BMP085, fabricado pela Bosch, capaz de medir de 300 a 1.100 hPa

(hectopascal – unidade de medida de pressão. A leitura dos dados é feita por comunicação I2C. Devido à baixa precisão neste tipo de altímetro foi utilizado este em conjunto com o altímetro do tipo Sonar que será visto a seguir.

#### 8.1.7.6 Sonar

O sonar é um tipo de altímetro, a base de seu funcionamento está na emissão e recepção de ultrassons, e medição do tempo de propagação do eco. O sensor ultrassônico HC-SR04 (figura 40), utiliza sonar para determinar a distância de um objeto, ele permite a medição entre 2cm – 4mts sem contato, leituras estáveis e com uma precisão de leitura de aproximadamente 3mm. Sua operação não é afetada pela luz solar ou material preto como rangefinders, embora acusticamente materiais macios como pano podem dificultar as leituras.

Figura 40 - Sensor ultrassônico HC-SR04



Fonte: Do autor

No projeto foi utilizado para medição de altitudes não superiores a 4mts, a leituras deste sensor a partir de quatro metros não são confiáveis, sendo utilizados as leituras do barômetro ou do GPS para satisfazerem os requisitos do voo autônomo, também é utilizado os valores como referência no

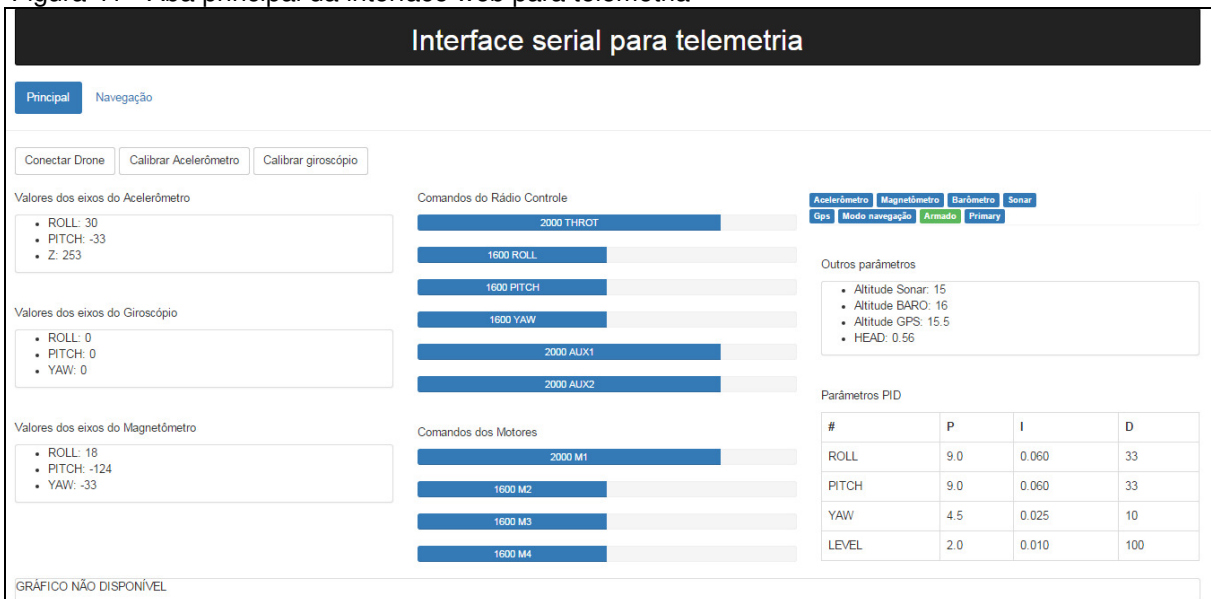
auxílio a decolagem e aterragem. O sensor foi colocado no centro da estrutura mecânica direcionado para baixo.

### **8.1.8 Interface Web para Telemetria**

A interface Web para telemetria foi desenvolvida utilizando AngularJS no Front-End, pois este Framework javascript é indicado quando se quer ter mais produtividade. No Back-End foi utilizado a API Socket.io para se trabalhar com os dados em tempo real, e um servidor simples Express rodando com NodeJs. Esta aplicação tem o objetivo de estabelecer a interface entre o utilizador e o Drone, ela recebe os dados de telemetria do módulos transceptores 3DR Radio Telemetry, numa frequência de 433 MHz durante o voo, e os converte para informações gráficas de simples interpretação pelo usuário. Além de recepção de dados é possível transmitir dados para o Drone permitindo o controle de rotas de navegação.

Na figura 41 pode-se observar a janela principal do software de telemetria, onde é possível visualizar todos os dados do Drone durante o voo, ele possui duas abas denominadas “Principal” e “Navegação”, na aba principal é demonstrado o valores lidos em tempo real dos eixos do acelerômetro, do giroscópio, e do magnetômetro. Possui três botões de comando, o botão conectar Drone, que inicializa a conexão de dados serialmente, o botão calibrar acelerômetro para efetuar a calibração do acelerômetro e o botão calibrar giroscópio conforme o nome sugere serve para efetuar a calibração do giroscópio. É essencial que se faça as calibrações dos sensores antes de cada voo, isso irá contribuir para o sucesso da missão autônoma. Também são mostradas graficamente os dados dos comandos do stick do rádio controle quando da intervenção do utilizador.

Figura 41 - Aba principal da interface web para telemetria



Fonte: Do autor

Ainda na aba principal é possível visualizar em tempo real os sinais PWM dos quatro motores na tela, e os parâmetros atuais de PID.

Na segunda aba, denominada Navegação (figura 42), onde é feita a telemetria dos dados e os controles de todos os parâmetros da missão autônoma, estes dados de telemetria envolvem posicionamento geográfico, altitude, velocidade, orientação, distância a pontos pré-determinados, entre outros.

Figura 42 - Aba navegação da interface web para telemetria



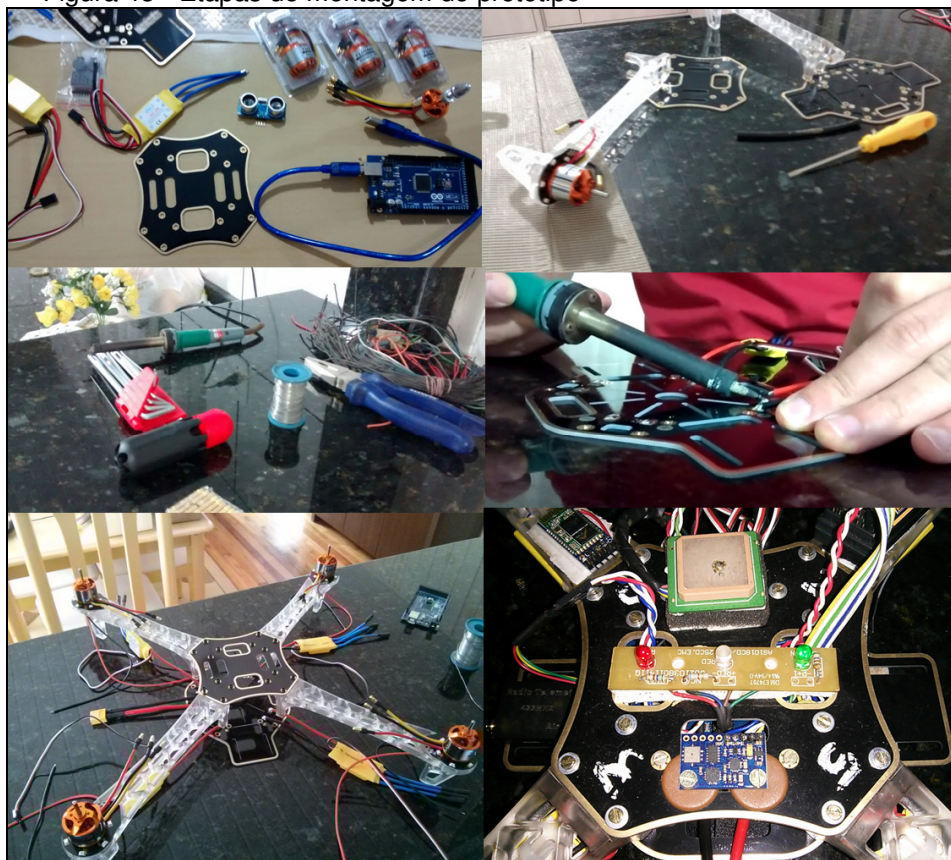
Fonte: Do Autor

Na janela de navegação, é mostrado no mapa a localização atual do Drone, ao clicar-se no mapa são marcados pontos de navegação, e são mostrados as coordenadas fixadas numa tabela ao lado do mapa. Podem ser definidos dois pontos de navegação, o ponto de início e o ponto de chegada. A janela possui quatro botões de comando, o botão baixar missão que irá ler os dados(se existirem) gravados na memória do Drone e serão carregados na tela, o botão gravar missão é utilizado após definir os dois pontos de rota da missão, é necessário gravar estes dados na memoria do Drone. Ele executa a missão com base nas coordenadas que foram gravados na memoria, e o botão iniciar que enviará o comando de start para o início da missão. A qualquer momento pode se clicar no botão abortar, este comando fará que a missão em percurso seja abortada.

## 8.2 RESULTADOS OBTIDOS

Nesta parte do trabalho serão apresentados detalhes do desenvolvimento desse projeto e os resultados obtidos. Durante o desenvolvimento do protótipo foram identificadas várias dificuldades que foram contornadas, e outras que não foram possíveis de serem contornadas. Um dos empecilhos encontrados durante a montagem do Drone foi na fixação do motor brushless no Frame de montagem, o kit de parafusos que veio junto com o Frame, o seu comprimento era pequeno que não alcançava na base do motor para fixar, sendo assim foi necessário a substituição dos parafusos de fixação dos motores por um tamanho maior. Foi encontrado no mercado de parafusos apenas parafusos do tipo fenda. Então, para seguir um padrão, foram substituídos todos os parafusos para o tipo encontrado. Na figura 43 é mostrado algumas das etapas de montagem do protótipo.

Figura 43 - Etapas de montagem do protótipo



Fonte: Do autor

A montagem final do protótipo contendo todos os elementos descritos na metodologia é apresentada na figura 44, o peso total do conjunto após a montagem ficou em aproximadamente um quilo e cem gramas.

Figura 44 - Montagem final completa do Drone



Fonte: Do autor

### 8.2.2 Testes de Voo

Foram realizados testes de voo para assegurar primeiramente que o Drone seria capaz de voar e se manter estável, sem quaisquer problemas.

Teste de voo 1: Neste teste de voo o Drone foi colocado em um gramado, um espaço de aproximadamente dez metros quadrados livre de obstáculos (figura 45). Utilizou-se o controle remoto para este teste. O stick do Throttle(aceleração) foi gradualmente aumentado e logo as vibrações já puderam ser vistas nos braços do Frame com cada vez maior frequência. Com o stick no centro, com 50% de energia nos motores para geração do empuxo. O Drone levantou a aproximadamente um metro do chão e logo caiu. Isto deveu-se que os valores de controle dos atuadores precisariam de ajustes.

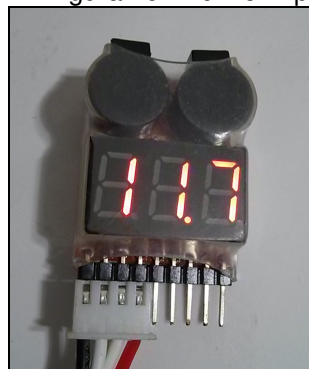
Figura 45 - Primeiro teste de voo



Fonte: Do autor

Neste teste verificou-se a bateria descarregava muito rapidamente, e não foi percebido que a tensão da bateria chegou a seu limite mínimo de tensão, isto poderia ter levado a perda da mesma. Devido a isto, foi adicionado um monitor de bateria digital com bescuro conforme mostrado na figura 46.

Figura 46 - Buzzer Lipo



Fonte: Do autor

Este monitor é um dispositivo eletrônico que emite sinais sonoros e demonstram as tensões individuais de cada célula que compõem a bateria quando a tensão da bateria chega ao valor mínimo. Isto se torna importante pois o usuário saberá o momento certo de substituir ou de carregar a bateria, de forma que possa ser prevista uma possível falha de alimentação e a consequente queda.

Teste de voo 2: Este teste foi feito no mesmo local do teste anterior, o impulso foi gradualmente aumentado até o que Drone saísse do chão, no entanto o Drone imediatamente se tornou instável e voou em direção a uma árvore e caiu de lado no chão. Desta vez houve a quebra de uma das hélices. Fez-se a substituição da hélice, e novamente a tentativa não obteve sucesso. Neste teste, outro problema foi detectado, o eixo do motor tem uma superfície lisa, onde são fixadas as hélices, com as vibrações do voo o Spinner afrouxa, e a hélice é lançada para fora da estrutura. Para esta situação utilizou cola branca para fixar os Spinner nos eixos dos motores.

Teste de voo 3: Este teste tentou demonstrar se o Drone é capaz de um voo estável. A intenção deste teste foi verificar se o Drone seria capaz de voar com sucesso poucos metros de altura, e em seguida pousar sem que ocorressem problemas. A física do motor e hélice prevê que o impulso produzido deve ser mais do que o suficiente para levantar o protótipo com sucesso para uma altura desejada.

Usando o controle remoto, foi aumentada a propulsão até que o Drone começasse a levantar do chão. O Drone decolou violentamente, e foi possível verificar muita vibração nos motores, rapidamente foi ao chão, levando a quebra de mais uma hélice. Neste teste estava se utilizando hélices de dez polegadas, o que foi concluído neste teste é que o diâmetro da hélice não estava dimensionado corretamente para a estrutura montada. A hélice de 10 polegadas foi indicada pelo fabricante dos motores escolhidos, conforme o tipo de bateria utilizada. Foi feita uma pesquisa a fóruns da internet relacionados ao assunto, verificou-se que a hélice ideal utilizada pela maioria ficava entre oito e nove polegadas. Para o teste seguinte foi feita a compra mais kits de hélices com diâmetro oito polegadas por quatro e meio de passo, e kits de hélices de nove polegadas de diâmetro com quatro e meio de passo.

Teste de voo 4: Este teste foi numa garagem fechada com o Drone pendurado no teto (figura 47), e desejou-se apenas que o Drone se mantivesse estável. Agora com a hélice de nove polegadas. Pegou-se elásticos, desses que se coloca em roupas, cuidadosamente foram amarrados no Drone, após

pendurou-se no teto em um gancho metálico. Foi deixado uma folga suficiente para que o Drone ficasse acima do chão.

Usando o acelerador do controle remoto, foi aumentada a propulsão até que o Drone começasse a levitar. Com aproximadamente um metro e meio do chão, foi regulada a aceleração até que ele ficasse pairando no ar. O impulso foi aumentado, e depois de chegar a uma certa velocidade, o Drone tornou-se instável e ultrapassado sobre vários eixos. Isto demonstrou que, mesmo com elasticidade como um fator, os valores de controle ainda precisavam ser revistos.

Figura 47 - Teste de voo 4



Fonte: Do autor

Teste de voo 5: Este teste foi feito da mesma maneira do teste de voo 4, porem agora foi testada a hélice de 8 polegadas, no entanto ao aumentar a aceleração, o elástico se soltou e o Drone foi direto na parede. Houve a perda de três hélices de uma vez, se soltaram várias peças

eletrônicas. Como consequência deste teste, a reparação da estrutura, considerou-se que para os próximos testes de voo, teriam que ser feitos em um ambiente mais estável, para evitar a perda de mais componentes.

Teste de voo 6: Devido a problemas criados pelo teste anterior, vários componentes tiveram que ser recolocados e fixados. Com base no que foi verificado no teste anterior a hélice que produziu uma força de empuxo mais suave, e visualmente produziu menos vibrações foi a hélice de oito polegadas. Então prosseguiu-se os testes com esta hélice. Ainda estava presente o problema de controle de estabilidade. Foi determinado que até o momento que o cenário de testes não estava isolando adequadamente a origem da instabilidade. Assim criou-se uma estrutura de testes conforme mostrada na figura 48 que permitiu que o foco dos testes ficasse somente nos eixos Pitch e Roll. A estrutura foi feita de madeira, trata-se de um quadro de um metro quadrado, e pés de um metro e meio de altura.

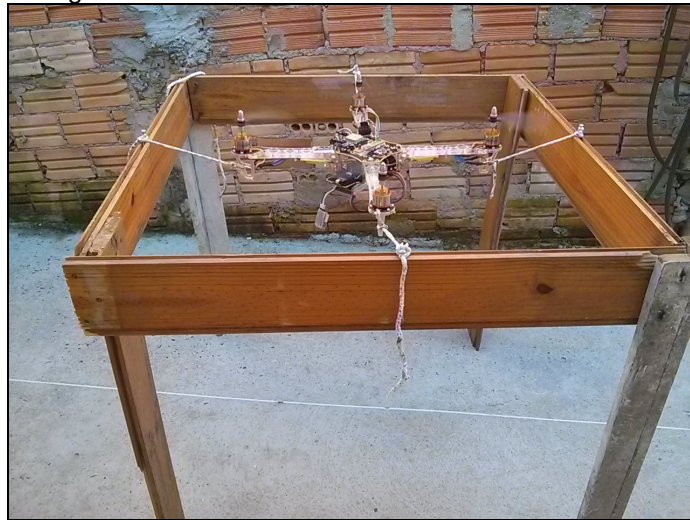
Figura 48 - Estrutura de madeira para testes



Fonte: Do autor

Com uma corda o Drone foi fixado, amarrando os quatro braços na estrutura (figura 49). Esperava que o teste isolaria o eixo que estava causando a instabilidade. No entanto, depois de aumentar o impulso os resultados obtidos foram semelhantes aos testes efetuados anteriormente, o Drone tornava-se instável em ambos os eixos e ficava se debatendo. Assim, foi decidido que o isolamento dos testes ficaria em apenas um único eixo, para determinar os valores das constantes de estabilidade corretas.

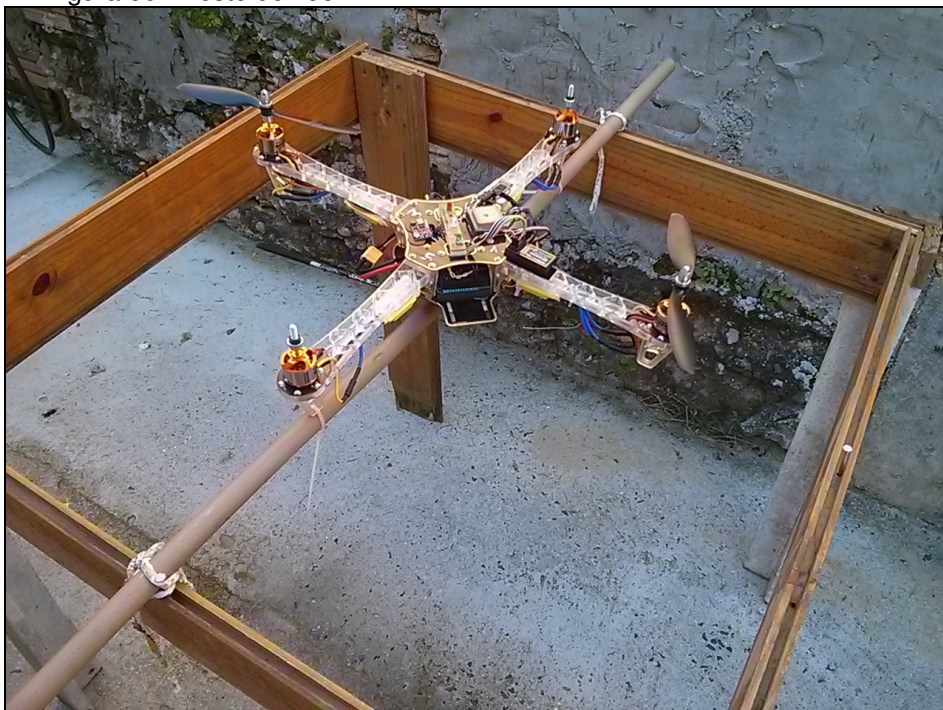
Figura 49 - Teste de voo 6



Fonte: Do autor

Teste de voo 7: Utilizando a mesma estrutura, modificou-se os métodos de testes para que o Drone se movimentasse em torno de apenas um eixo, retirou-se duas hélices e foi colocado uma haste rígida, e foi fixado na estrutura de forma que os movimentos de apenas um dos eixos ficasse livres para movimentações (figura 50).

Figura 50 - Teste de voo 7



Fonte: Do autor

Os testes foram repetidos várias vezes com diferentes valores de controle de PID. Alguns parâmetros testados fez com que o Drone não se estabilizasse, já outros parâmetros causavam uma sobrecorreção de estabilidade. Um conjunto de valores testados até conseguiram que o Drone ficasse estável, mas isso, até uma certa velocidade de aceleração dos motores, em que a sobrecorreção ficava demasiada. Nesta etapa dos testes chegou-se à conclusão que ajustar os valores ideais de PID é um problema.

#### 8.2.2.1 Algoritmo PID de ajuste automático

Foram feitas algumas pesquisas nesta área, encontrou-se vários artigos sobre o assunto. Existe muitos algoritmos complexos que estão relacionados com PIDs adaptativos e Logica Fuzzy, a intenção era encontrar uma solução simples e prática para o problema. Encontrou-se o algoritmo chamado de G\_TUNE, que permite que o Drone calcule os valores de PID dinamicamente utilizando as leituras do giroscópio. O algoritmo funciona da seguinte maneira: primeiro o G\_TUNE começa redefinindo os valores de PIDs de todos os eixos para zero. Ao iniciar a decolagem como o algoritmo ativo, ele irá calcular o erros e atualizar os parâmetros de PID automaticamente.

Teste de voo 8: Após a adicionado o algoritmo G\_TUNE no firmware de controle do Drone, estava tudo certo para prosseguir com os testes. Em um ambiente aberto livre de obstáculos, foi acionado o modo G\_TUNE, conseqüentemente os valores de PID foram zerados, usando o acelerador do controle remoto, foi aumentada a propulsão até que o Drone começasse a sair do chão. O Drone voou cerca de dois metros do chão, e estava aparentemente calibrado. O algoritmo após ativado fica atualizando os valores do PID, então conforme comportamento do algoritmo deve desativar o modo G\_TUNE em pleno voo para se fixar os valores setados. Feito isto o Drone se desestabilizou rapidamente, caiu no chão. Desta vez quebrou um par de hélices e o transceptor radio 3DR embarcado se partiu ao meio.

Teste de voo 9: O firmware de controle foi atualizado, foram fixados os valores de PIDs resultantes do último teste para se certificar de quaisquer possíveis erros que poderiam causar o problema no teste anterior, e as hélices quebradas foram substituídas. Utilizando o acelerador do controle remoto, foi aumentada gradativamente a propulsão para ajudar a garantir a segurança. Depois de tentar o teste novamente, o mesmo problema ocorreu. O Drone decolou, e chegou a atingir cinco metros de altura, ficou pairando no ar por pelo menos vinte segundos, e foi indo em direção a uma árvore, na tentativa de intervir no controle do Drone para não bater no obstáculo, virando o stick do Aileron (Eixo Roll) ele fez um loop no ar e caiu severamente, quebrando os últimos kits de hélices disponíveis para os testes.

Isto provou que, mesmo com o código atualizado o problema ainda estava presente. Depois deste teste problemático, outros procedimentos de testes de voo e novas variáveis foram consideradas, mas este foi o último teste de voo devido a limitações de tempo.

## 9 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados todos os componentes necessários para se construir um Drone do tipo quadricóptero, cada parte estrutural que o compunha foi devidamente ajustada, contribuindo para o bom funcionamento do protótipo. Além disso o firmware de controle desenvolvido foi capaz de integrar todos os sensores necessários para atingir a meta de um voo autônomo.

A interface de telemetria desenvolvida apresentou bons resultados e cumpriu seu propósito, atuando como fonte de dados para captação de dados do sistema em tempo real. Graficamente foi possível localizar com êxito a sua posição com GPS, e acompanhar a leitura dos sensores IMU, assim como enviar comandos e coordenadas para execução de missões autônomas.

Foi adquirido o conhecimento de que, para que se tenha qualquer tipo de controle sobre o Drone, precisa-se da capacidade de efetuar a leitura dos sensores, por exemplo saber precisamente o ângulo de inclinação para que seja possível estimar o erro, saber se o valor do ângulo medido está muito diferente do ângulo desejado, assim aplica-se o algoritmo de controle PID, efetuando os cálculos com o objetivo de efetuar a correção do erro.

Os resultados finais mostraram que nem todas as especificações e a metas estabelecidas no início do projeto foram atendidas. Apesar de que o voo totalmente autônomo não foi alcançado, o Drone tinha claramente o potencial para atingir o objetivo de voo, todas as etapas metodológicas foram criteriosamente seguidas para que o resultado fosse satisfatório.

É importante observar que se, uma destas etapas de desenvolvimento ou testes não sendo bem sucedida prejudicaria as outras etapas. Várias iterações de projeto foram feitas na tentativa de criar um Drone adequado para os objetivos do projeto e ao protótipo final potencial para o sucesso. Como já mencionado na seção anterior, houvera vários testes

realizados para assegurar que o Drone desenvolvido voaria com sucesso. Se o tempo disponível fosse suficiente, a adequação do sistema de controle de estabilidade seria possível, e o tão sonhado voo estável seria alcançado.

Deseja-se de que este trabalho possa posteriormente servir como uma base para pesquisa de acadêmicos interessados no tema. No geral, foi construído um Drone completo neste projeto, com todos os requisitos necessários conforme meta definida. O Drone tinha o poder de voar a grande altitudes, mais faltava a estabilidade. Mais iterações asseguraria o seu futuro sucesso.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (Brasil). **Proposta de instrução suplementar, intitulada “emissão de certificado de autorização de voo experimental para sistemas de veículo aéreo não tripulado”**. Consulta pública nº 01/2012. Brasília/DF, 2012. Disponível em: <<http://www2.anac.gov.br/transparencia/consultasPublicasEncerradas2012.asp>>. Acesso em 03 de novembro de 2014.

ALVES, A. S. Cavalcanti. **Estudo e Aplicação de técnicas de Controle Embarcadas Para Estabilização de Voo de Quadricopteros**. 2012. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil.

ARDUINO.CC. **Arduino** Disponível em: <<http://arduino.cc/>>. Acesso em: 20 de novembro 2014.

ARMY-TECHNOLOGY.COM. **Shadow 200 RQ-7 Tactical Unmanned Aircraft System, United States of America**. Kable Business Intelligence Limited, London. 2013. Disponível em <<http://www.army-technology.com/projects/shadow200uav/>> Acesso em 13 de novembro de 2014.

ART OF CIRCUITS. **Frames and Chassis** Disponível em: <<http://artofcircuits.com/>>. Acesso em: 05 de junho de 2015.

AUSTIN, Reg. **Unmanned Aircraft Systems: UAVs design, development and deployment**. Wiltshire: John Wiley & Sons Ltd, p. 332, 2010.

BANZI, Massimo. **Getting Started with Arduino**. 2. Edition. U.S.A: O’Reilly Media, 2011.

BARNHART, Richard K. et al. **Introduction to Unmanned Aircraft Systems**. Boca Raton: Crc Press, 2012.

BRANCATELLI, Rodrigo. **O Drone brasileiro**. Info, São Paulo, Ed.337, p.62-63, janeiro 2014.

BRESCIANI, Tommaso. **Modelling, Identification and Control of a Quadrotor Helicopter**. 2008. 184f. Master thesis (Department of Automatic Control) - Lund University, Lund, Sweden.

CAMPERA, Bruno; TOLEDO FILHO, Claudio; NAKASHIMA, Renan T.; LEITE, Rui P. **Helimodelo quadrorotor como plataforma para desenvolvimento de algoritmos de controle**. 2013. 27f. Relatório Final (Graduação em engenharia de computação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.

CANTWELL, Houston R. **Os operadores de sistemas de aeronaves não tripuladas na Força Aérea: Como romper os paradigmas**. In: Air and Space Power Journal, Montgomery, v. 23, n. 1, p. 50-61, Jan. 2011.

CANZIAN, Edmur. **MINICURSO Comunicação serial RS – 232**. CNZ Engenharia e informática Ltda. São Paulo. Disponível em <<http://www.professores.aedb.br/arlei/AEDB/Arquivos/rs232.pdf>>. Acesso em 23 de Agosto de 2014.

COSTA, E. Barros, **Algoritmos de Controle Aplicados à Estabilização do Voo de Um Quadrotor**. 2012. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil.

COSTA, Sérgio Eduardo Aurélio Pereira da. **Controlo e Simulação de um Quadrirotor Convencional**. 2008. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeroespacial) – Instituto superior técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.

DatasheetME-1000RW. (2009). Technical Data Sheet ME-1000RW. Versão 1.2.

FAHLSTROM, P. Gerin; GLEASON, T. James. **Introduction to UAV Systems: Aerospace Series**. 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons Ltda, 2012.

FANTON, Rodrigo. Os Robôs aéreos estão revolucionando o combate militar ao permitir que pessoas vejam – e matem – a milhares de quilômetros de distância. **Exame info: O Drone brasileiro**, São Paulo, Ed.337, p.62-63, janeiro 2014.

FORMIGA, Maurício M. **Comunicação de dados para um sistema de telemetria de baixo custo**. 2005. 148f. Dissertação (Mestrado em Informática) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB.

GALLAGHER, A.; GUAYAQUIL, S.; MCINTYRE, W.; NIRO, A.; PUZZY, A.; UYGUR, A. **Surveillance UAV**. 2014. 110f. A Major Qualifying Report (degree of Bachelor of Science) - Worcester Polytechnic Institute – Massachusetts, US.

GUIMARAES, J. P. Ferreira. **Controle de Atitude e Altitude Para Um Veículo**

**Aéreo Não Tripulado Do Tipo Quadrotor.** 2012. 63f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal RN, Brasil.

HIRSCHBERG, M. J. **The American helicopter: An overview helicopter developments in America 1908-1999.** Julho, 2000. Disponível em: <[http://www.iasa.com.au/folders/Publications/pdf\\_library/ospreypdfs/The%20American%20Helicopter.pdf](http://www.iasa.com.au/folders/Publications/pdf_library/ospreypdfs/The%20American%20Helicopter.pdf)>. Acesso em: 22 de novembro de 2014.

HOBBYKING.COM. **hobbyking.** Disponível em: <<http://www.hobbyking.com/hobbyking/>> Acesso em: 05 de junho de 2015.

HYLTON, Wil S. **What Happened to Air France Flight 447?** The New York Times, New York, Maio, 2011. Disponível em: <[http://www.nytimes.com/2011/05/08/magazine/mag-08Plane-t.html?\\_r=0](http://www.nytimes.com/2011/05/08/magazine/mag-08Plane-t.html?_r=0)> Acesso em: 30 de Agosto de 2014.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Unmanned Aircraft Systems (UAS)** – Circular n. 328. Canada: ICAO, 2011.

KARVINEN, Kimmo; KARVINEN, Tero. **Make: Arduino Bots and Gadgets.** 1<sup>st</sup> Edition. Canada: O'Reilly Media, 2011.

LEISHMAN, J. Gordon. **A History of Helicopter Flight.** University of Maryland. [S.l.]:[s.n.].2000. Disponível em: <<http://terpconnect.umd.edu/~leishman/Aero/history.html>>. Acesso em: 20 de Agosto de 2014.

MCROBERTS, Michael. **Arduino Básico.** 1<sup>º</sup> Ed. São Paulo: Novatec Editora Ltda, 2011.

MELO, Alexandre de Secchin. **Implementação de um Quadrotor como Plataforma de Desenvolvimento para Algoritmos de Controle.** 2010. 114f. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica) – Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória ES, Brasil.

MUNÓZ, Miguel. E. P. **Modelagem Matemática e Controle de um Quadrimotor,** 2012. 121f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos) - Universidade de Brasília, Brasília DF, Brasil.

NEWCOME, Laurence R. **Unmanned Aviation: A Brief History of Unmanned Aerial Vehicles.** Virginia USA: AIAA. 2004.

NONAMI, Kenzo; KENDOUL, Farid; SUZUKI, Satoshi; WANG, Wei; NAKAZAWA, Daisuke. **Autonomous Flying Robots: Unmanned Aerial Vehicles and Micro Aerial Vehicles.** New York: Springer, 2010.

NORTHROP GRUMMAN CORPORATION. **The value of performance capabilities: Global Hawk**. Virginia / USA. Disponível em: <[http://www.northropgrumman.com/Capabilities/GlobalHawk/Pages/default.aspx?utm\\_source=PrintAd&utm\\_medium=Redirect&utm\\_campaign=GlobalHawk+Redirect](http://www.northropgrumman.com/Capabilities/GlobalHawk/Pages/default.aspx?utm_source=PrintAd&utm_medium=Redirect&utm_campaign=GlobalHawk+Redirect)>. Acesso em 12 de novembro de 2014.

PEGORARO, J. Antoninho. **Estudo do Potencial de Um Veículo Aéreo Não Tripulado / Quadrotor, Como Plataforma na Obtenção de Dados Cadastrais**. 2013. 221f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis SC, Brasil.

PEREIRA, Fábio. **Microcontroladores PIC: Programação em C**. 4ª ed. São Paulo: Érica, 2005.

PFEIFER, Erick. **Projeto e controle de um UAV Quadrirotor**. 2013. 132f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo SP, Brasil.

POLLOCK, A. Geoge. **Optimal Algorithm Design for Transfer Path Planning for Unmanned Aerial Vehicles**. 2014. 157f. A thesis (degree of Doctor of Philosophy) - University of Glasgow, Scotland, UK.

RODRIGUES, L.E.M.J. Fundamentos da Engenharia Aeronáutica: **Aplicações ao Projeto SAE-Aero Design**. vol.2. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo. São Paulo: Edição do Autor, 2011.

SÁ, Regiane Cavalcante. **Construção, Modelagem Dinâmica e Controle PID para Estabilidade de Um Veículo Aéreo Não Tripulado do Tipo Quadrirotor**. 2012. 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Teleinformática) – Universidade do Ceara, Fortaleza CE, Brasil.

SANCA, Armando. S. et al. **Hexarotor Micro-Aerial Vehicle: Modeling, Backstepping Control with Nonlinear Inputs and Sensor Fusion**, XVII International Congress of Electronic, Electrical and Systems Engineering – Intercon

SANTOS, Ricardo Di Lucia. **Redes GSM, GPRS, EDGE e UMTS**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008. Disponível em <[http://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos\\_vf\\_2008\\_2/ricardo/2\\_1.html#ms](http://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2008_2/ricardo/2_1.html#ms)>. Acesso em 23 de Agosto de 2014.

SILVA, Kleber L.; MORAIS, A. Silva de.; MORAIS, J. Silva de.; GEDRAITE, R. **Hardware para Controle Avançado de Veículo Aéreo não Tripulado do Tipo Quadricóptero**. 2013. XI Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, Uberlândia, MG, Brasil.

SKIBA, Thiago. **Desenvolvimento de um Protótipo Quadrorotor Utilizando Lógica Reconfigurável como Plataforma para Estudo de Técnicas de Controle**. 2012. 73f. Graduação em (Engenharia Industrial Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Curitiba PR, Brasil.

SOUZA, D. **Desbravando o PIC**. São Paulo: Érica Ltda, 2008.

SOUZA, D.J; LAVINIA, N.C. **Conectando o PIC 16F877A: Recursos Avançados**. São Paulo: Érica, 2003.

SOUZA, J. D. Alves. **Simulação e Desenvolvimento de um Veículo Aéreo Autônomo de Quatro Rotores**. 2011. 178f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

STMICROELECTONICS, **L3G4200D**, MEMS motion sensor: ultra-stable three-axis digital output gyroscope, 2010.

STOCHERO, Tahiane. **Polêmicos e revolucionários, mais de 200 ‘drones’ voam no país sem regra**. G1, São Paulo, Março. 2013. Disponível em: < <http://g1.globo.com/brasil/noticia/2013/03/polemicos-e-revolucionarios-mais-de-200-drones-voam-no-brasil-sem-regra.html>> Acesso em: 30 de Agosto de 2014.

STROJNY, B. A. **Integration of conformal GPS and VHF/UHF communication antennas for small UAV applications**. *Antennas and Propagation*. 3<sup>rd</sup>. EuCAP 2009. European Conference, 2014.

SVERZUT, José Umberto. **Redes GSM, GPRS, EDGE e UMTS – Evolução a caminho da quarta geração**. 2<sup>a</sup> Edição. São Paulo: Editora Érica, 2008.

TEAL GROUP. **World unmanned aerial vehicle systems - 2014 market profile and Forecast: Technical report**. Fairfax, EUA, 2014.

UAS Center of Excellence (2010). **U.S. army roadmap for unmanned aircraft systems 2010-2035**. Technical report, Fort Rucker, Alabama.

VACHTSEVANOS, G.; TANG, L.; REIMANN, J. (2004). **An intelligent approach to coordinated control of multiple unmanned aerial vehicles**. In American Helicopter Society International, I., editor, *In Presented at the American Helicopter Society 60th Annual Fo-rum*, Baltimore, MD.

VALENTI, M.; SCHOUWENAARSY, T.; KUWATAZ, Y.; FERONX, E.; HOW, J. **Implementation of a Manned Vehicle - UAV Mission System** - Massachusetts

Institute of Technology. 2004;

VASCONCELLOS, Camila S. C. C.; CATUNDA, Paulo R. Y. **Projeto, Construção e Controle de uma Protótipo de um Quadrirotor.** 2013. 114f. Graduação em (Engenharia Eletrônica e de Computação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

**APÊNDICE(S)**

# Projeto de Controle de Um Drone Quadricóptero: Implementação de Controles Para Voos Autônomos

Fabio Duarte Euzebio<sup>1</sup>, Sérgio Coral<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Acadêmico do Curso de Ciência da Computação – Unidade Acadêmica de Ciências, Engenharias e Tecnologias - Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC) - Caixa Postal 3.167 – 88806-000 – Criciúma – SC – Brasil

<sup>2</sup> Professor Especialista do Curso de Ciência da Computação – Unidade Acadêmica de Ciências, Engenharias e Tecnologias - Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC) - Caixa Postal 3.167 – 88806-000 – Criciúma – SC – Brasil

fabiodeuzebio@gmail.com, sergiocoral@unesc.net

**Abstract.** *This work developed a project for autonomous control of an unmanned aerial vehicle (drone), the quadricopter type. It uses a process to allow the quadricopter be able to make decisions, making parts of a mission autonomously, making geographical displacement calculated from coordinates. A Web application for telemetry in order to establish the interface between the user and Drone, acting as a data source to capture real-time system data was developed. Several flight tests were conducted to ensure that the drone would be able to fly and remain stable without complications, following the sequence of development stages and all specifications and targets set in the project.*

**Resumo.** *Neste trabalho foi desenvolvido um projeto para controle autônomo de um veículo aéreo não tripulado (Drone), do tipo quadricóptero. Utiliza-se de um processo para permitir que o quadricóptero seja capaz de tomar decisões, realizando partes de uma missão de forma autônoma, efetuando deslocamento geográfico premeditado a partir de coordenadas. Foi desenvolvida uma aplicação Web para telemetria com objetivo de estabelecer a interface entre o utilizador e Drone, atuando como fonte de dados para captação de dados do sistema em tempo real. Foram realizados diversos testes de voo para assegurar que o Drone seria capaz de voar e se manter estável sem complicações, seguindo a sequência das etapas de desenvolvimento e todas as especificações e metas estabelecidas no projeto.*

## 1. Introdução

Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), também chamado UAV (do inglês Unmanned Aerial Vehicle), ou ainda comumente conhecidos como Drone. Os VANT's, no geral, são munidos de elevado número de sensores e mecanismos capazes de realizarem diversas tarefas.

Planejado inicialmente com objetivos militares, os primeiros Drones foram concebidos para serem usados em missões que eram prejudiciais para humanos. Hoje as pesquisas estão voltadas para a tentativa de se produzir aeronaves de combate que tenham condições de agir de forma autônoma, com a intuição próxima de um ser humano [AUSTIN, 2010, tradução nossa].

Este tipo de veículo também pode ser usado em aplicações voltadas às áreas de vigilância, inspeção, filmagem, fotografia e diversão, e em situações, como por exemplo, em missões militares, onde a vigilância por aeronave tripulada não pode ser realizada por conta de riscos, custos e outros fatores [STROJNY, 2009, tradução nossa].

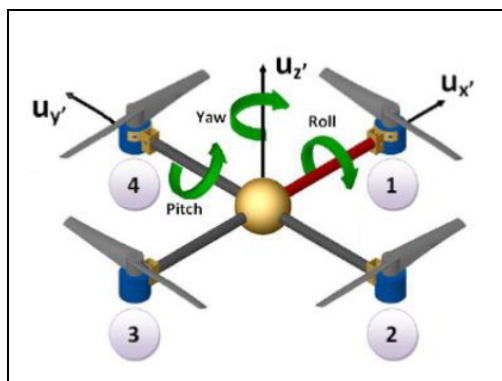
Embora este conceito de aeronave não seja novo, a dificuldade de estabilização e o desempenho ruim dos primeiros protótipos limitaram seu desenvolvimento. A preferência pelo estudo dos Drones se dá em decorrência do conhecimento que se tem a respeito da complexidade em mantê-lo estável e apto para o voo e sabendo da importância dessa área de atuação no projeto de aeronaves.

Pesquisadores e relatórios governamentais apontam que, no futuro, múltiplos robôs voadores serão capazes de atuar, até sob a forma de enxames, cooperativamente e de modo autônomo [UAS Center of Excellence, 2010, tradução nossa], funcionando como uma rede coordenada de sensores que cumprirão missões complexas sem nenhuma intervenção humana [VACHTSEVANOS, 2004, tradução nossa].

## 2. Princípio de funcionamento dos quadrrrotores

Quadrrrotores são veículos aéreos de asas rotativas (popularmente conhecidas como hélices), decolagem e pouso vertical, com quatro rotores em configuração de cruz, nos quatro vértices extremos da estrutura cruzada [CAMPERA et al, 2013].

A atitude absoluta do quadrrrotor é descrita por três ângulos de Euler de ( $\omega$   $\theta$   $\Phi$ ). Estes três ângulos são chamados respectivamente ângulo de guinada (ou Yaw, em inglês), ângulo de inclinação (ou Pitch, em inglês) e ângulo de rolagem (ou Roll, em inglês) conforme mostrado na figura 1, eles permitem os movimentos do quadrrrotor não considerando a execução de acrobacias [PEGORARO, 2013].



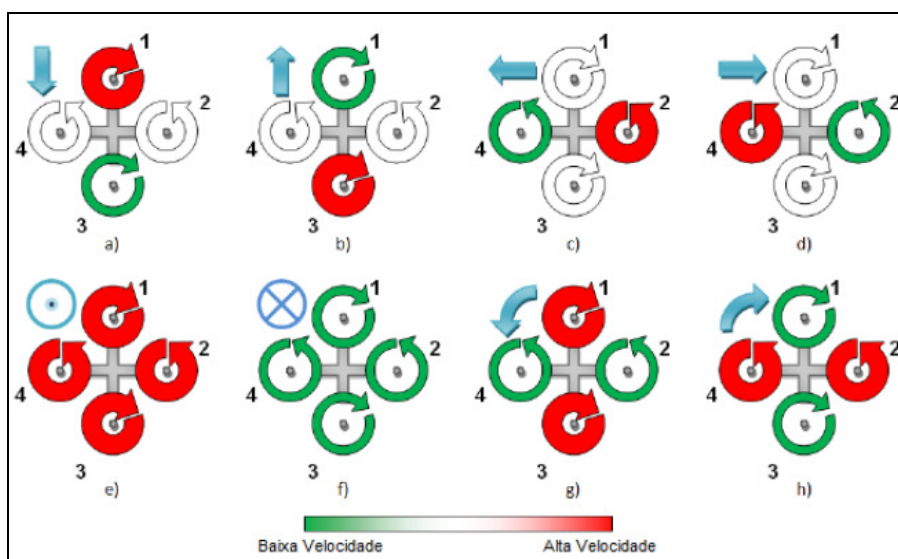
2 Figura 51 – Atitudes do quadrrrotor

Quando o quadrrrotor gira em torno do eixo x tem-se o movimento de rolagem (ângulo Roll), este movimento é conseguido variando-se as velocidades dos rotores 1 e 3, de uma mesma quantia mas de maneira oposta, enquanto que os rotores 2 e 4 permanecem com velocidades iguais. Por exemplo, aumentando-se a velocidade do rotor 1 deve-se diminuir velocidade do rotor 3, e se, os rotores do quadrrrotor giram todos a uma velocidade que vença a força peso causada pela aceleração da gravidade, então, o veículo movimentar-se-á sobre o eixo x, pode-se dizer que este movimento é para trás ou para frente como mostrado na figura 2, atitudes “a” e “b” [SÁ, 2012].

A movimentação do quadrrrotor em torno do eixo y é conhecida como Pitch e é realizada de forma análoga a descrita anteriormente, só que agora variando o empuxo

produzido pelos rotores 2 e 4 e mantendo constantes os empuxos produzidos por 1 e 3. Quando o rotor 2 girar com velocidade angular maior que 4, o quadricóptero realizará uma rotação no sentido positivo (esquerda) em torno do eixo y e quando a velocidade do rotor 4 for maior que a do rotor 2 a rotação será no sentido negativo (direita) conforme mostra a figura 2, atitudes “c” e “d” [PEGORARO, 2013].

O movimento em torno do seu eixo vertical Z, ou seja, uma guinada, é feito pelo comando Yaw (guinada). Para fazer este giro, seja no sentido horário ou anti-horário, basta aumentar igualmente a velocidade de dois rotores que giram no mesmo sentido, do mesmo modo que se diminui a velocidade dos outros dois motores, e vice-versa. Isto é mostrado na figura 2, atitudes “g” e “h” [SÁ, 2010].



3 Figura 52 - Variações nas velocidades angulares e respectivos resultados em movimentações lineares e angulares (atitudes)

Todos os movimentos elementares podem ser combinados possibilitando o quadricóptero se movimentar em qualquer direção no espaço.

### 3. Desenvolvimento do protótipo do Drone

Para implementação de um VANT elétrico são necessários motores, drives controladores de velocidade, sensores, comunicação sem fio, baterias e microcontrolador. A seguir são apresentados os itens supracitados e suas características para a aplicação proposta do quadricóptero.

#### 3.1 Motor Brushless

Os motores mais utilizados em aeronaves do tipo quadricóptero são motores brushless figura 3, ou sem escovas, utilizados por serem muito potentes e eficientes, possuem melhores características de curva de velocidade versus torque, rápida resposta dinâmica, operação sem ruídos dentre outros, apesar de suas pequenas dimensões. Estes motores são versões reduzidas de motores trifásicos síncronos, de ímãs permanentes. Algumas vantagens em relação aos motores DC [COSTA, 2012; PFEIFER, 2013].



4 Figura 53 Motor Brushless Turnigy D2830/11 1000KV

Os principais parâmetros para a escolha para este tipo de motor são: tensão de trabalho, corrente máxima e um dado que indica rpm/Volt ou simplesmente chamado de KV; este último determina a rotação máxima que o motor pode atingir [GALLAGHER, 2014]. O motor brushless utilizado no quadricóptero é da marca Turnigy modelo 2830/11 1000KV, apresenta corrente máxima de 21A, tensão de trabalho 11,1V, portanto, pode atingir até 11100rpm.

### 3.2 Eletronic Speed Control(ESC)

A sigla ESC traduzida para o português significa (controlador eletrônico de velocidade). Este dispositivo é utilizado para controlar a velocidade de giros de motores elétricos controlados por ele. O ESC é responsável por gerar o sinal trifásico a partir da corrente contínua fornecida pela bateria de LiPo. O controle de velocidade feito pelo ESC é a partir de uma entrada PWM de 50Hz/60Hz, o sinais de referência são enviados pelo controlador em uma de suas portas PWM. O ESC utilizado é da Marca Hobbypower com a capacidade de fornecer a corrente máxima de 30A.

O ESC adquirido também possui uma saída estabilizada de 5V/2A chamado de Battery Eliminator Circuit (BEC), que é utilizado para alimentar o receptor do Rádio Controle, o Arduino Mega 2560, os sensores, o circuito de telemetria 3DR, o módulo Bluetooth, módulo GPS e alguns LEDs acoplados.

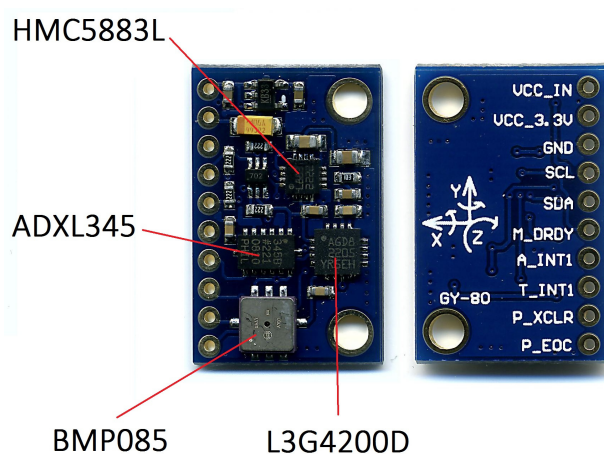


5 Figura 54 - Controlador de velocidade eletrônico

De modo a tornar o veículo autônomo é necessário obter informações acerca da atitude e da posição no referencial de coordenadas terrestres. Os controles e movimentos do quadricóptero, geralmente são obtidos por vários sensores como: acelerômetros, giroscópios, altímetros e magnetômetros e a posição geográfica do veículo pode ser determinada por GPS ou por outras tecnologias para ambientes onde o GPS não é eficiente.

Os sensores são componentes importantes e que possibilitam que o veículo se mova de forma mais real e estável possível, e assumem um papel fundamental no veículo pois toda a eficiência do controle depende da precisão das medidas efetuadas por estes sensores [SOUZA, 2011].

Utilizou-se uma unidade de medição inercial (IMU, da sigla em inglês) que incluam a presença da maioria dos sensores necessários, o modelo GY80 10DOF que contém o acelerômetro ADXL345, giroscópio L3G4200D, magnetômetro de três eixos HMC5883L e o barômetro digital BMP085, conforme mostra a figura 5 a disposição dos sensores da unidade inercial.



6 Figura 55 - Unidade Inercial GY80 10DOF

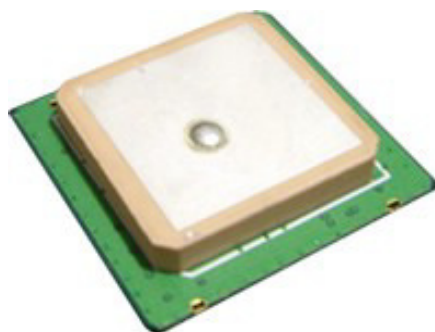
O sensor ultrassônico HC-SR04 (figura 6), utiliza sonar para determinar a distância de um objeto, ele permite a medição entre 2cm – 4mts sem contato, leituras estáveis e com uma precisão de leitura de aproximadamente 3mm. No projeto foi utilizado para medição de altitudes não superiores a 4mts, a leituras deste sensor a partir de quatro metros não são confiáveis, sendo utilizados as leituras do barômetro ou do GPS para satisfazerem os requisitos do voo autônomo.



7 Figura 56 - Sensor Ultrassônico

Um dispositivo de Sistema de Posicionamento Global é um sensor de útil e comumente utilizado para a UAV. Um dispositivo GPS pode ser usado para ajudar a determinar as suas próprias posições altitude, longitude e latitude. Ele recebe um sinal a partir de um satélite para calcular estas posições [GALLAGHER, 2014]. O ME-1000RW na figura 7 é um módulo receptor de GPS compacto que funciona a 1Hz, ou seja a cada segundo ele atualiza a sua posição, O receptor tem 51 canais de aquisição e

14 canais de rastreamento que são capazes de receber sinais de até 65 satélites GPS e informar a posição e o tempo precisos para serem lidos nas portas seriais.



8 Figura 57 - Módulo GPS ME-1000RW

### 3.3 Comunicação sem fio

O kit de comunicação por radiofrequência foi constituído por dois módulos transceptores (figura 8) que transmitem dados através de sinalização digital numa frequência de 433 MHz, é bastante compacto, possui alta sensibilidade, e seu desempenho é superior aos modelos mais conhecidos, como o Xbee. Possui alta potência de saída, e um ótimo alcance (aproximadamente um quilômetro), o transmissor é utilizado no quadricóptero em modo autônomo, enviando dados como, estado atual do Drone, e os dados das leituras dos sensores em tempo real.



9 Figura 58 - 3DR Radio Telemetry Kit 433Mhz

### 3.4 Bateria

Uma bateria que possui um bom desempenho é a bateria de Polímero de Lítio (LiPo). São as mais utilizadas em aplicações de aeromodelismo. As baterias de LiPo são baterias mais leves que os outros tipos de baterias vendidas comercialmente, tendo um peso de aproximadamente 188g. Esta bateria fornece energia tanto para os motores quanto para os circuitos eletrônicos [SÁ, 2012].

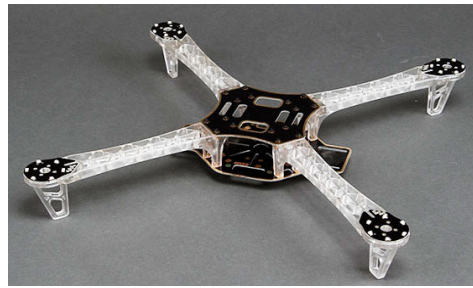
A bateria utilizada (figura 9) é da marca Lion Power tem capacidade de corrente de 2200mAh, taxa de descarga contínua 30C, esse “C” que vem nas características operacionais da bateria é o valor da capacidade de descarga, ou seja essa bateria de 30C consegue teoricamente, uma descarga trinta vezes o seu valor nominal.



10 Figura 59 - Bateria Lion Power 3s 11.1v 2200mAh

### 3.5 Frame de montagem

O quadro modelo Q450 Ghost Edition (figura 10), também chamado de Frame, possui 455 milímetros de largura e 53 milímetros de altura fabricado em material plástico transparente de boa qualidade, tem peso aproximado 280 gramas (sem componentes os eletrônicos).



11 Figura 60 - Frame do quadrrrotor

## 4. Firmware de controle

O firmware de controle foi desenvolvido sob a plataforma Arduino Mega, que permitiu técnicas avançadas de controle em tempo real, realizando os procedimentos necessários para manter o quadrrrotor na trajetória e altitude desejada.

Utilizou-se o Software MultiWii como sistema de controle, ele é um projeto de código aberto, é um software de uso geral, capaz de controlar um tricóptero, um quadricóptero ou um hexacóptero. Ele está disponível como software Open Source sob licença GPL. Ele é totalmente compatível com a plataforma Arduino. Foi inicialmente desenvolvido para suportar o console do Nintendo Wii, giroscópios e acelerômetros. Possui uma comunidade bastante ativa e seu código evolui constantemente, por conseguinte, hoje possui suporte para utilizamos magnetômetros, barômetros digitais, GPS, sonar, e uma plataforma de voo muito estável pode ser alcançada com alguns testes de campo.

### 4.1. Controle Proporcional, Integrativo e Derivativo(PID)

Uma das partes mais importantes do código de controle do quadrrrotor é o método de Controle PID, o quadrrrotor utiliza um esquema de controle em malha fechada responsável pela sua estabilidade e capacidade para manobras

## **4.2. Sistema de navegação autônoma**

O sistema de navegação utilizado foi usado como base o código de navegação criado sob a plataforma MultiWii, liberado no fórum oficial MultiWii.com em agosto de 2013, por seu criador EOSBand. A versão funciona com uma placa baseada no microcontrolador AtMega2560 e GPS de série.

## **5. Interface Web para Telemetria**

A interface Web para telemetria (figura 11) foi desenvolvida utilizando AngularJS no Front-End, pois este Framework javascript é indicado quando se quer ter mais produtividade. No Back-End foi utilizado a API Socket.io para se trabalhar com os dados em tempo real, e um servidor simples Express rodando com NodeJs. Esta aplicação tem o objetivo de estabelecer a interface entre o utilizador e o Drone, ela recebe os dados de telemetria do módulos transceptores 3DR Radio Telemetry, numa frequência de 433 MHz durante o voo, e os converte para informações gráficas de simples interpretação pelo usuário. Além de recepção de dados é possível transmitir dados para o Drone permitindo o controle de rotas de navegação.



12 Figura 61 - Interface Web

## 6. Resultados Obtidos

Durante o desenvolvimento do protótipo foram identificadas várias dificuldades que foram contornadas, e outras que não foram possíveis de serem contornadas. A montagem final do protótipo contendo todos os elementos descritos é apresentada na figura 13, o peso total do conjunto após a montagem ficou em aproximadamente um quilo e cem gramas



13 Figura 62 - Montagem completa do Drone

### 6.1. Testes de Voo

Foram realizados testes de voo para assegurar primeiramente que o Drone seria capaz de voar e se manter estável, sem quaisquer problemas. Até o terceiro teste, em que o Drone levantava do chão e logo caía, verificou-se que a hélice utilizada de dez polegadas não estava adequada ao projeto, era produzida uma força de empuxo muito grande. Diante do disposto foi efetuado o teste com mais dois diâmetros diferentes de hélices. Utilizou-se hélices de nove polegadas e hélices de 8 polegadas para os testes seguintes. O teste quatro e o teste cinco foram para encontrar a hélice adequada para o protótipo. Estes testes apesar de não apresentarem resultados satisfatórios, foi possível verificar que a hélice que produzia uma força de empuxo mais suave, e visualmente produziu menos vibrações foi a hélice de oito polegadas de diâmetro. Para os testes seguintes foi criada uma estrutura (figura 14) que permitiu que o foco dos testes ficasse somente nos eixos Pitch e Roll, porque até o momento o cenário de testes não estava isolado adequadamente para encontrar a origem da instabilidade.



14 Figura 63 - Estrutura para testes controlados

Esperava que o teste isolaria o eixo que estava causando a instabilidade. No entanto, os resultados obtidos foram semelhantes aos testes efetuados anteriormente, o Drone tornava-se instável em ambos os eixos e ficava se debatendo. Foram alterados métodos de testes, e repetidos várias vezes com diferentes valores de controle de PID. Alguns parâmetros testados fez com que o Drone não se estabilizasse, já outros parâmetros causavam uma sobrecorreção de estabilidade. Um conjunto de valores testados até conseguiram que o Drone ficasse estável, mas isso, até uma certa velocidade de aceleração dos motores, em que a sobrecorreção ficava demasiada.

A partir do oitavo teste foi implementado um algoritmo que calculava o valores PID dinamicamente utilizando as leituras do giroscópio, neste teste foi encontrado bons parâmetros para as constantes do controle PID, mas este, como todos os testes anteriores não foram satisfatórios, o Drone levantava do chão e acabava caindo ao chão levando a quebra de várias hélices. O nono e último teste o Drone decolou, e chegou a atingir vários metros de altura, ficou pairando no ar por pelo menos vinte segundos, mas também foi ao chão, quebrando os últimos kits de hélices disponíveis para os testes.

Depois vários testes problemáticos, outros procedimentos de testes de voo e novas variáveis foram consideradas, mas este foi o último teste de voo devido a limitações de tempo.

## 7. Considerações Finais

Neste trabalho foram apresentados todos os componentes necessários para se construir um Drone do tipo quadricóptero, cada parte estrutural que o compunha foi devidamente ajustada, contribuindo para o bom funcionamento do protótipo. Além disso o firmware de controle desenvolvido foi capaz de integrar todos os sensores necessários para atingir a meta de um voo autônomo.

A interface de telemetria desenvolvida apresentou bons resultados e cumpriu seu propósito, atuando como fonte de dados para captação de dados do sistema em tempo real. Os resultados finais mostraram que nem todas as especificações e a metas estabelecidas no início do projeto foram atendidas. Apesar de que o voo totalmente autônomo não foi alcançado, o Drone tinha claramente o potencial para atingir o objetivo de voo, todas as etapas metodológicas foram criteriosamente seguidas para que o resultado fosse satisfatório.

É importante observar que se, uma destas etapas de desenvolvimento ou testes não sendo bem sucedida prejudicaria as outras etapas. Várias iterações de projeto foram feitas na tentativa de criar um Drone adequado para os objetivos do projeto e ao protótipo final

potencial para o sucesso. Se o tempo disponível fosse suficiente, a adequação do sistema de controle de estabilidade seria possível, e o tão sonhado voo estável seria alcançado. O Drone tinha o poder de voar a grande altitudes, mais faltava a estabilidade. Mais iterações asseguraria o seu futuro sucesso.

## References

- AUSTIN, Reg. Unmanned Aircraft Systems: UAVs design, development and deployment. Wiltshire: John Wiley & Sons Ltd, p. 332, 2010.
- GALLAGHER, A.; GUAYAQUIL, S.; MCINTYRE, W.; NIRO, A.; PUZZY, A.; UYGUR, A. Surveillance UAV. 2014. 110f. A Major Qualifying Report (degree of Bachelor of Science) - Worcester Polytechnic Institute – Massachusetts, US.
- SÁ, Regiane Cavalcante. Construção, Modelagem Dinâmica e Controle PID para Estabilidade de Um Veículo Aéreo Não Tripulado do Tipo Quadrirotor. 2012. 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Teleinformática) – Universidade do Ceara, Fortaleza CE, Brasil.
- STROJNY, B. A. Integration of conformal GPS and VHF/UHF communication antennas for small UAV applications. Antennas and Propagation. 3rd. EuCAP 2009. European Conference, 2014.
- UAS Center of Excellence (2010). U.S. army roadmap for unmanned aircraft systems 2010-2035. Technical report, Fort Rucker, Alabama.
- VACHTSEVANOS, G.; TANG, L.; REIMANN, J. (2004). An intelligent approach to coordinated control of multiple unmanned aerial vehicles. In American Helicopter Society International, I., editor, In Presented at the American Helicopter Society 60th Annual Forum, Baltimore, MD.