unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

LEANDRO LEME

Projeto de Multirotores e Dispositivos Mecânicos Embarcados: A utilização do Arduino como interface

Guaratinguetá - SP
2017

Leandro Leme

Projeto de Multirotores e Dispositivos Mecânicos Embarcados: A utilização do Arduino como interface

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador (a): Profº Dr. João Zangrandi Filho

Guaratinguetá - SP
2017

Leme, Leandro
L551p Projeto de multirotores e dispositivos mecânicos embarcados: a utilização do Arduino como interface / Leandro Leme – Guaratinguetá, 2017.
62 f : il.
Bibliografia: f. 55-57

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientador: Prof. Dr. João Zangrandi Filho

1. Veículo aéreo não tripulado. 2.Arduino(Controlador programável). 3. Rotores. I. Título

CDU 621.67

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595

unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

LEANDRO LEME

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE **"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"**

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. JOÃO ZANGRANDI FILHO
Orientador/UNESP-FEG

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
UNESP-FEG

Prof. Dr. ROBINSON CARLOS TEIXEIRA
UNESP-FEG

NOVEMBRO, 2017

DADOS CURRICULARES

LEANDRO LEME

NASCIMENTO	15.01.1986 ï Bauru / SP
FILIAÇÃO	AROLDO LEME LÁZARA MARIA VICENTIN
2001/2003	Técnico em Informática Colégio Prevê Objetivo
2005/2007	Técnico em Mecânica de Aeronaves Escola de Especialistas de Aeronáutica
2008 - 2017	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

dedico este trabalho à minha amada esposa Natália, que esteve ao meu lado em todos os momentos, me apoiando e incentivando de modo amoroso e essencial para a conclusão deste curso.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida, da graça e do amor incondicional. Agradeço pela minha vida, minha saúde, pela minha família, e por ser a lâmpada para os meus pés,

à minha amada esposa Natália, que inúmeras vezes suportou sozinha as inúmeras tarefas domésticas e os cuidados de nosso filho, além de me encorajar na realização deste sonho,

ao meu filho Lucas pelo companheirismo, amor fraternal, obediência e paciência com os trabalhos escolares do papai,

aos meus pais Tuthy e Aroldo pelos valores e caráter ensinados a mim, pelo esforço e preocupação com minha criação e formação acadêmica,

aos professores da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, que se dedicam ao preparo de aulas complexas e à atividades extracurriculares que fortalecem nossa faculdade,

à SDEP, seção onde trabalhei por cinco anos e obtive a amizade e o apoio de todos os seus integrantes, além de passar momentos que permanecerão para sempre na memória, e

à Força Aérea Brasileira, que fortaleceu os valores ensinados pelos meus pais e me permitiu estudar, trabalhar e sustentar minha preciosa família.

ñA ciência humana de maneira nenhuma nega a existência de Deus. Quando considero quantas e quão maravilhosas coisas o homem compreende, pesquisa e consegue realizar, então reconheço claramente que o espírito humano é obra de Deus, e a mais notável.ò

Galileu Galilei

RESUMO

Viabilizar a aplicação da atual tecnologia disponível referente ao controle de multirotores em atividades comerciais, com a finalidade de aumentar a sua eficácia, foi o objetivo deste trabalho, que não somente estuda os multirotores como também a sua integração com dispositivos mecânicos embarcados necessários ao desempenho de variadas funções. Tal motivação aconteceu em virtude da crescente tendência no uso de multirotores não tripulados em diversos tipos de missões civis e militares, criando um mercado promissor, devido às vantagens em termos de segurança e custos operacionais reduzidos. Com base na teoria de voo dos multirotores, foi realizado um estudo detalhado quanto aos seus componentes, indicando suas funções e como se integram como um sistema, idealizado o projeto de um hexarotor conforme dados de valor de mercado, desempenho e aplicabilidade, e abordada de modo prático a montagem dos componentes. Estudou-se a integração de dispositivos mecânicos embarcados com o propósito de reduzir a complexidade de circuitos eletrônicos e de utilizar conhecimentos básicos de programação. As qualidades de voo do multirotor, o peso total de decolagem, a operação dos dispositivos mecânicos embarcados e o valor comercial do projeto foram apresentados como resultados deste estudo e conclui-se que o projeto de multirotores e a integração dos sistemas com um hardware de código aberto dispõem de grande vantagem econômica.

PALAVRAS-CHAVE: Hexarotor. Drone. Arduino. Dispositivos mecânicos embarcados. Aplicação de drones. Tecnologia de drones. Programação de Arduino.

ABSTRACT

The objective of this work was to make feasible the application of the current available technology related to multirotors control in commercial activities, in order to increase its efficiency. This work not only studies the multirotors but also their integration with embedded mechanical devices necessary for the performance of functions. This motivation was due to the growing trend in the use of unmanned multirotors in various types of civilian and military missions, creating a promising market due to the advantages in terms of security and reduced operational costs. Based on multirotors flight theory, a detailed study was carried out on its components, indicating their functions and how they integrate as a system, idealizing the design of a hexarotor according to market value, performance and applicability data, and assembling the components. The integration of embedded mechanical devices was studied in order to reduce the complexity of electronic circuits and to use basic programming knowledge. The multirotor flight qualities, the total takeoff weight, the operation of the embedded mechanical devices and the commercial value of the project were presented as results of this study and it was concluded that the multirotor design and the integration of the systems with a open code hardware have a great economic advantage.

KEYWORDS: Hexarotor. Drone. Arduino. Embedded mechanical devices. Drones application. Drones technology. Arduino programming.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 ï Hermes 450 16
Figura 02 ï DJI AGRAS MG-1 16
Figura 03 ï ROV 19
Figura 04 ï Mars Rover 20
Figura 05 ï Predator Gray Eagle 21
Figura 06 ï Aeronave com quatro rotores 22
Figura 07 ï Curtiss-Wright VZ-7 22
Figura 08 ï Multirotores comerciais 23
Figura 09 ï Classificação dos multirotores 23
Figura 10 ï Forças, torques e ângulos de um quadrotor 24
Figura 11 ï Dinâmica de voo de um quadrotor 25
Figura 12 ï Quadro 28
Figura 13 ï Motor sem escova de corrente contínua ï estator à esquerda e rotor à direita 29
Figura 14 ï Controlador eletrônico de velocidade (ESC) 31
Figura 15 ï Bateria Turnigy de 4 células, 5200 mAh, 10c 32
Figura 16 ï Placa de distribuição de energia 32
Figura 17 ï Conectores EC5 (esquerda) e XT60 (direita) 33
Figura 18 ï Quadro selecionado para o hexarotor 35
Figura 19 ï Montagem do braço do hexarotor 40
Figura 20 ï Posicionamento da controladora de voo 41
Figura 21 ï Conexões da controladora de voo 41
Figura 22 ï Bateria, placa de desenvolvimento e câmera de voo em primeira pessoa 42
Figura 23 ï Transmissor de vídeo 42
Figura 24 ï Receptor do rádio controle 43
Figura 25 ï Placa distribuidora de energia 43
Figura 26 ï Arduino UNO 45
Figura 27 ï Protótipo do lançador de cápsulas 48
Figura 28 ï Posições do servo: fechado à esquerda e aberto à direita 49
Figura 29 ï Espaçadores das cápsulas 49
Figura 30 ï Suporte estabilizador de câmera 50
Figura 31 ï Voo de verificação com peso de decolagem de 10,93 kgf 51
Figura 32 ï Lançamento de cápsulas 52

Figura 33 ï Altura de voo de 106 m 52
Figura 34 ï Velocidade de voo de 18 m/s 52
Quadro 01 ï Controladoras de voo mais usuais 27

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 ï Estimativa de peso para projetar dispositivos mecânicos embarcados 34
Tabela 02 ï Comparação entre as estruturas de multirotores disponíveis no mercado 35
Tabela 03 ï Dados de operação do motor Tarot 4114 320kv 36
Tabela 04 ï Estimativa de peso do hexarotor operacional 37
Tabela 05 ï Componentes selecionados e cálculo de peso total de decolagem 39
Tabela 06 ï Valor total de construção do hexarotor 53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RPA	*Remotely Piloted Aircraft* (Aeronave Remotamente Pilotada)
UAV	*Unmaned Aerial Vehicle* (Veículo Aéreo Não Tripulado)
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
ROV	*Remotely Operated Vehicle* (Veículo Operado Remotamente
BEC	*Battery Ellimination Circuit* (Circuito de Isolamento da Bateria)
ESC	*Eletronic Speed Controler* (Controlador Eletrônico de Velocidade)
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
AWG	*American Wire Gauge* (Escala Americana de Bitola de Fios)
OSD	*On Screen Display* (Imagem sobreposta a uma imagem de tela)
PMU	*Power Management Unit* (Unidade de Gerenciamento de Potência)
PCB	*Printed Circuit Board* (Placa de Circuito Impressa)
DC	*Direct Current* (Corrente Contínua)
GPS	*Global Positioning System* (Sistema global de posicionamento)
LED	*Light Emitting Diode* (Diodo Emissor de Luz)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
1.1 ASPECTOS ECONÔMICOS 15
1.2 OBJETIVO 17
1.3 JUSTIFICATIVA 17
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 18
2 MULTIROTORES 19
2.1 DEFINIÇÃO E HISTÓRICO 19
2.1.1 Drone 19
2.1.2 Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) 20
2.1.3 Multirotores 21
2.2 TEORIA DE VOO DE MULTIROTORES 24
3 EQUIPAMENTOS E SISTEMAS DO MULTIROTOR 26
3.1 PLACA CONTROLADORA DE VOO 26
3.2 ESTRUTURA 27
3.3 MOTOR 29
3.4 HÉLICE 30
3.5 CONTROLADOR DE VELOCIDADE DO MOTOR 30
3.6 BATERIA E PLACA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA 31
3.7 TRANSMISSORES E RECEPTORES 33
4 PROJETO E MONTAGEM DO MULTIROTOR 34
4.1 APLICAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DO MULTIROTOR 34
4.2 CÁLCULOS DE CARGA 36
4.3 SELEÇÃO DOS COMPONENTES 37
4.4 MONTAGEM DO HEXAROTOR 39
5 DISPOSITIVOS MECÂNICOS EMBARCADOS 44
5.1 ARDUINO COMO INTERFACE 44
5.2 PROGRAMAÇÃO DO ARDUINO 45
5.3 CONTROLE DE CÂMERA PAN/TILT 46
5.4 LANÇADOR DE CÁPSULAS 47
5.5 SUPORTE ESTABILIZADOR DE CÂMERA 49
6 RESULTADOS 51
7 CONCLUSÕES 54

REFERÊNCIAS 55
APÊNDICE A ï Programação utilizada no Arduino 58

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho tem a finalidade de estudar as características, os componentes e aplicações de multirotores em diversas áreas, para o desenvolvimento tecnológico de atividades que podem ser melhor realizadas com o apoio destes equipamentos. Há de se destacar que as aplicações foco deste estudo requerem capacidade de armazenar e transportar massas semelhantes ao do próprio veículo.

Os multirotores foram apresentados com um breve histórico, teoria de voo e suas classificações. Subsequentemente foram analisados quanto ao seu funcionamento, tipos e funções de cada componente, permitindo, assim, identificar as vantagens e desvantagens de cada configuração para obter-se uma aplicação satisfatória.

As aplicações dos multirotores em várias atividades foram abordadas com uma visão prática, fornecendo dados valiosos para a concepção de equipamentos utilizando a plataforma de hardware livre Arduino UNO como sistema de controle. Foram concebidos projetos para futuro desenvolvimento nas áreas de fotografia e filmagem, controle de voo e controle de pragas.

Os resultados do estudo foram analisados e discutidos, salientando sua capacidade de aumentar a eficácia de trabalhos complexos.

1.1 ASPECTOS ECONÔMICOS

Existem vários projetos na aérea de veículos aéreos não tripulados destinados a preencher um vazio existente no mercado, porém a maior parte destes projetos apresenta custos elevados, devido principalmente ao tipo de aeronaves utilizadas para esta finalidade. A construção e operação destas aeronaves torna-se inviável e dificultosa para pequenas aplicações pois dependem de uma grande estrutura. A aeronave Hermes 450, Figura 01, é operada por uma equipe com mais de 50 militares, conforme extrato da reportagem publicada pela Agência Força Aérea:

> Mais de 50 militares do Esquadrão Hórus (1°/12° GAV) estão no Rio de Janeiro para participar da defesa aérea durante os Jogos Olímpicos e Paraolímpicos. A unidade, sediada na Base Aérea de Santa Maria, no Rio Grande do Sul, opera aeronaves remotamente pilotadas (RPA).

> Para a missão Rio 2016 serão utilizados os RPA de modelo Hermes 450. (AGÊNCIA FORÇA AÉREA, 2016)

Figura 01 ï Hermes 450



fonte: Agência Força Aérea (2016)

Em contrapartida, empresas internacionalmente reconhecidas na fabricação e comercialização de multirotores têm se especializado em pequenas aplicações que não exigem grandes equipes, devido ao grau de automação dos multirotores, porém o custo de aquisição é muito elevado. No caso do multirotor apresentado na Figura 02, o valor de mercado é de R$ 72.000,00. (MERCADO LIVRE, 2017)

Figura 02 ï DJI AGRAS MG-1



fonte: DJI (2017)

1.2 OBJETIVO

Devido à crescente utilização dos multirotores em aplicações comerciais e de recreação, muita tecnologia foi desenvolvida e disponibilizada no mercado internacional para viabilizar o projeto e construção destes veículos aéreos, porém a integração destes componentes é complicada e requer um conhecimento mais avançado.

O objetivo deste trabalho é viabilizar a aplicação da tecnologia referente ao controle de veículos aéreos em atividades comerciais, bem como projetar e integrar sistemas eletromecânicos através da utilização e programação do Arduino.

1.3 JUSTIFICATIVA

Para se aplicar uma tecnologia de monitoramento e aplicação aeronáutica o pequeno investidor deve desembolsar uma quantia inviável se comparado aos benefícios alcançados.

Existe a necessidade de desenvolver equipamentos viáveis para utilização em pequenas e importantes aplicações, que agregarão muito valor à estes investimentos com um baixo custo.

É importante ressaltar que, com a tecnologia modular, leve e reduzida disponível atualmente, o projeto de multirotores para pequenas aplicações se caracteriza por utilizar componentes de valor e capacidade adequados à sua utilização, não havendo a necessidade de superdimensionamento.

Os multirotores comercializados atualmente dispõem de componentes idênticos aos que serão utilizados no projeto e possuem apenas o adicional de serem controlados por softwares próprios e dedicados, além de serem produzidos por técnicas industriais de larga escala.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No primeiro capítulo é apresentada uma introdução com características gerais do projeto como o objetivo, os aspectos econômicos, a justificativa e a organização do trabalho.

No segundo capítulo os multirotores são descritos em seus aspectos históricos, operacionais e as suas classificações.

No terceiro capítulos os componentes do multirotor são explicados individualmente, bem como suas especificações, tipo e nomenclatura,

No quarto capítulo todos os componentes são analisados e selecionados para comporem a montagem de um hexarotor, que também é abordada neste mesmo capítulo.

No quinto capítulo os dispositivos mecânicos embarcados são abordados de maneira bem prática, primeiramente explicitando a necessidade de serem embarcados em um veículo aéreo e posteriormente projetando tais dispositivos para serem integrados ao hexarotor.

No sexto capítulo são exibidos e explicados os resultados de desempenho do hexarotor e dos protótipos dos dispositivos mecânicos embarcados, além de mostrar uma tabela com os custos inerentes ao projeto.

O sétimo capítulo contém a conclusão do trabalho, onde foi discutida a viabilidade financeira e aplicabilidade do projeto, são propostos trabalhos futuros e feitas considerações finais.

2 MULTIROTORES

2.1 DEFINIÇÃO E HISTÓRICO

Para entender o conceito e a história do termo multirotor utilizado atualmente, necessitamos definir outros dois termos que geralmente são aplicados ao mesmo veículo aéreo foco deste trabalho. Tais termos são: Drone e veículo aéreo não tripulado (UAV).

2.1.1 Drone

Segundo Baichtal (2015), o termo drone refere-se às abelhas que realizam seu trabalho sendo comandadas por uma rainha distante delas, portanto este termo é utilizado para designar robôs autônomos que realizam algum tipo de trabalho com poucos comandos humanos que estão geograficamente distantes.

O nível de automação destes robôs geralmente limita-se a realizar atividades que seriam muito complexas para um ser humano que não está no mesmo local que a máquina, como, por exemplo, andar sobre uma superfície acidentada, manter a estabilidade de um voo ou manter a navegabilidade em águas profundas. Para Baichtal (2015), estes três exemplos de automação podem ser classificados como Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs ou UAVs), ilustrado na Figura 01, Veículo Submarino Operado Remotamente (ROVs), representado na Figura 03, e os Rovers, mostrado na Figura 04.

Figura 03 - ROV



fonte: Openrov (2017)

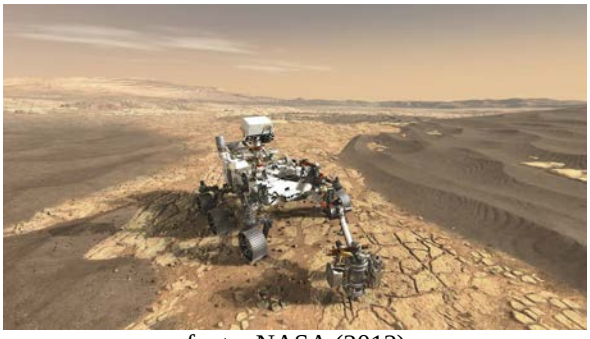
Motivados principalmente pela segunda guerra mundial e pela era espacial, os primeiros robôs móveis mundialmente famosos foram o tanque alemão de demolição Golias e os exploradores espaciais Moonwalker e Sojourner.

O tanque alemão Golias, desenvolvido em 1944 durante a segunda guerra mundial era menor que um carro pequeno atual e tinha a finalidade de carregar explosivos em missões de demolição. Ele podia ser pilotado remotamente via sinais de rádio. (SÉCULOS DE HISTÓRIA, 2013)

O explorador lunar Moonwalker foi desenvolvido em 1966 para conferir maior mobilidade ao astronauta que sentia dificuldade em caminhar em um ambiente de reduzida aceleração da gravidade. Como o controle era feito dentro do próprio veículo, sua automação limitava-se a mover oito pernas mecânicas em sincronia para simular uma caminhada humana. (BUCKLEY, 2015)

Já o explorador de marte Sojourner, de 1997 foi o primeiro robô móvel autônomo a ser controlado remotamente e a operar no espaço, mais especificamente no planeta Marte, sua missão durou cerca de três meses desde o pouso em solo marciano e terminou após a perda de sua comunicação. As missões em Marte continuaram a utilizar os Rovers e o mais recente em desenvolvimento, ilustrado na Figura 04, tem o seu lançamento previsto para 2020. (NASA, 2012)

Figura 04 ï Mars Rover



fonte: NASA (2012)

2.1.2 Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs)

Os VANTs englobam boa parte dos robôs móveis autônomos e são os mais popularmente conhecidos como drone. Geralmente são classificados conforme sua máxima

massa de decolagem, sua altitude máxima de operação e seu tempo de autonomia. Outra classificação que pode ser feita é quanto o seu mecanismo de sustentação, que pode ser exemplificado, dentre outros tipos, por asa fixa, Figura 01, asa rotativa, Figura 02, foguetes e balões.

Os VANTs de asa fixa tem o seu desenvolvimento iniciado durante a primeira guerra mundial, com a finalidade de substituir bombas voadoras por torpedos aéreos. O controle destes VANTs foi viabilizado devido a giroscópios desenvolvidos por Elmer Sperry. (SILVEIRA, 2014)

Durante o período entre a primeira e a segunda guerra mundial, o Reino Unido converteu diversas aeronaves para serem controladas via sinais de rádio e servirem de alvos aéreos.

Após este período, observou-se a necessidade de construção de aeronaves de reconhecimento, como o famoso Gray Eagle mostrado na Figura 05, produzido pela General Atomics, que posteriormente foi modificado para carregar e disparar diversos tipos de armamento. Este VANT tem a capacidade de voar por 25 horas, em uma altitude de 26.000 pés a uma velocidade indicada de 300 km/h. (GENERAL ATOMICS AERONAUTICAL, 2017)

Figura 05 ï Gray Eagle



fonte: General Atomics Aeronautical (2017)

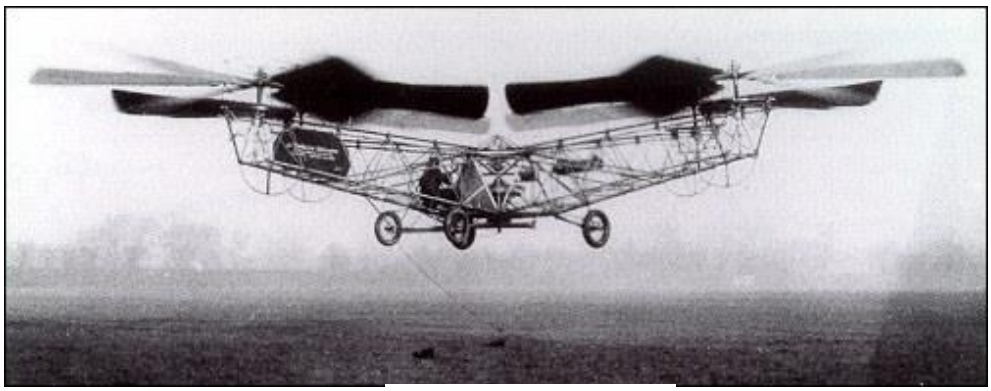
2.1.3 Multirotores

A rigor, a nomenclatura multirotores pode ser aplicada a qualquer aeronave de asa rotativa que possua mais de um rotor e que a sustentação para o voo se origine destes rotores,

porém aeronaves de grande porte deste tipo que não possuem capacidade para o voo não tripulado são comumente chamadas de helicópteros ou tiltrotor.

Desde 1922, já se tem notícia da produção e alguns voos de multirotores. Na data mencionada, o engenheiro russo Dr. George E. Bothezat desenvolveu uma aeronave com quatro rotores, Figura 06, em uma estrutura com formato em X. O voo tinha uma baixa potência, não era responsivo, sua mecânica era muito complexa e o piloto tinha muita dificuldade em manter um voo estável. Este modelo realizou cerca de 100 voos até o fim de 1923 e atingiu cerca de cinco metros de altura. (LAMBERMONT; PIRIE, 1958)

Figura 06 ï Aeronave com quatro rotores



fonte: Lambermont e Pirie (1958)

Já em 1958, foi realizada uma nova tentativa de criar um multirotor com quatro rotores de aplicação militar, o Curtiss-Wright VZ-7, Figura 07, que era controlado modificando-se a aceleração de cada um dos quatro rotores. (MAHAJAN, 2017)

Figura 07 ï Curtiss-Wright VZ-7



fonte: Mahajan (2017)

O desenvolvimento de multirotores teve seu início para corrigir problemas de estabilidade de projetos que utilizavam apenas um rotor para gerar sustentação, porém o voo de um multirotor não podia ser controlado facilmente por pilotos humanos já que os computadores mecânicos eram muito rudimentares. Sendo assim, as aeronaves de apenas um rotor corrigiram seu problema de estabilidade variando o ângulo das pás de seu rotor e adicionando um rotor em sua cauda, para direcionar a aeronave com estabilidade e para controlar o efeito de reação do torque do rotor principal, respectivamente.

Com o desenvolvimento de computadores eletrônicos e do controle da mecânica de voo nas últimas décadas, foi possível estabilizar o voo de multirotores de modo que um operador pudesse controlá-lo facilmente. Aliado com o desenvolvimento de técnicas de comunicação remota e de localização por satélites, os multirotores fornecem facilidade de construção mecânica, reduzida massa de decolagem, alta estabilidade e voo autônomo, observado na Figura 08. (DJI, 2017)

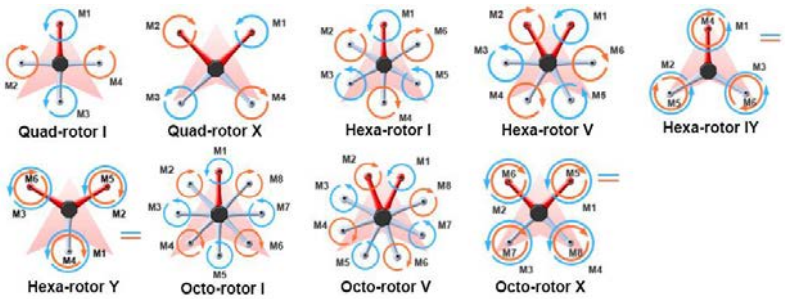
Conforme a Figura 09, os multirotores atuais são classificados quanto ao seu número de rotores e a disposição dos motores em sua estrutura principal.

Figura 08 ï Multirotores comerciais



fonte: DJI (2017)

Figura 09 ï Classificação dos multirotores



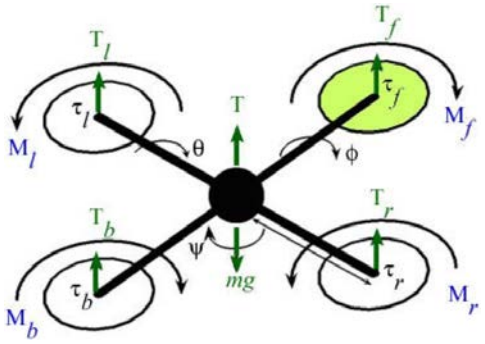
fonte: DJI (2015)

2.2 TEORIA DE VOO DE MULTIROTORES

O primeiro requisito para o voo de multirotores é a sustentação. A sustentação é gerada pelo movimento rotacional de conjuntos de hélices acopladas em motores que, ao realizar o seu movimento imersa em um fluido compressível gera uma força de empuxo, que será utilizada para gerar sustentação, e uma força de arrasto. (HOMA, 2002)

Devido à força de arrasto também gerada pela hélice, o motor será submetido à um torque que fará a sua base girar caso não seja equilibrado por um torque igual e de sentido oposto. A Figura 10 representa o esquema de um quadrotor e as forças atuantes em seus motores, onde as letras T, Ű ď, ◖ e Ǫ, representam, respectivamente, as grandezas de força, torque, ângulo de arfagem (do inglês *pitch*), ângulo de rolagem (do inglês *roll*) e ângulo de guinada (do inglês *yaw*). Os subíndices f, l, r e b representam os motores da frente, do lado esquerdo, do lado direito e o de trás.

Figura 10 ï Forças, torques e ângulos de um quadrotor



fonte: Casolo (2010)

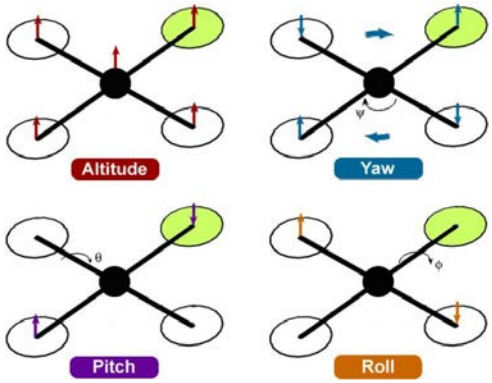
A Figura 10 mostra um voo estabilizado em seus três eixos, ou seja, a soma dos torques e das forças é igual a zero. Esta condição somente é possível devido às rotações dos motores da frente e de trás serem de sentido oposto às rotações dos motores da esquerda e da direita, para equilibrar os torques. (BEER et al., 2013)

De maneira a gerar uma força de direção diferente da direção da força peso, os multirotores devem inclinar o plano de rotação de suas hélices e para isso têm que modificar os ângulos de arfagem e de rolagem. Quando a direção da força de sustentação é diferente da direção da força peso, a força resultante tem duas componentes, uma horizontal (utilizada para o deslocamento do multirotor) e outra vertical (para equilibrar a força peso).

Além disso, é necessário que o multirotor altere também o seu ângulo de guinada, para se realizar uma curva coordenada. (HOMA, 2002)

Para realizar as mudanças de ângulos (podemos chamar também de movimentos) de arfagem e rolagem o multirotor utiliza a mesma lógica, ou seja, se aumentarmos a rotação do motor de trás e reduzirmos, na mesma proporção, a rotação do motor da frente, a soma dos momentos na estrutura do multirotor resultará em um momento que a inclinará pra frente (movimento de arfagem ou *pitch*). De modo similar, para obter um movimento de rolagem (*roll*), procede-se da mesma maneira, como ilustrado na Figura 11. (BEER et al., 2013)

Figura 11 ï Dinâmica de voo de um quadrotor



fonte: Casolo (2010)

O movimento de guinada resulta de uma modificação na rotação dos pares de motores, ou seja, se aumentarmos a rotação dos motores da frente e de trás e reduzirmos na mesma proporção a rotação dos motores da direita e da esquerda, a soma dos torques deixará de ser zero e a estrutura do multirotor vai rotacionar horizontalmente no sentido inverso da rotação dos motores que incrementaram sua rotação, exemplificado na Figura 11.

De modo mais intuitivo do que os movimento anteriormente descritos, o aumento da altitude é alcançado aumentando conjuntamente a rotação de todos os motores a partir do estado de referência (com a altitude nivelada), momento em que a força de sustentação resultante será maior do que a força peso. (BEER et al., 2013)

3 EQUIPAMENTOS E SISTEMAS DO MULTIROTOR

3.1 PLACA CONTROLADORA DE VOO

A estabilidade é um fator muito importante para o voo dos multirotores, pois, para controlar todos os motores de modo a se obter a estabilidade e a navegabilade requerida, é necessário uma resposta muito rápida aos fatores que influem nestas qualidades de voo. Se esta tarefa de manter o multirotor estável ou em uma atitude (posição do plano da estrutura em relação à linha do horizonte) desejada fosse conferida ao piloto, o mesmo ficaria tão sobrecarregado com esta tarefa que não poderia se concentrar em calcular e manter a rota e a altitude desejada.

Para aliviar a pesada carga que recaiu sobre o piloto nos primeiros voos de um quadrotor, foram criadas as placas controladoras de voo eletrônicas que tem a missão de receber os dados coletados através de giroscópios e acelerômetros e enviar um sinal elétrico aos dispositivos responsáveis por controlar a velocidade dos motores. Tais controladoras também recebem a instrução de atitude desejada do piloto e a comparam com a atitude atual e enviam um sinal aos motores, caso estas informações forem diferentes, para corrigir a atitude atual da aeronave. (ARDUPILOT, 2016); (DJI, 2015); (DOMINIC CLIFTON, 2017)

Além destas funções básicas presentes em todas as controladoras de voo de multirotores, muitas delas contam com um sistema de posicionamento por satélites, o que lhes conferem a capacidade de realizar voos pairados sem a interferência do piloto mesmo contra ventos muito fortes. Outra funcionalidade de um drone equipado com este sistema de posicionamento é a de cumprir planos de voo pré-programados também sem a interferência do piloto. (ARDUPILOT, 2016); (DJI, 2015); (DOMINIC CLIFTON, 2017)

Atualmente existem várias controladoras de voo no mercado, e cada uma deles apresenta características diferentes, conforme apresentado no Quadro 01:

Quadro 01 ï Controladoras de voo mais usuais

CONTROLADORA	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS
ARDUPILOT MEGA V2.8	Possui hardware e software de código aberto, de configuração complexa, para diversos tipos de veículos autônomos, incluindo asa fixa, ROVs e Rovers. Tem a capacidade de controlar multirotores de três, quatro, seis e oito motores.
DJI NAZA M V2	Opera apenas com multirotores e possui software de código fechado, de simples configuração. Opera com trirotores, quadrotores, hexarotores e octarotores.
CC3D e SPRACING F3	Pequenas placas controladoras utilizadas para aeronaves menores, com alta capacidade de manobra. É controlada por software livre e sua configuração é muito complexa devido ao tipo de voo.

fonte: ARDUPILOT (2016); DJI (2015); Clifton (2017)

3.2 ESTRUTURA

Também chamado de quadro ou *frame*, do inglês, e ilustrado na Figura 12, a estrutura de um multirotor é o que vai acomodar e fixar todos os componentes necessários para o voo. A disposição dos motores, das baterias e da controladora de voo é pré-definida conforme o tipo de estrutura escolhida. O diâmetro total da estrutura é medida em milímetros e indica o diâmetro da circunferência formado pelo eixo dos motores instalados na estrutura.

Basicamente a estrutura define o número de motores de um multirotor, ou seja, ao escolher um quadro para iniciar o projeto de um multirotor definimos também quantos motores serão instalados no mesmo. Da mesma forma, o diâmetro total do quadro indica qual o máximo diâmetro das hélices de modo que elas não se toquem.

Segundo Baichtal (2015), além da quantidade de motores e de seu diâmetro total, os quadros possuem outros atributos importantes para o projeto, tais como:

- Peso: É um fator a ser considerado em todos os componentes de uma aeronave, porém no caso do quadro é mais crítico, pois o material de sua construção será determinante na maior parcela de peso do drone e, consequentemente, na sua capacidade de carga útil. Os materiais de construção dos quadros mais comuns são, em ordem crescente de peso final, os seguintes: Fibra de carbono, alumínio, plástico, madeira.
- Robustez: Também depende do material do quadro e é importante considerar o peso de todos os componentes que o drone deverá suportar e a carga útil prevista para o projeto. No caso de uma eventual queda, uma maior robustez irá garantir a sobrevivência de vários componentes, porém com o agravo do aumento do peso.
- Estrutura de pouso: Conforme a aplicação prevista para o multirotor, o quadro deverá conter uma estrutura de sustentação do drone no solo, levando em conta que a maior parte dos equipamentos necessários para o propósito designado serão instalados na parte inferior do drone. A opção de estrutura de pouso retrátil deve ser considerada, pois pode interferir no movimento de dispositivos mecânicos instalados ou na captura de imagens.
- Fixação de componentes: Para fixar os componentes eletrônicos e mecânicos no drone o quadro deve conter bases de fixação, furação apropriada e amortecedores de vibração, no caso da controladora de voo, pois a mesma deverá ser fixada na estrutura de modo a reduzir a vibração causada pelos motores e pelas hélices, por causa da interferência na eficiência dos sensores. Os motores possuem furação específica para a montagem que devem coincidir com a furação do *frame*.

Figura 12 ï Quadro



fonte: Foxtech (2017)

3.3 MOTOR

Atualmente os motores mais utilizados e mais eficientes para utilização em multirotores são os do tipo sem escova de rotação externa. Estes motores são os mais utilizados pois os de rotação externa proporcionam melhor fixação das hélices e os modelos sem escova são menores e mais eficientes que os demais.

Os motores sem escova necessitam de um circuito eletrônico para controlar sua rotação e seu torque onde a comutação das polaridades de suas bobinas estatoras é realizada. Deste circuito eletrônico saem três ondas de corrente contínua moduladas por largura de pulso que irão alimentar as bobinas estatoras do motor, controlando desta maneira o sentido e a potência de sua rotação.

A largura do conjunto estator do motor, mostrado na Figura 13, a altura do mesmo e a rotação por minuto por volt de tensão aplicada ao motor definem a sua especificação. Por exemplo, um motor 2204 2300kv representa um motor com um estator com 22 mm de diâmetro externo, 4 mm de altura e 2300 rpm por volt de tensão aplicada.

Figura 13 ï Motor sem escova de corrente contínua - estator à esquerda e rotor à direita



fonte: Produção do próprio autor

A fixação das hélices no motor é outro fator muito importante na definição do mesmo. O tipo de fixação que o motor oferecer para as hélices definirá quais os conjuntos poderão ser utilizados.

3.4 HÉLICE

As hélices são fixadas no motor e são responsáveis por transformar a rotação deste para uma força perpendicular ao plano de rotação.

As características mais importantes das hélices são o número de pás, o diâmetro e o passo. O número de pás das hélices mais usuais são duas ou três, sendo que a de três pás geralmente é utilizada para drones acrobáticos. O diâmetro da hélice é definido pelo diâmetro do disco que é formado quando a mesma gira e o seu passo indica qual a distância percorrida após uma rotação completa.

As duas primeiras dimensões são definidas em polegadas e especificadas separadas por um ñxò e o terceiro número indica a quantidade de pás. Por exemplo uma hélice 5x4.5x3 representa uma hélice com 5 pol de diâmetro, 4.5 pol de passo e 3 pás.

Para gerar uma força de sustentação igual girando em sentido diferente, as hélices têm formatos diferentes. Portanto as hélices instaladas em motores que giram no sentido horário tem um formato diferente das hélices que serão instaladas em motores girando no sentido anti-horário. Caso a fixação seja feita apenas no eixo de rotação e o sentido de rotação for o horário, o tipo de rosca a ser utilizado na fixação da hélice deverá ser a rosca direita.

3.5 CONTROLADOR DE VELOCIDADE DO MOTOR

Para controlar cada um dos motores sem escova é necessário utilizar um circuito eletrônico para transformar o sinal de potência enviado pela controladora de voo em três pulsos com largura modulada que irá alimentar o motor. A carga necessária para alimentar o motor também é controlada por este circuito, que recebe a tensão direto da bateria para gerar os pulsos para o motor conforme a informação de potência recebida da controladora.

Operando desta forma, é o controlador de velocidade do motor que controla a corrente elétrica que será aplicada no motor, portanto uma de suas especificações é a tensão e a corrente máxima suportada por ele.

O controlador de velocidade do motor é usualmente conhecido como ESC (*Eletronic Speed Controler*), Figura 14, e muitos deles incorporam a funcionalidade de fornecer cinco

volts de corrente contínua para a controladora de voo, que é conhecida como BEC (*Battery Ellimination Circuit*).

Figura 14 ï Controlador eletrônico de velocidade (ESC)



fonte: Turnigy (2017)

3.6 BATERIA E PLACA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

Toda energia elétrica necessária para sustentar o voo de multirotores é armazenada em baterias, como a mostrada na Figura 15. O tipo de bateria mais comum utilizada em drones e aeromodelos é a de polímero de lítio, que são vendidas em pacotes fechados contendo o número de células desejado para o projeto, sendo que cada célula pode fornecer cerca de 3,7 volts. Outra vantagem deste tipo de bateria são as conexões, que permitem utilizar apenas um conector para alimentar o drone e outro conector para realizar a medição de tensão e a recarga.

A capacidade total da bateria representa o quanto de energia elétrica ela é capaz de armazenar e fornecer ao drone até que a sua tensão por célula reduza abaixo do aceitável para a integridade da bateria. A unidade de medida utilizada é o miliampère hora mAh. Já a capacidade de descarga da bateria indica a corrente elétrica máxima que ela poderá suportar, é indicada no corpo da bateria como um número seguido de um ñcò. Se multiplicarmos este número pela capacidade total da bateria obtemos a corrente máxima de descarga. Uma bateria de 1400 mAh e de 65c de descarga, sabemos que a corrente máxima da bateria é de 91 A.

Figura 15 ï Bateria Turnigy de 4 células, 5200 mAh, 10c

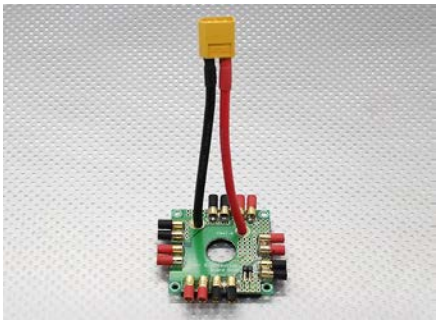


fonte: Hobbyking (2017)

As placas de distribuição tem a função principal de conectar a bateria, ou até mesmo mais de uma bateria, aos controladores de velocidade dos motores e também de alimentar os outros componentes eletrônicos do drone. Muitas placas possuem BEC integrado para fornecer 5 volts para os outros componentes.

Além de distribuir a energia elétrica contida na bateria, as placas de distribuição, Figura 16, também podem incluir algumas funcionalidades para evitar a utilização de muitos cabos elétricos no projeto do drone, como por exemplo conectar a controladora de voo aos motores para enviar o sinal de potência, ou até mesmo alimentar as luzes de indicação de posição. O conector da placa de distribuição de energia deve ser o mesmo conector de alimentação da bateria. Os conectores usualmente utilizados em drones são os do tipo XT60 ou EC5, como mostrado na Figura 17.

Figura 16 ï Placa de distribuição de energia



fonte: Hobbyking (2017)

Figura 17 ï Conectores EC5 (esquerda) e XT60 (direita)



fonte: Hobbyking (2017)

3.7 TRANSMISSORES E RECEPTORES

Os transmissores e receptores são utilizados nos multirotores para trafegar sinais de controle, usualmente em 2,4 GHz, de áudio e de vídeo, em 5,8 GHz. Os sinais de controle são gerados por um módulo acoplado no rádio controle em solo e são recebidos por um receptor acoplado no multirotor. Já os sinais de áudio e de vídeo trafegam no sentido contrário, ou seja, são gerados em um transmissor de vídeo acoplado no drone e recebidos por um receptor em solo.

O receptor de sinais de controle geralmente é alimentado pela controladora de voo, pois a mesma recebe 5 volts do BEC dos ESCs e os repassa ao receptor no mesmo cabo que liga cada canal do receptor à controladora, ou seja, no cabo de interligação entre um canal do receptor e a controladora existem três vias, duas para alimentação do receptor e uma para enviar o sinal do receptor até a controladora. Para o controle do drone é necessário no mínimo quatro canais do receptor, para os seguintes comandos: Movimento de arfagem, rolagem, guinada e aceleração (altitude). Outros canais são requeridos para comandar importantes funções auxiliares em um multirotor, como a seleção do modo de voo, o controle direcional da câmera e o botão de ativação do modo de falha.

O transmissor de sinais de vídeo recebe o sinal de áudio e vídeo gerados pela câmera e pelo microfone e o transmitem para o receptor em solo. Estes dispositivos são alimentados por uma bateria extra. Entre a câmera e o transmissor de vídeo é possível instalar um dispositivo, conectado e suportado pela controladora de voo, que irá adicionar ao sinal de vídeo uma camada com informações do voo, como, por exemplo tensão da bateria principal, altitude, velocidade, inclinação, distância do ponto de decolagem e posição do ponto de decolagem. Este dispositivo é conhecido como OSD.

4 PROJETO E MONTAGEM DO MULTIROTOR

4.1 APLICAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DO MULTIROTOR

Grande parte das aplicações comerciais de drones multirotores no Brasil tem se limitado à fotografia e filmagem. Isto se deve ao fato da facilidade de utilizar drones que são adquiridos já com os equipamentos e configurações necessárias para realizar esta atividade. Porém, apesar de atingir uma qualidade semi profissional, o valor comercial destes equipamentos possuem uma alta carga de impostos devido à importação e um alto valor agregado por causa dos sistemas integrados e a da produção industrial.

Para atingir o objetivo deste estudo, o multirotor a ser projetado deve ser multifuncional, ou seja, além de cumprir a usual função de foto e filmagem, deve ser capaz de ser utilizado como uma plataforma de estudo e de testes para a implementação de dispositivos mecânicos funcionais voltados para diversas áreas comerciais. Os dispositivos mecânicos serão projetados, prototipados, instalados no drone e testados em voo. A Tabela 1 apresenta uma estimativa da massa necessária a ser carregada para o projeto de dispositivos mecânicos embarcados.

Tabela 1 ï Estimativa de peso para projetar dispositivos mecânicos embarcados

Componente	Peso estimado de carga útil [kgf]
Estrutura para fixação	1,0
3 Motores *Brushless* ou 3 Servos de alto torque	0,6
Bateria	0,2
Carga útil do dispositivo mecânico	2,0
Circuito de controle	0,2
Total	4,0

fonte: Produção do próprio autor

A pesquisa realizada para definir o número de motores e a dimensão da estrutura do multirotor a ser projetado foi sintetizada na Tabela 2:

Tabela 2 ï Comparação entre as estruturas de multirotores disponíveis no mercado

Estrutura	Diâmetro total [mm]	Motor	Hélice	Peso máximo de decolagem [kgf]
Alien 550 Quadrotor Frame	550	SUNNYSKY V3508-16 700KV MOTOR	12x38	4
TAROT T960 CF FOLDING HEXAROTOR	960	4114/320KV BRUSHLESS MOTOR	15x5	12
FOXTECH K130 V3 FOLDING OCTOROTOR FRAME	1270	W5010L-KV288	18x65	20

fonte: Foxtech (2017)

A estrutura e seus componentes adjacentes escolhidos para o projeto foram o quadro Tarot T960 Hexarotor, mostrado na Figura 18, equipado com os motores 4114 320KV e as hélices 15x5x2. Esta estrutura possui o diâmetro base muito próximo de um metro e uma altura de 33 cm em relação ao solo, o que possibilita a instalação de diversos dispositivos mecânicos embarcados.

Figura 18 ï Quadro selecionado para o hexarotor



fonte: Tarot (2017)

4.2 CÁLCULOS DE CARGA

Definidos alguns componentes do hexarotor como a sua estrutura, seus motores e suas hélices, pode-se realizar os cálculos para determinar os componentes de alimentação do sistema propulsor.

O cálculo de carga é muito importante, pois todo o circuito do hexarotor opera em corrente contínua e deve ser dimensionado de modo a suportar a corrente elétrica máxima consumida pelos motores, como descrito na Tabela 3.

Tabela 3 ï Dados de operação do motor Tarot 4114 320kv

Sustentação [kg]	Tensão [V]	Corrente [A]	Rotação [RPM]
1,00	25,0	5,2	4370
1,50	25,0	7,4	5045
2,00	25,0	11,1	5755
2,15	22,2	14,5	5979
2,50	25,0	15,1	6311
2,65	25,2	16,8	6655

fonte: (TAROT, 2017)

Como observado na Tabela 3, o motor selecionado foi dimensionado para operar com uma tensão de 22,2 a 25,2 V, o que corresponde a uma bateria Li-Poly de seis células (6S), cada uma variando de 3,4 (descarregada) a 4,2 V (carregada). Com a tensão máxima, a corrente máxima para gerar uma força de 2,65 kgf por motor é de 16,8 A, o que totaliza 100,8 A nos seis motores para elevar um total de 15,9 kg.

Como a capacidade das baterias são expressas em mAh, isso representa o quanto a bateria pode fornecer de corrente elétrica em mA durante uma hora. Para o cálculo da capacidade da bateria necessária de modo a fornecer uma autonomia razoável de voo, é necessário estimar o peso do hexarotor completo e somar o peso estimado de carga útil, que é feito na Tabela 4:

Tabela 4 ï Estimativa de peso do hexarotor operacional

Estimativa			
Componente	Quantidade	Peso [gf]	Total [gf]
Motor 4114 320kv	6	150	900
ESC 6S	6	50	300
Bateria	2	500	1000
Frame T960	1	1050	1050
Hélice 15x5	6	20	120
Controladora de Voo	1	150	150
Placa Distribuição	1	100	100
Transmissor Vídeo	1	50	50
Receptor Rádio D8R-XP	1	30	30
Micro Câmera	1	50	50
Arduino UNO R3	1	25	25
Carga Útil	1	4000	4000
TOTAL			7775

fonte: Produção do próprio autor

Cruzando os dados da Tabela 3 e da Tabela 4, a corrente elétrica necessária em cada motor para elevar 7,775 kgf é de 7,4 A, o que totaliza 44,4 A para os seis motores. Portanto, para atingir uma autonomia de trinta minutos de voo, é necessário uma bateria com capacidade de fornecer 22.200 mAh, ou seja, 44,4 A durante meia hora.

4.3 SELEÇÃO DOS COMPONENTES

Para alimentar os motores com corrente elétrica contínua o circuito de cada motor deve suportar, considerando a situação mais crítica, uma corrente elétrica máxima de 16,8 A. Foram selecionados para isso controladores de velocidade para motores *brushless* que suportam 40 A de corrente máxima e 25,2 V de tensão. Além dos controladores de velocidade, os cabos de energia ligando a bateria aos controladores devem ser do tipo 14

AWG, segundo a norma ASTM F1883 - 03 de 2013, ASTM (2013), que limita a 20 A a corrente elétrica no cabo selecionado.

A seleção da bateria deve levar em consideração a corrente elétrica que ela deverá fornecer aos seis motores simultaneamente. Como a tensão da bateria está definida como 6S, pois os motores devem receber este nível de tensão, e a seleção da capacidade total da bateria vai influenciar apenas a autonomia do hexarotor, neste estudo será selecionada uma capacidade inferior apenas para a montagem e os voos de teste. Utilizando duas baterias, a demanda de corrente elétrica reduz-se de 44 A para 22 A e então podem ser utilizados cabos de 12 AWG, que suportam até 25 A. Foram selecionadas duas baterias 6S de 5000 mAh com descarga máxima de 60 C, ou seja, 300 A de corrente máxima.

Distribuir a corrente elétrica da bateria para os motores é a função da placa de distribuição de energia, o qual conecta cada um dos cabos positivos e negativos dos motores aos cabos positivos e negativos da bateria. Como a corrente total que circulará nos circuitos do hexarotor poderá atingir um pico de 100,8 A, foi selecionada uma placa capaz de suportar até 200 A.

A controladora de voo selecionada para equipar o hexarotor foi a Naza M V2 equipada com GPS e OSD, pois, dentre as placas pesquisadas, foi a que apresentou a maior confiabilidade e maior capacidade de estabilizar um hexarotor, além de fornecer valiosas informações para a navegação e a segurança do voo.

Os demais componentes que serão instalados no hexarotor foram selecionados pela facilidade de compra no mercado nacional, visto que não diferem muito em suas características principais.

Os componentes selecionados são apresentados na Tabela 5, juntamente com o cálculo do peso total de decolagem do hexarotor.

Tabela 5 ï Componentes selecionados e cálculo de peso total de decolagem

Componentes			
Componente	Quantidade	Peso [gf]	Total [gf]
Motor 4114 320kv	6	150	900
ESC 6S 40A Hobbyking	6	40	240
Bateria 6S 5000mAh	2	800	1600
Frame T960	1	1050	1050
Hélice 15x5	6	20	120
DJI Naza M V2 com GPS	1	95	95
DJI Mini OSD	1	15	15
Placa Distribuição	1	100	100
Transmissor Vídeo TS832	1	20	20
Receptor Rádio D8R-XP	1	15	15
Micro Câmera	1	50	50
Arduino UNO R3	1	25	25
Carga Útil	1	4000	4000
TOTAL			8230

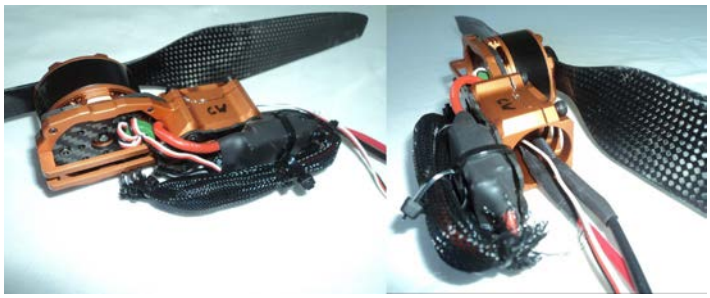
fonte: Produção do próprio autor

4.4 MONTAGEM DO HEXAROTOR

A montagem do hexarotor é iniciada pelos braços de fixação dos motores, Figura 19, pois é preciso liberdade de movimentos para passar os cabos de energia elétrica e de sinal dos ESCs por dentro dos tubos de modo que permaneçam na posição correta para a ligação na placa de distribuição, no caso dos cabos de energia, e na controladora de voo, no caso do cabo de sinal dos ESCs. Os cabos de energia e o de sinal devem ser alongados o suficiente para atravessar o tubo e conectar com folga em seu destino. Como cada tubo pertencente ao braço possui 410 mm, é necessário alongar os cabos até 700 mm, no mínimo, o que é feito

conectando uma extensão de cabo de servos de 500 mm ao cabo de sinal do ESC adicionando 500 mm de extensão aos cabos de energia. Para conectar os cabos de energia, foram utilizados conectores do tipo banana de 3,5 mm, soldados com estanho às extremidades dos cabos. Para finalizar os braços, o motor é ligado ao ESC, soldando conectores do tipo banana, e ambos são fixados ao suporte e ao braço do hexarotor.

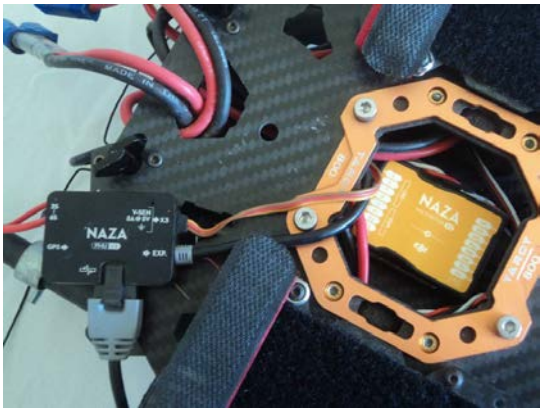
Figura 19 ï Montagem do braço do hexarotor



fonte: Produção do próprio autor

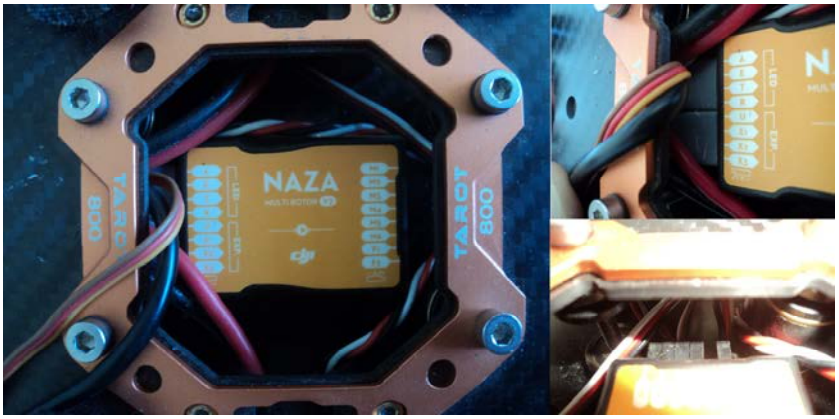
Posicionar os principais componentes eletrônicos na estrutura é muito importante para garantir a correta leitura dos sensores, a aquisição do sinal pelas antenas e facilitar as conexões do circuito. O posicionamento da controladora de voo, Figura 20, tem de ser o mais próximo possível do centro de gravidade do hexarotor, pois é nela que serão lidos os dados de aceleração, deslocamento angular e nivelamento, ou seja, quanto mais próxima ao centro de gravidade estiver, menos cálculos terão de ser feitos para estabilizar o drone. Na controladora serão conectados os cabos de sinal dos seis motores (M1 a M6), os cabos de sinal do receptor de rádio (A, E, T, R, U, X1, X2, X3), Figura 21, o LED indicador de estado e o cabo de alimentação (EXP.). Como todas estas ligações devem ser feitas entre as duas placas da seção central do drone, é recomendado fazê-las com as placas desconectadas. Alimentar a controladora de voo é função do circuito denominado ñ*power management unit*ò (PMU), que é conectado à placa distribuidora de energia para receber os 22,2 V da bateria, alimenta a controladora através da porta ñX3ò e permite a conexão de outros periféricos da mesma fabricante através da porta ñEXP.ò, como mostrado na Figura 20. O periférico que insere informações de voo na transmissão de vídeo, denominado OSD, também é conectado na PMU.

Figura 20 ï Posicionamento da controladora de voo



fonte: Produção do próprio autor

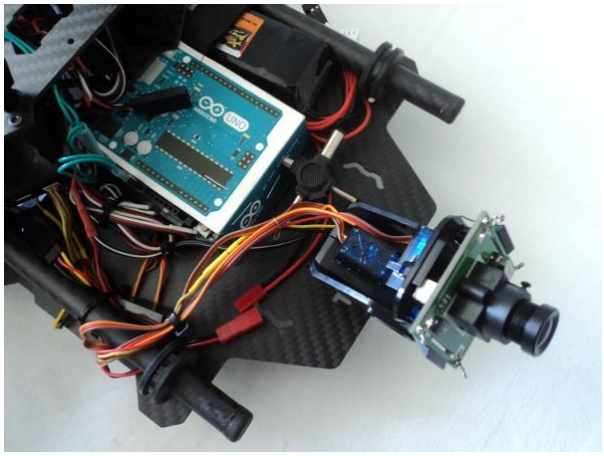
Figura 21 ï Conexões da controladora de voo



fonte: Produção do próprio autor

Uma placa de fibra de carbono foi adquirida para completar a estrutura do hexarotor e suportar o circuito que controlará os dispositivos mecânicos embarcados. Foram instalados nesta placa, além deste circuito, a bateria para alimentar o transmissor de vídeo e a câmera para voo em primeira pessoa, ilustrado na Figura 22.

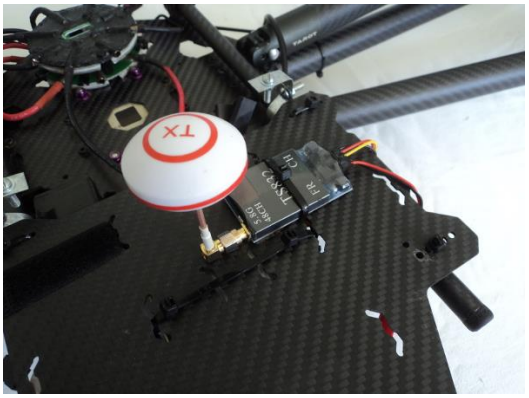
Figura 22 ï Bateria, placa de desenvolvimento e câmera de voo em primeira pessoa



fonte: Produção do próprio autor

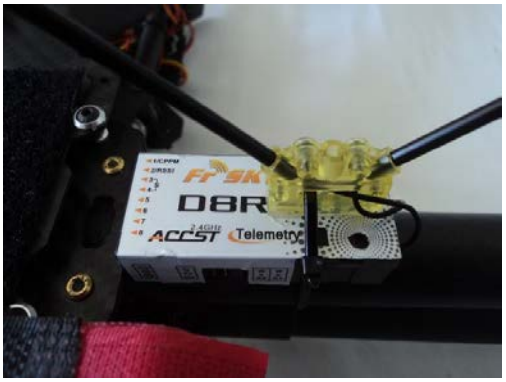
Finalizando a montagem e a instalação dos componentes, são fixados o transmissor de vídeo, Figura 23, o receptor dos sinais do rádio controle, Figura 24, e a placa distribuidora de energia, Figura 25, tomando o cuidado de posicionar as antenas de modo que recebam o sinal do operador do hexarotor independente de sua posição relativa.

Figura 23 ï Transmissor de vídeo



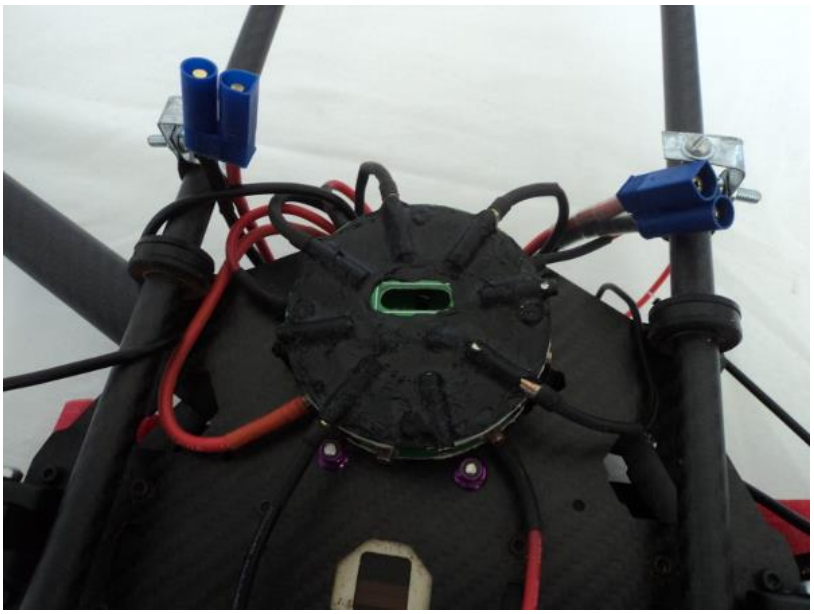
fonte: Produção do próprio autor

Figura 24 ï Receptor do rádio controle



fonte: Produção do próprio autor

Figura 25 ï Placa distribuidora de energia



fonte: Produção do próprio autor

5 DISPOSITIVOS MECÂNICOS EMBARCADOS

As características dos atuais drones oferecem muitas vantagens para diversas aplicações em engenharia. Primeiramente, o tipo de voo dos multirotores se encaixa em uma faixa pouco explorada pelas aeronaves tripuladas, pois são capazes de voar autonomamente a baixas alturas completamente estabilizados. Além disso, seu peso e consumo de energia, se comparado às aeronaves tripuladas, são muito reduzidos. (JORDÃO, 2014)

5.1 ARDUINO COMO INTERFACE

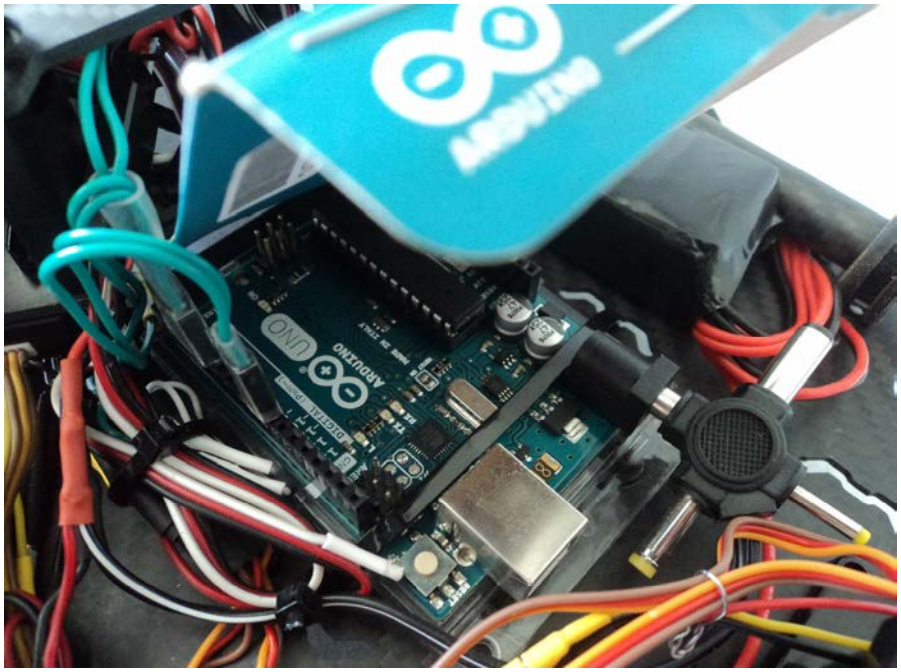
Uma das maneiras de viabilizar o controle de dispositivos embarcados em multirotores é a utilização do hardware livre e de placas de desenvolvimento como o Arduino.

> Muitos projetos, que até há poucos anos eram elaborados com base numa grande quantidade de componentes, podem hoje ser elaborados com base em microcontroladores. Os microcontroladores "fazem tudo" pois podem ser programados para isso. Não se discute, portanto, porque os microcontroladores atraem a atenção dos projetistas modernos e mesmo dos mais veteranos. No entanto, para usar os microcontroladores é preciso conhecer alguns "macetes", como o seu funcionamento, a sua forma de programação e os tipos que existem. (BRAGA, 2017)

Uma placa de Arduino é, na verdade, uma placa de desenvolvimento baseada em microcontrolador, cujo projeto é independente e de hardware aberto (*open source*). Isso significa que os arquivos do projeto da placa de circuito impresso (PCB) e os diagramas esquemáticos estão todos disponíveis publicamente. Qualquer pessoa pode usar livremente esses projetos para fabricar e vender as suas próprias placas de Arduino. (MONK, 2014)

Para integrar os complexos sistemas de um multirotor a dispositivos mecânicos projetados para certa tarefa é necessário um sistema capaz de conciliar e manipular os dados de controle emitidos pelo solo com o dispositivo em questão, além de ser facilmente programável, de reduzido peso e de fácil alimentação. Para atender aos requisitos apresentados, foi selecionada a placa de desenvolvimento Arduino Uno, mostrado na Figura 26, por sua robustez e por ser uma das placas microcontroladas mais documentadas e estudadas da atualidade.

Figura 26 ï Arduino UNO



fonte: Produção do próprio autor

Ao receber um sinal de controle via rádio, o receptor acoplado ao multirotor decodifica e o transmite, via cabos, em formato de onda do tipo largura modulada, que é lido facilmente nas entradas digitais do Arduino. Após o correto processamento realizado pelo chip microcontrolador, utilizando os códigos programados pelo operador, o Arduino envia as respostas àquele sinal de controle também por suas portas digitais, para controlar os dispositivos mecânicos embarcados. Aliado à facilidade de leitura dos sinais de controle comumente utilizado em drones, muitos controladores de velocidade de motores sem escova possuem BEC, ou seja, são capazes de isolar um nível de tensão da bateria e alimentar o Arduino. (MONK, 2014)

O controle dos dispositivos mecânicos embarcados utilizando as saídas digitais do Arduino pode ser viabilizado através de motores de passo, servo motores e motores DC com ou sem escova.

5.2 PROGRAMAÇÃO DO ARDUINO

Para a programação do Arduino é utilizada uma linguagem própria do desenvolvedor da placa, mas que se aproxima muito do C++. Com o software disponibilizado no site do

fabricante é possível visualizar, enquanto se programa, o reconhecimento da sintaxe e algumas dicas de como devem ser utilizados os comandos. Além disso, após o término da programação, é possível verificar a presença de erros antes de gravar esta programação no Arduino.

A programação desenvolvida para os propósitos deste estudo, apresentada no Apêndice A, bem como a maioria dos programas em Arduino, foi dividida em inclusão de bibliotecas, declaração de variáveis, configurações permanentes e execução cíclica de comandos.

Na inclusão de bibliotecas foi incluída a biblioteca ñServo.hò que possui funções aplicadas aos servos que estão conectados nas saídas do Arduino.

As variáveis declaradas tem a função de armazenar dados contadores, valores lógicos de controle, valores de ângulos, valores de recepção de rádio, objetos do tipo ñServoò e pinos de controle.

Após a chamada da função ñsetup()ò são definidas as configurações permanentes, como os pinos destinados à entrada de sinal e os destinados à saída, as configurações do objeto ñServoò e as posições iniciais dos servos.

Toda a lógica de controle dos servos utilizando o sinal enviado via rádio controle é desenvolvida dentro da função ñloop()ò, que é executada ciclicamente enquanto o Arduino estiver alimentado. Esta lógica conta com estruturas de programação condicionais e estruturas iterativas, onde a cada execução é lida a posição selecionada no rádio controle, pelos pinos de entrada do Arduino, comparada com as posições anteriores e então são disparados os sinais de comando dos servos, pelos pinos de saída. Como resultado, os servos se posicionarão conforme o desejado e selecionado pelo operador, para atender os propósitos de cada dispositivo mecânico embarcado.

5.3 CONTROLE DE CÂMERA PAN/TILT

A localização exata é um ponto muito importante no voo de um drone. Além do sistema de posicionamento via satélite, uma câmera é utilizada para possibilitar a visão em primeira pessoa (FPV) através da transmissão via rádio das imagens. De modo a fixar a câmera no drone e ampliar a consciência de posição do operador, foi projetado e montado um sistema de controle de câmera do tipo pan/tilt, mostrado na figura 22, que permite que o operador controle o ângulo de inclinação e de guinada da câmera com relação à estrutura do drone.

Como a câmera a ser instalada é de pequenas dimensões, foi selecionada uma estrutura que suporta a instalação de micro servo motores do tipo *Tower Pro* 9g Sg90. Estes servo motores devem ser alimentados com 5 V de tensão (obtidos através do BEC dos controladores de velocidade dos motores) e conectados diretamente às portas de saída do Arduino. Deste modo, a programação do Arduino para controlar os servos de inclinação e de guinada faz uso das bibliotecas de controle de servos, onde é necessário apenas fazer a leitura do canal de entrada e indicar o ângulo que o servo deverá se posicionar.

Apesar da facilidade de utilizar a biblioteca de controle de servos, a dificuldade encontrada foi em filtrar o sinal de entrada. Para uma posição selecionada no rádio controle, o sinal de controle que entra no Arduino varia muito, sendo necessária a utilização da programação para definir em qual intervalo de variação a posição do servo seria mantida. A programação utilizada no Arduino para controlar a câmera e o lançador de cápsulas, explicado na próxima seção, pode ser vista no Apêndice A. (MONK, 2014)

5.4 LANÇADOR DE CÁPSULAS

Um lançador de cápsulas transportado por um multirotor deve ser capaz de introduzir materiais onde não é possível por transporte terrestre. A idéia principal é sobrevoar o local desejado e soltar uma cápsula contendo o material a ser depositado, porém o lançador deve carregar mais de uma cápsula sem a necessidade de recarregar para aproveitar a reduzida autonomia dos multirotores.

De imediato são identificados quatro requisitos neste projeto: Transportar a carga do lançador, carregá-lo com as cápsulas, lançar uma cápsula e segurar as outras. Para entender melhor a geometria do drone, como o lançador deverá ser dimensionado e como as cápsulas serão lançadas, um protótipo foi construído com materiais de fácil manipulação, como finas chapas de aço, arames de aço e tubos de PVC, mostrado na Figura 27.

Para a tarefa principal de carregar o lançador com as cápsulas, lançá-las e segurar as outras foram utilizados dois servo motores do mesmo tipo do empregado no controle da câmera. A programação do Arduino para cumprir esta tarefa foi feita analogamente ao controle de ângulo da câmera, porém neste caso foram definidos alguns ângulos para as posições aberto e fechado, como mostrado na Figura 28. Para espaçar a cápsula mais baixa, que será lançada, das demais, foi necessário utilizar um guia feito de chapa de aço, como

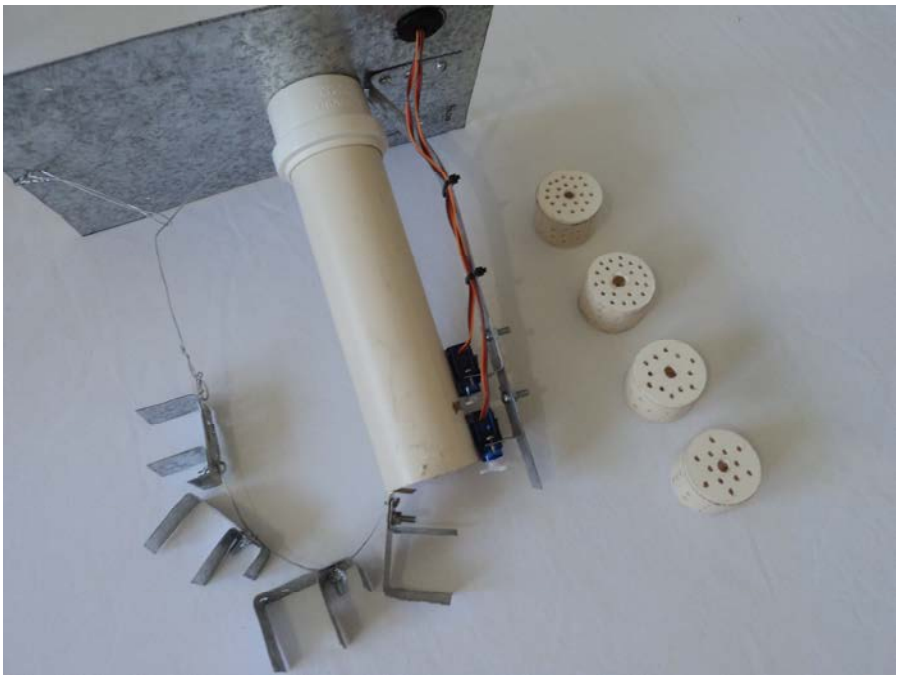
mostrado na Figura 29, que não são lançados juntamente com as cápsulas, pois estão conectados a um arame guia.

Nomeando o servo mais abaixo como servo 1 e o servo mais acima como servo 2, a sequência para o lançamento é a que segue: Inicialmente com o servo 1 e o servo 2 fechados, o servo 1 abre por meio segundo para lançar uma cápsula e depois fecha; em seguida, o servo 2 aguarda 0,2 segundos e abre por meio segundo, para preparar a próxima cápsula, e após fecha, forçando um atraso de 0,2 segundos até o próximo lançamento, caso acionado. A programação utilizada no Arduino para controlar a câmera e o lançador de cápsulas pode ser visualizada no Apêndice A.

Modificações na câmera de voo e na programação dos ângulos da câmera foram feitas para permitir a filmagem do lançamento de cápsulas, bem como para posicionar corretamente o drone acima do terreno alvo do lançamento.

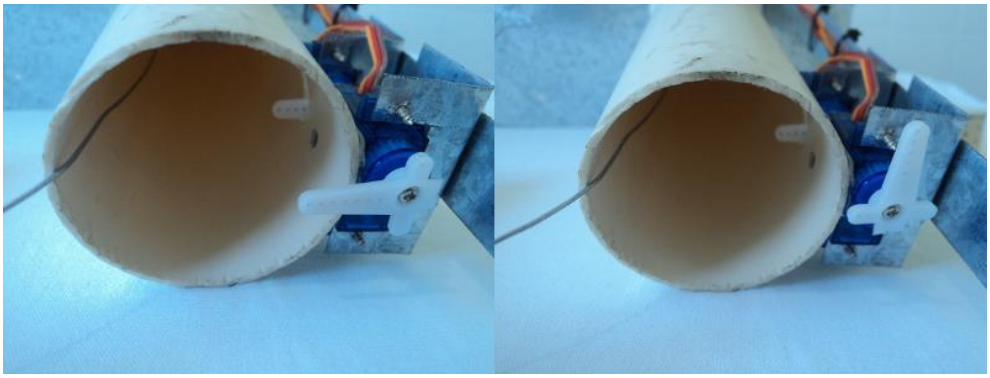
Com as dimensões, a eletrônica e a lógica de lançamento definidas, pode ser projetada a versão final de um lançador de cápsulas.

Figura 27 ï Protótipo do lançador de cápsulas



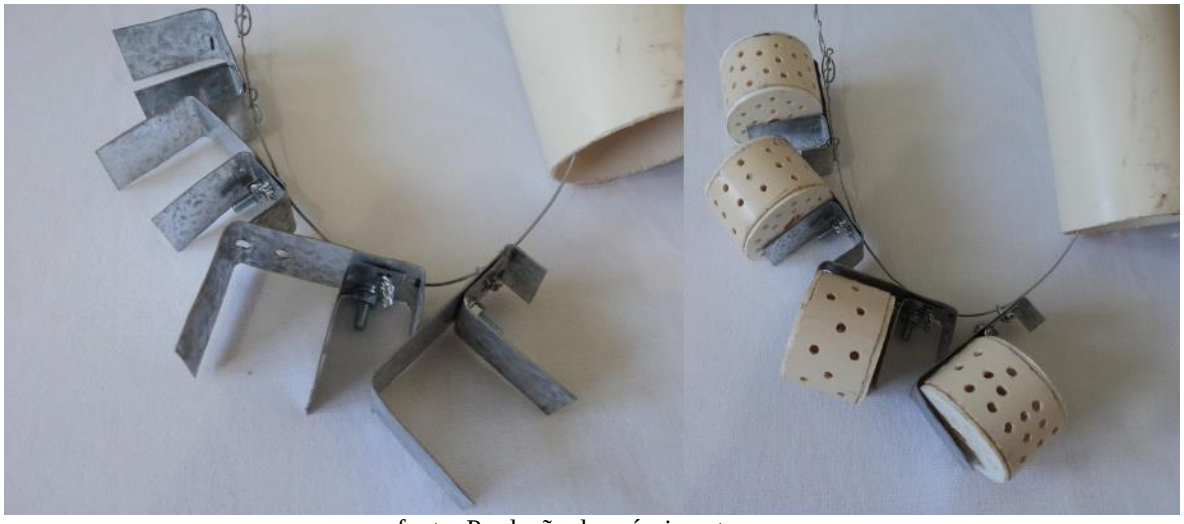
fonte: Produção do próprio autor

Figura 28 ï Posições do servo: fechado à esquerda e aberto à direita



fonte: Produção do próprio autor

Figura 29 ï Espaçadores das cápsulas



fonte: Produção do próprio autor

5.5 SUPORTE ESTABILIZADOR DE CÂMERA

Dentre as diversas aplicações dos multirotores, a recreação e a captação de imagens aéreas são as mais utilizadas. Devido à evolução das câmeras de filmagem e fotografia atuais no que se refere à qualidade da imagem, redução do peso, das dimensões, aumento da durabilidade e resistência, estes dispositivos estão presentes quase na totalidade dos drones atuais. Porém, para captar imagens profissionais, estas câmeras exigem um sistema de estabilização eficiente, como mostrado na Figura 30, para não interferir na qualidade das imagens e para direcionar a câmera para o objetivo. Estes sistemas de estabilização para

câmeras profissionais não são encontrados no mercado brasileiro, apenas no exterior e com preços elevados.

Uma alternativa para utilizar um suporte estabilizador de câmera é a aquisição de uma placa controladora dedicada a esta finalidade, bem como os motores que movimentarão este suporte, porém desta feita a estrutura deverá ser projetada e montada pelo operador. Para câmeras de aventura pequenas, estas placas suportam as correntes necessárias para estabilizar a câmera em seus três eixos, porém para câmeras profissionais, que são maiores e mais pesadas, há uma grande dificuldade de localizá-las no mercado nacional e internacional.

O ponto de partida para a concepção do projeto de um suporte estabilizador de câmeras profissionais é a utilização da placa de desenvolvimento Arduino, acoplada a circuitos de controle e alimentação de grandes motores sem escova, robustos o suficiente para gerar o torque necessário para estabilizar uma câmera profissional, o que vai demandar uma alta corrente elétrica. Acelerômetros e giroscópios também devem ser acoplados mecanicamente ao suporte e eletronicamente ao Arduino para realizar a medição de atitude da câmera. Finalmente, o projeto mecânico do suporte deve alocar todos estes componentes e permitir o movimento de suas partes serem controladas por motores em três diferentes eixos, além de prender a câmera e fixar todo o conjunto no multirotor.

Figura 30 ï Suporte estabilizador de câmera



fonte: Adorama (2017)

6 RESULTADOS

O hexarotor projetado e montado realizou vários voos desde a sua construção, obtendo parâmetros muito próximos aos calculados no projeto. Iniciando pela pesagem realizada com uma balança digital de pesca com fundo de escala de 50 kgf e com precisão de 10 g, a configuração básica de voo do drone pesou 5,43 kgf e foi capaz de sustentar mais 5,50 kgf de carga, totalizando um peso máximo de decolagem de 10,93 kgf. Durante o voo de verificação, a corrente elétrica drenada das baterias foi muito alta, tão alta que gerou um campo magnético que bloqueou o sinal da antena GPS que estava posicionada próxima aos cabos da bateria. Mesmo sem o sinal de GPS, o hexarotor permaneceu controlável durante o voo de teste e, após o ocorrido, a antena GPS foi posicionada mais acima e afastada dos cabos das baterias.

A Figura 31 mostra uma imagem do voo de verificação da carga útil, utilizando um galão de 5 litros acoplado ao drone para verificação progressiva de carga, adicionando-se água para elevar o peso até um limite razoável.

Figura 31 ï Voo de verificação com peso de decolagem de 10,93 kgf



fonte: Produção do próprio autor

O lançamento de cápsulas, mostrado na sequência de fotos da Figura 32, foi realizado com sucesso de alturas entre 10 e 20 metros acima do terreno alvo, e o hexarotor se comportou normalmente durante os lançamentos e os deslocamentos suportando o lançador, que pesou 0,47 kgf com as cápsulas vazias. O posicionamento do hexarotor acima do terreno alvo foi satisfatório utilizando a câmera de voo com o código do Arduino modificado para este objetivo.

Figura 32 ï Lançamento de cápsulas



fonte: Produção do próprio autor

Sem carga e com peso de decolagem igual a 5,43 kgf, o hexarotor apresentou interessantes características de voo com o modo de voo controlado por GPS. Quando comandado para manter a posição e a altura atual, visualmente o drone se manteve em sua posição, mesmo com velocidades do vento acima do comum, aumentando os seus ângulos de arfagem e rolagem. Conforme os dados de localização adquiridos pelo GPS e os cálculos efetuados pela controladora de voo, a altura atingida e limitada pelo teste foi de 106 m acima do ponto de decolagem e a velocidade máxima foi de 18 m/s, conforme pode ser observado nas Figuras 33 e 34, respectivamente.

Figura 33 ï Altura de voo de 106 m



fonte: Produção do próprio autor

Figura 34 ï Velocidade de voo de 18 m/s



fonte: Produção do próprio autor

No final da construção do hexarotor foram contabilizados todos os gastos com os componentes e materiais necessários. A Tabela 6 mostra detalhes dos preços de cada componente em valores atuais e as lojas em que foram adquiridos, bem como o valor total.

Tabela 6 ï Valor total de construção do hexarotor

Componente	**Preço (U$)**	**Preço (R$)**	**Loja**
Estrutura Tarot T960	244,00	768,60	www.foxtechfpv.com
Controladora Naza M V2	159,00	500,85	www.foxtechfpv.com
6 Motores Tarot 4114/320kv	204,00	642,60	www.foxtechfpv.com
6 Hélices 1555 MKII Fibra de Carbono	95,94	302,21	www.foxtechfpv.com
Rádio Controle Turnigy 9XR Pro	---	159,00	www.hobbyking.com
Transmissor e receptor de rádio controle FrSky	---	127,00	www.hobbyking.com
Kit FPV com câmera, transmissor, receptor e tela	---	565,00	www.mercadolivre.com.br
2 Baterias Gens Ace 5000 mAh e conectores	---	1574,00	www.hobbystyle.com.br
Bateria Turnigy 3S para o rádio controle de 2200 mAh	---	140,00	www.mercadolivre.com.br
Carregador de Baterias IMAX B6AC	---	300,00	www.mercadolivre.com.br
6 Controladores de Velocidade do Motor Hobbyking 40A-60A	---	689,40	www.mercadolivre.com.br
Diversos cabos e conectores	---	381,00	www.mercadolivre.com.br
Placa de distribuição de energia SuperHungry 200 A	---	50,00	www.mercadolivre.com.br
Total	---	**6199,66**	---

fonte: Produção do próprio autor

7 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi projetado um multirotor e descrita sua montagem com a finalidade de aplicá-lo em áreas com grande potencial de crescimento, com um investimento proporcional ao retorno obtido. Os resultados obtidos nos voos de teste demonstraram boas qualidades de voo, essenciais para diversas aplicações, como a capacidade de levantar uma carga útil igual ao seu próprio peso, alta estabilidade independentemente de habilidade de pilotagem e boa velocidade de deslocamento horizontal. Com relação aos aspectos econômicos, apesar do substancial aumento no valor final devido ao frete de importação de muitos componentes, o investimento total mostrado nos resultados é praticável do ponto de vista de seu emprego e do valor agregado ao empreendimento.

No caso de um octarotor vendido pela fabricante DJI, segundo o site do Mercado Livre (2017), e que cumpre a importante função de pulverização agrícola, seu valor de mercado no Brasil é de R$ 72.000,00. (MERCADO LIVRE, 2017)

Alguns dispositivos mecânicos embarcados, necessários para viabilizar certas aplicações de um multirotor, foram estudados de forma a definir os componentes mecânicos que devem ser projetados, bem como seu circuito eletrônico e a programação. O funcionamento do controle da câmera de voo foi comprovado no protótipo deste dispositivo e proporcionou a filmagem da operação de outro protótipo, o lançador de cápsulas, que também obteve sucesso em seu voo de teste. No pequeno estudo realizado sobre o suporte estabilizador de câmera foi constatada a viabilidade do projeto, pois foram definidos materiais e métodos para concretizá-lo em trabalhos futuros.

Sem a placa de desenvolvimento, no caso o Arduino UNO, não seria possível a construção dos protótipos, pois seriam necessários profundos conhecimentos de eletrônica para controlar os dispositivos mecânicos remotamente.

Conforme o exposto, conclui-se que, caso sejam projetados, fabricados e montados, os multirotores e seus dispositivos mecânicos embarcados dispõem de grande vantagem econômica sobre os seus concorrentes adquiridos prontos para voar.

REFERÊNCIAS

ADORAMA (Eua). **DJI Zenmuse Z15-A7 3-Axis Gimbal for Sony a7S/a7R Camera**. 2017. Disponível em: <https://www.adorama.com/djiz15a7.html>. Acesso em: 14 out. 2017.

AGÊNCIA FORÇA AÉREA. **Esquadrão Hórus participa da vigilância aérea nos Jogos Olímpicos:** Hermes 450 é responsável por realizar reconhecimento aéreo. 2016. Disponível em: <http://www.fab.mil.br/noticias/mostra/26951/RIO 2016 - Esquadrão Hórus participa da vigilância aérea nos Jogos Olímpicos>. Acesso em: 05 ago. 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM F1883**: Standard Practice for Selection of Wire and Cable Size in AWG or Metric Units. West Conshohocken: Astm International, 2013. 1 p. v. 7. Disponível em: <https://www.astm.org/Standards/F1883.htm#tfn00002>. Acesso em: 30 set. 2017.

ARDUPILOT. **User Manual Introduction.** 2016. Disponível em: <http://ardupilot.org/plane/docs/introduction.html>. Acesso em: 23 set. 2017.

BAICHTAL, John. **Building Your Own Drones:** A Beginners' Guide to Drones, UAVs, and ROVs. Indianapolis: Que Publishing, 2015. 272 p.

BEER, Ferdinand P. et al. **Estática e Mecânica dos Materiais.** Porto Alegre: AMGH, 2013. 706 p.

BRAGA, Newton de Carvalho. **Conheça os microcontroladores PIC**. 2017. Disponível em: <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/microcontroladores/141-microchip-pic/1243-mic001>. Acesso em: 14 dez. 2017.

BUCKLEY, David. **History Makers:** Time Line of History Making Mobile Robots. 2015. Disponível em: <http://davidbuckley.net/DB/HistoryMakers.htm#Moonwalker>. Acesso em: 20 set. 2017.

DJI (China). **DJI Developer Products**. 2017. Disponível em: <https://developer.dji.com/products/>. Acesso em: 20 set. 2017.

DJI (China). **AGRAS MG-1.** 2017. Disponível em: <https://www.dji.com/mg-1?site=brandsite&from=nav>. Acesso em: 13 dez. 2017.

DJI (China). **NAZA - M V2:** QUICK START GUIDE. Shenzhen: Dji, 2015. 32 p. Disponível em: <http://www.dji.com/naza-m-v2/download>. Acesso em: 17 jan. 2017.

DOMINIC CLIFTON. **SP Racing F3 Flight Controller:** Next Generation Hardware for your Multirotor. 2017. Disponível em: <http://seriouslypro.com/spracingf3>. Acesso em: 20 set. 2017.

FOXTECH (China). **Foxtech K130 V3 Folding Octocopter Frame**. 2017. Disponível em: <https://www.foxtechfpv.com/foxtech-k130-v3-folding-octocopter-p-1693.html>. Acesso em: 14 dez. 2017.

FOXTECH (China). **Frames**. 2017. Disponível em: <https://www.foxtechfpv.com/multirotor-and-accessories/frame.html>. Acesso em: 23 set. 2017.

GENERAL ATOMICS AERONAUTICAL (EUA). **Gray Eagle UAS**. 2017. Disponível em: <http://www.ga-asi.com/gray-eagle>. Acesso em: 20 set. 2017.

HOBBYKING (China). **Multistar LiHV High Capacity 5200mAh 4S 10C Multi-Rotor Lipo Pack**. 2017. Disponível em: <https://hobbyking.com/en_us/multistar-lihv-high-capacity-5200mah-4s-multi-rotor-lipo-pack.html?___store=en_us>. Acesso em: 23 set. 2017.

HOBBYKING (China). **Hobby King Octocopter Power Distribution**. 2017. Disponível em: <https://hobbyking.com/en_us/hobby-king-octocopter-power-distribution-board.html>. Acesso em: 23 set. 2017.

HOBBYKING (China). **Male XT60 Connectors (5pcs/bag) GENUINE**. 2017. Disponível em: <https://hobbyking.com/en_us/male-xt60-connectors-5pcs-bag-genuine.html>. Acesso em: 23 set. 2017.

HOBBYKING (China). **EC5 Male Connectors (5pcs/bag)**. 2017. Disponível em: <https://hobbyking.com/en_us/new-ec5-male-5-set-per-bag.html>. Acesso em: 23 set. 2017.

HOMA, Jorge M. **Aerodinâmica e Teoria de Voo ï Noções Básicas**. 21 ed. São Paulo: ASA, 2002.

JORDÃO, Fábio. **Drones**: A revolução da aviação civil e militar está só no começo. 2014. Disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/aviao/49057-drones-a-revolucao-da-aviacao-civil-e-militar-esta-so-no-comeco.htm>. Acesso em: 13 jan. 2014.

LAMBERMONT, Paul; PIRIE, Anthony. **Helicopters and autogyros of the world**. London: Cassel, 1958.

MAHAJAN, Girish. **Curtiss Wright VZ 7**. 2017. Disponível em: <https://alchetron.com/Curtiss-Wright-VZ-7>. Acesso em: 20 set. 2017.

MERCADO LIVRE. **Rpa/vant Dji Drone Agras Mg-1 Pulverizador Até.** 2017. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-948204358-rpavant-dji-drone-agras-mg-1-pulverizador-ate-10kg-agri-_JM>. Acesso em: 13 dez. 2017.

MONK, Simon. **Programação com Arduino:** Começando com Sketches. Porto Alegre: Bookman, 2014. 200 p.

MONK, Simon. **Programação com Arduino II:** Passos Avançados com Sketches. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2014. 260 p.

NASA. **Pathfinder:** Exploring Mars With the Sojourner Rover. 2012. Disponível em: <https://www.nasa.gov/redplanet/sojourner.html>. Acesso em: 20 set. 2017.

OPENROV (EUA). **OpenROV 2.8 Kit**. 2017. Disponível em: <https://www.openrov.com/products/openrov28/>. Acesso em: 19 set. 2017.

SÉCULOS DE HISTÓRIA. **O mini Tanque Alemão Golias Leichter Ladungsträger Golias.** 2013. Disponível em: <http://www.seculoshistoria.com.br/2013/10/o-mini-tanque-alemao-golias-leichter.html>. Acesso em: 20 set. 2017.

SILVEIRA, Evanildo da. **É um pássaro? É um avião?** 2014. Disponível em: <https://www.sescsp.org.br/online/artigo/7722_E+UM+PASSARO+E+UM+AVIAO>. Acesso em: 04 jul. 2014.

TAROT (China). **Tarot 4114/320KV Multi-axis brushless motor**. 2017. Disponível em: <http://www.tarot-rc.com/index.php?main_page=product_info&cPath=75&products_id=249>. Acesso em: 30 set. 2017.

TAROT (China). **T960 foldable hexcopter frame set TL960A**. 2017. Disponível em: <http://www.tarotrc.com/Product/Detail.aspx?Lang=en&Id=f86fa22e-c589-41df-8c14-d9886f804a05>. Acesso em: 14 dez. 2017.

TURNIGY (China). **Plush**. 2017. Disponível em: <http://www.turnigy.com/esc/plush/>. Acesso em: 23 set. 2017.

APÊNDICE A ï Programação utilizada no Arduino para controlar a câmera e o lançador de cápsulas

```
// Import the Arduino Servo library
#include <Servo.h>
//variavel utilizada para contar o numero de vezes que a chave da camera foi acionada
int cont_key = 1;
int cont_ret = 0;
int lanca = 1;
int retorno = 0;
boolean carrega = false;
boolean fecha = false;
//variavel utilizada para contar o numero de vezes que a chave de lancamento foi acionada
int cont_lanca = 0;
int mudatilt = 1;
// varivel contadora para o angulo do servo
int i = 0;
int tiltplus = 877;
int tiltdown = 0;
int tiltup = 0;
int tilttoldown = 0;
int tilttolup = 0;
int tolerancia = 20;
// Create a Servo object for each servo da camera
Servo servo1;
Servo servo2;
// criar objetos Servo for cada servo do lancador
Servo servo3;
Servo servo4;
// Pinos de saida dos servos da camera
int pintilt = 4;
int pinpan = 5;
// Pinos de saida dos servos do lancador
int pinsegura = 9;
```

```
int pinlanca = 10;
// Common servo setup values
int minPulse = 600; // minimum servo position, us (microseconds)
int maxPulse = 2400; // maximum servo position, us'
int pos; // servo angle 0-180
//canais de leitura
const int ch8 = 2;
const int ch5 = 3;
void setup(){
//declarando pino como entrada
  pinMode(ch8, INPUT);
  pinMode(ch5, INPUT);
  // Attach each Servo da camera object to a digital pin
  servo1.attach(pintilt, minPulse, maxPulse);
  servo2.attach(pinpan, minPulse, maxPulse);
  // Relacionar cada Servo do lancador para um pino digital
  servo3.attach(pinsegura, minPulse, maxPulse);
  servo4.attach(pinlanca, minPulse, maxPulse);
  //posicao inicial do tubo carregado
  servo3.write(115);
  servo4.write(95);
}
void loop(){
 // **********************Inicio da Logica do Tubo*****************************
 int canal5 = pulseIn(ch5, HIGH);
 if (canal5 > 1710){
   if (carrega){
     retorno = 0;
     fecha = true;
   }
   if (lanca == retorno){
            lanca++;
            servo4.write(30);
            delay(500);
```

```
            servo4.write(95);
            delay(200);
            servo3.write(40);
            delay(400);
            servo3.write(70);
            delay(100);
            servo3.write(40);
            delay(100);
            servo3.write(115);
  }
  if (lanca == 5){
     servo3.write(40);
     servo4.write(30);
     lanca = 1;
     retorno = 0;
     carrega = true;
     delay(10000);
  }
}
if (canal5 < 865){
  if (retorno < lanca){
    retorno++;
  }
  if (carrega && fecha){
    servo3.write(115);
    servo4.write(95);
    carrega = false;
    fecha = false;
  }
}
// **********************Final da Logica do Tubo*****************************
// **********************Inicio da Logica da camera*****************************
int canal8 = pulseIn(ch8, HIGH);
if (canal8 > 1050)
```

```
  {
  if (cont_ret < cont_key){
   cont_ret++;
  }
    if (mudatilt){
      tilttoldown = canal8 - tolerancia;
      tilttolup = canal8 + tolerancia;
      mudatilt = 0;
    }
    if (canal8 <= tilttoldown || canal8 >= tilttolup){
      tiltplus = 877;
      if (canal8 <= 873){ pos = 10; }
      else if (canal8 >= 1721) { pos = 150; }
      else {
        for (i = 24; i < 145; i++){
          tiltdown = tiltplus - 3;
          tiltup = tiltplus + 3;
          if (canal8 >= tiltdown && canal8 <= tiltup){ pos = i; i = 145; }
          tiltplus += 7;
        }
      }
      mudatilt = 1;
    }
  servo1.write(pos);
  servo2.write(60);
  }
else if(canal8 <= 1050 && cont_key == cont_ret){
  //Posicao FPV
  if (cont_key == 1){
    servo1.write(80);
    servo2.write(60);
    cont_key++;
  }
  //Posicao Lanca 1 lado dir ref drone
```

```
  else if(cont_key == 2){
    servo1.write(150);
    servo2.write(90);
    cont_key++;
  }
  //Posicao Lanca 2 lado esq ref drone
  else if(cont_key == 3){
    servo1.write(150);
    servo2.write(30);
    cont_key = 1;
    cont_ret = 0;
  }
 }
 // ************************Final da logica da camera*****************************
}
```