

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



João Paulo de Andrade Dantas

Hexacóptero para Monitoramento de Construção Civil:
Montagem, Testes e Operação

Trabalho de Graduação

2015

Mecânica

João Paulo de Andrade Dantas

**Hexacóptero para Monitoramento de Construção Civil:
Montagem, Testes e Operação**

Orientador

Prof. Dr. Davi Antônio dos Santos

Engenharia Mecânica-Aeronáutica

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
COMANDO-GERAL DE TECNOLOGIA AEROESPACIAL
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão de Informação e Documentação

Dantas, João Paulo de Andrade

Hexacóptero para Monitoramento de Construção Civil: Montagem, Testes e Operação

São José dos Campos, 2015.

98f.

Trabalho de Graduação – Divisão de Engenharia Mecânica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2015. Orientador: Prof. Dr. Davi Antônio dos Santos

1. Robótica aérea. 2. Hexacóptero. 3. Monitoramento de obras de construção civil.

I. Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial. II. Instituto Tecnológico de Aeronáutica.

Divisão de EngenhariaMecânica. III. Hexacóptero para Monitoramento de Construção Civil: Montagem, Testes e Operação

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DANTAS, João Paulo de Andrade. **Hexacóptero para Monitoramento de Construção Civil: Montagem, Testes e Operação**. 2015. 98f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: João Paulo de Andrade Dantas

TÍTULO DO TRABALHO: Hexacóptero para Monitoramento de Construção Civil: Montagem, Testes e Operação

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação / 2015

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

João Paulo de Andrade Dantas
João Paulo de Andrade Dantas
São José dos Campos, SP

**HEXACÓPTERO PARA MONITORAMENTO DE
CONSTRUÇÃO CIVIL: MONTAGEM, TESTES E OPERAÇÃO**

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação

João Paulo de Andrade Dantas

João Paulo de Andrade Dantas

Autor

Davi A. Santos

Prof. Dr. Davi Antônio dos Santos

Orientador

Jesuino Takachi Tomita

Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica-Aeronáutica

São José dos Campos, 25 de novembro de 2015

*A minha família pelo apoio incondicional e ao
meu professor orientador juntamente com a
equipe ITACopter 1 por tornar esse excelente
trabalho possível.*

Agradecimentos

Especialmente aos pais, por terem sempre me apoiado a minha formação e conclusão desse trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Davi Antônio dos Santos pela orientação, confiança e paciência que permitiram o desenvolvimento intelectual de todos os envolvidos.

Ao integrantes da equipe ITACopter 1 por terem me auxiliado com a montagem e operação dos equipamentos e sempre terem disponibilidade para ajudar em todas as etapas do projeto.

*“O que faz um pássaro voar,
é o mesmo que faz os homens pensarem”*

– RÉGIS CASTRO

Resumo

Recentemente tem havido um aumento expressivo do interesse por robôs aéreos do tipo multicóptero por parte de pesquisadores, robistas, e empresas ou pessoas interessadas em alguma aplicação operacional ou economicamente vantajosa desses veículos. O presente trabalho consistirá na montagem, teste e operação de um multicóptero constituído de seis rotores fixos (não vetoráveis) e todos perpendiculares a um mesmo plano (plano dos rotores); denominamos esse robô aéreo de hexacóptero. Para fins de demonstrar a operação desse hexacóptero, será desenhada uma aplicação de inspeção de andamento de obras de construção civil. O hexacóptero a ser montado será controlado por um autopiloto Pixhawk e por rotores, rádio e bateria de aeromodelismo. Esse veículo carregará uma câmera GoPro Hero 3 apontada verticalmente para baixo. Esse trabalho se insere no escopo do projeto ITACopter 1 do Laboratório de Robótica Aérea do ITA (LRA-ITA). Com o intuito de demonstrar o sistema, será realizada uma inspeção do novo prédio da Divisão de Ciências Fundamentais do ITA.

Palavras chave: Robótica aérea. Hexacóptero. Monitoramento de obras de construção civil.

Abstract

There has recently been an increase of interest in air robots like multicopters by researchers, companies or individuals interested in operation benefits and application of these aerial vehicles. This work will consist in the assembly, testing and operation of a multicopter of six fixed rotors and all of them will be perpendicular to the same plane (the rotor plane); this robot is usually called hexacopter. For the purpose of showing the operation of this hexacopter, a progress inspection application of construction sites will be drawn. The hexacopter will be controlled by a Pixhawk autopilot. The vehicle is assembled using hobby parts, which include brushless motors, propellers, RC receiver and transmitter, a frame, a LiPo baterry, and electronic speed controllers. In addition, it will carry a GoPro Hero camera downward-pointing . This work is inserted within the ITACopter 1 Project of the Air Robotics Laboratory at ITA (LRA-ITA). In order to demonstrate the system, an inspection of the ITA's new building of the Fundamental Sciences Division is carried out.

Keywords: Aerial robotic. Hexacopter. Monitoring civil works.

Lista de Figuras

FIGURA 1 - MÁQUINA VOADORA DE LEONARDO DA VINCI.....	15
FIGURA 2 - HELICÓPTERO DE PAUL CORNU	15
FIGURA 3 - QUADRICÓPTERO DE ÉTIENNE OEHMICHEN.....	17
FIGURA 4 - HELICÓPTERO DE BOTHEZAT.....	18
FIGURA 5 - HÉLICES	24
FIGURA 6 - MOTOR	25
FIGURA 7 - CONTROLADOR ELETRÔNICO DE VELOCIDADE.....	26
FIGURA 8 - BATERIAS	27
FIGURA 9 - CARREGADOR COM BATERIA 3S (60C).....	28
FIGURA 10 - ESTRUTURAS	29
FIGURA 11 - TREM DE POUSO	30
FIGURA 12 - VISÃO GERAL DA AUTOPILOT PIXHAWK	32
FIGURA 13 - CONTROLADORA E DISPOSITIVOS PARA OPERAÇÃO	33
FIGURA 14 - PMU	34
FIGURA 15 - SUPORTE PARA ANTENA DO GPS	34
FIGURA 16 - RECEPTOR DE RADIOFREQUÊNCIA	35
FIGURA 17 - RÁDIO CONTROLE	36
FIGURA 18 - FIXAÇÃO DA PIXHAWK	38
FIGURA 19 - FIXAÇÃO DO TREM DE POUSO	39
FIGURA 20 - ALOCAÇÃO DOS BRAÇOS NAS PLACAS CONDUTORAS.....	40
FIGURA 21 - ACOPLAMENTO DA HÉLICE NO MOTOR.....	40
FIGURA 22 - PARTE SUPERIOR DO HEXACÓPTERO MONTADO	41
FIGURA 23 - FIXAÇÃO DA BATERIA	41
FIGURA 24 - FIXAÇÃO DO ESC	42
FIGURA 25 - CARREGAMENTO DO FIRMWARE DA PIXHAWK	43
FIGURA 26 - SOFTWARES DA PIXHAWK PARA DIFERENTES PLATAFORMAS	44
FIGURA 27 - INSTALAÇÃO DO FIRMWARE	45
FIGURA 28 - VERIFICAÇÃO DO CARREGAMENTO DO FIRMWARE	46
FIGURA 29 - INÍCIO DA CALIBRAÇÃO.....	46
FIGURA 30 - CALIBRAÇÃO DO TIPO DE FRAME	47
FIGURA 31 - CALIBRAÇÃO DA BÚSSOLA.....	47
FIGURA 32 - CALIBRAÇÃO DO ACELERÔMETRO.....	48
FIGURA 33 - CALIBRAÇÃO DO RÁDIO	48
FIGURA 34 - ESCOLHA DOS MODOS DE VOO.....	49
FIGURA 35 - HEXACÓPTERO ITACOPTER 1 MONTADO	50
FIGURA 36 - PREPARATIVOS PARA TESTE DE VOO.....	52

FIGURA 37 - HEXACÓPTERO DECOLANDO EM TESTE DE VOO	52
FIGURA 38 - EQUIPE RESPONSÁVEL PELA REALIZAÇÃO DO 1º TESTE DE VOO	53
FIGURA 39 - APLICAÇÃO AGRÍCOLA DE DRONES.....	57
FIGURA 40 - AMAZON UTILIZANDO DRONES PARA ENTREGAS	58
FIGURA 41 - DRONE SENDO UTILIZADO PARA ENTREGA DE PIZZA	59
FIGURA 42 - USO MILITAR DOS DRONES.....	60
FIGURA 43 - MONITORAMENTO DE CONSTRUÇÕES POR DRONES	63
FIGURA 44 - PRIMEIRO E SEGUNDO PRÉDIO NOVO DA DIVISÃO DE CIÊNCIAS FUNDAMENTAIS DO ITA	66
FIGURE 45 - TERCEIRO PRÉDIO NOVO DA DIVISÃO DE CIÊNCIAS FUNDAMENTAIS DO ITA	67
FIGURA 44 - TESTE DO ESC ANTES DO VOO.....	71
FIGURA 45 - FIXAÇÃO DA CÂMERA GoPRO NO DRONE	72
FIGURA 46 - PREPARATIVOS PARA ÚLTIMO VOO TESTE.....	74
FIGURA 47 - TESTE COM A CÂMERA INSTALADA.....	74
FIGURA 50 - IMAGEM OBTIDA PELO HEXACÓPTERO (FRONTAL BAIXA)	76
FIGURA 51 - IMAGEM OBTIDA PELO HEXACÓPTERO (TELHADO).....	77
FIGURA 52 - IMAGEM OBTIDA PELO HEXACÓPTERO (VISÃO GERAL DA CONSTRUÇÃO).....	77
FIGURA 53 - IMAGEM OBTIDA PELO HEXACÓPTERO (OUTRO ÂNGULO).....	78
FIGURA 50 - EQUIPE NO DIA DO VOO NO NOVO PRÉDIO DE CIÊNCIAS FUNDAMENTAIS DO ITA	82
FIGURA 55 - DIVISÃO DE TAREFAS NO INÍCIO DO PROJETO	95
FIGURA 56 - PRIMEIRA REUNIÃO DE MONTAGEM DO HEXACÓPTERO.....	96

Lista de Abreviaturas e Siglas

VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
CLP	Controladores Lógicos Programáveis
VTOL	Vertical Take-Off and Landing (Decolagem e Pouso Vertical)
UAV	Unmanned Aerial Vehicle (Veículo Aéreo Não Tripulado)
MEMS	Microelectromechanical Systems (Sistemas microeletromecânicos)
PI	Proportional-Integral (Proporcional-Integral)
PD	Proportional-Derivative (Proporcional-Derivativo)
PID	Proportional-Integral-Derivative (Proporcional-Integral-Derivativo)
SISO	Single-Input Single-Output (Uma entrada, uma saída)
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output (Múltiplas entradas, múltiplas saídas)
GPS	Global Positioning System (Sistema de posicionamento global)
IMU	Inertial Measurement Unit (Unidade de medição inercial)
ESC	Electronic Speed Controller (Controlador eletrônico de velocidade)
PPM	Pulse-Position Modulation (Modulação por posição do pulso)
PWM	Pulse-Width Modulation (Modulação por largura de pulso)
LSB	Least Significant Byte (Byte menos significativo)
CAD	Computer Aided Design (Desenho assistido por computador)

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1. HISTÓRICO	14
1.2. MULTICÓPTEROS NA ATUALIDADE.....	19
1.3. MOTIVAÇÃO.....	20
1.4. OBJETIVOS	21
2. MONTAGEM E OPERAÇÃO.....	23
2.1. COMPONENTES.....	23
2.1.1.HÉLICES	23
2.1.2. MOTORES	24
2.1.3. CONTROLADOR ELETRÔNICO DE VELOCIDADE	26
2.1.4. BATERIAS	26
2.1.5. CARREGADOR DA BATERIA.....	28
2.1.6. ESTRUTURA.....	29
2.1.7. TREM DE POUSO	30
2.1.8. CONTROLADOR DE VOO.....	31
2.1.9. PMU.....	33
2.1.10. GPS	34
2.1.11. RECEPTOR DE RADIOFREQUÊNCIA	35
2.1.12. RÁDIO CONTROLE	35
2.2. MONTAGEM	37
2.3. CONFIGURAÇÃO DO AUTOPILOTO.....	42
2.4. TESTES DE VOO.....	51
3. APLICAÇÕES	54
3.1. CAMPOS DE ATUAÇÃO	54
3.2. MONITORAMENTO NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	61
3.3. ESTUDO DO CASO.....	64
3.3.1. PROPOSTA	64
3.3.2. METODOLOGIA DE PROJETO.....	69
3.3.3. PROCEDIMENTOS.....	70
3.3.4. RESULTADOS.....	75
4. CONCLUSÕES	79

ANEXO A – PROPOSTA INICIAL DO PROJETO	83
ANEXO B – REGISTROS DE REUNIÕES DO PROJETO	88
REFERÊNCIAS.....	97

1. Introdução

No presente capítulo foi realizado um levantamento histórico da origem dos multicópteros e seu papel na sociedade nos dias atuais. Foi feito ainda a apresentação do projeto ITACopter 1, que trata da montagem e operação de um hexacóptero, e da motivação para realização desse estudo. Por fim, foram traçados todos os objetivos relativos ao projeto e que pontos serão destacados no decorrer desse trabalho.

1.1. Histórico

O homem sempre teve um grande anseio por voar e conquistar os céus. Esse sonho vem desde os tempos mais antigos. Podemos encontrar muitas histórias e lendas de povos do passado que trazem o grande desejo de construir máquinas voadoras. O desejo de voar está presente na humanidade provavelmente desde o dia em que o homem pré-histórico passou a observar o voo dos pássaros e de outros animais voadores. Desenhistas de aeronaves esforçaram-se para melhorar continuamente suas capacidades e características tais como alcance, velocidade, capacidade de carga, facilidade de manobra, dirigibilidade, segurança, autonomia e custos operacionais, entre outros. Aeronaves passaram a ser feitas de materiais cada vez menos densos e mais resistentes.

Falando mais especificamente sobre helicópteros, muito provavelmente foi o artista e inventor italiano Leonardo da Vinci a primeira pessoa a se dedicar seriamente a projetar uma máquina capaz de voar carregando um ser humano. Ele desenhou um veículo que seria semelhante a um helicóptero em forma de parafuso. A primeira ideia pouco prática de um helicóptero foi concebida por Leonardo da Vinci no século XV, mas esquecida até a invenção do avião no século XX. O primeiro voo bem-sucedido e registrado de um helicóptero ocorreu em 1907, realizado por Paul Cornu, na França.



Figura 1 - Máquina Voadora de Leonardo da Vinci

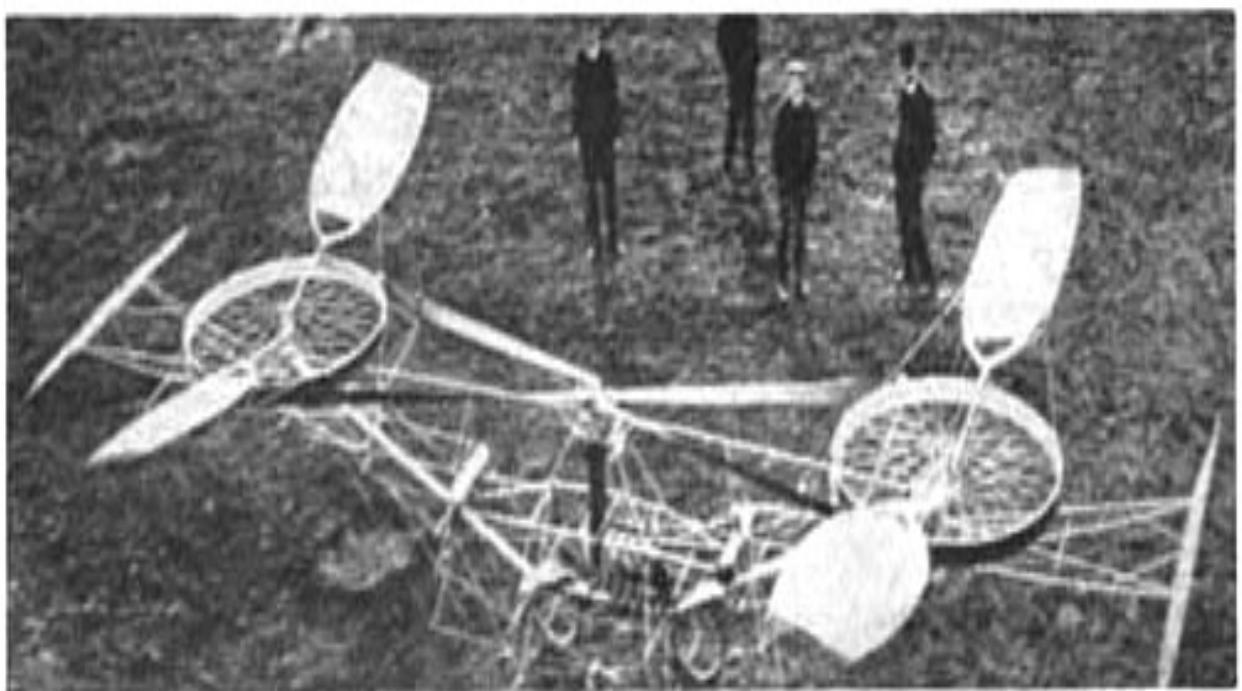


Figura 2 - Helicóptero de Paul Cornu

Veículo aéreo não tripulado (VANT) ou drone é todo e qualquer tipo de aeronave que não necessita de pilotos embarcados para ser guiada. Esses aviões são controlados a distância por meios eletrônicos e computacionais, sob a supervisão e governo humanos, ou sem a sua intervenção, por meio de Controladores Lógicos Programáveis (CLP). Quando se tratando de Veículos Aéreos Não-Tripulados (VANT), os primeiros modelos são bem antigos, quando ainda não se imaginava existirem motores elétricos sem escovas (brushless). Eles eram bem grandes e diferentes dos atuais. Foram realizadas tentativas de voo desde o ano 1907, por desenvolvedores como Louis Breguet.

Os VANT's foram idealizados inicialmente para fins militares. Inspirados nas bombas voadoras alemãs e nos inofensivos aeromodelos rádio-controlados. Estas máquinas voadoras de última geração foram concebidas, projetadas e construídas para serem usadas em missões muito perigosas para serem executadas por seres humanos, nas áreas de inteligência militar, apoio e controle de tiro de artilharia, apoio aéreo a tropas de infantaria e cavalaria no campo de batalha, controle de mísseis de cruzeiro, atividades de patrulhamento urbano, costeiro, ambiental e de fronteiras, atividades de busca e resgate, entre outras. Eles tinham aplicação para aviões tripulados como policiamento e combate a incêndios, e com a segurança não militar, como a vigilância de dutos.

Logo no início da história do voo, as configurações do quadricóptero eram vistas como possíveis soluções para alguns dos problemas persistentes em voos verticais; problemas de controle de torque induzido (bem como as questões de eficiência provenientes do motor de cauda, o que gera uma elevação inútil) pode ser eliminado, por contra- rotação e as lâminas relativamente curtas são muito mais fáceis de construir. Uma série de projetos tripulados apareceu na década de 1920 e 1930. Estes veículos estão entre os primeiros heavier-than-air (mais pesados que o ar) de subida e descida vertical, ou seja, a descolagem e a aterrissagem são feitas na vertical. No entanto, os protótipos iniciais sofriam de mau desempenho, e os protótipos finais necessitavam de muito trabalho do piloto, devido à má estabilidade e o controle limitado. Mais recentemente projetos tornaram-se populares em veículos aéreos não tripulados.

Esses veículos utilizam um sistema eletrônico de controle e sensores para estabilizar a aeronave. Com seu pequeno tamanho e capacidade de manobra ágil, esses quadricópteros podem ser pilotados tanto dentro de casa quanto ao ar livre. Existem várias vantagens nos quadricópteros, comparando com os helicópteros: em primeiro lugar, um quadricóptero não

exige ligações mecânicas para variar o ângulo das pás do rotor enquanto giram, isto simplifica a criação e manutenção do veículo; em segundo, o uso de quatro rotores permite que cada rotor individual tenha um diâmetro menor ou igual ao rotor do helicóptero, o que lhes permite ter menos energia cinética durante o voo. Isto reduz o dano causado quando os rotores batem no nada. Os VANT's em pequena escala possibilitam uma interação próxima e segura. Alguns quadricópteros em pequena escala têm quadros que encerram os rotores, permitindo voos entre ambientes mais desafiadores, e com menor risco de danificar o veículo ou seus arredores. Devido à sua facilidade de construção e controle, os quadricópteros são frequentemente usados como projetos de aeronaves amadoras.

Uma das primeiras reais tentativas de construção de um multicóptero foi realizada por Étienne Oehmichen. Ele fez experiências com projetos de helicópteros em 1920. Entre os seus projeto, tinha um com quatro rotores e oito hélices, tudo impulsionado por um único motor. Ele utilizou um quadro de tubos de aço , com rotores de duas lâminas com as extremidades dos quatro braço. A aeronave apresentou um considerável grau de estabilidade e nível de controle para aquela época. Foram realizadas ainda vários voos de teste durante a década de 1920. Em 1923 ele foi capaz de permanecer no ar por alguns minutos, e em 14 de abril de 1924 estabeleceu o primeiro recorde de distância para helicópteros de 360 metros.

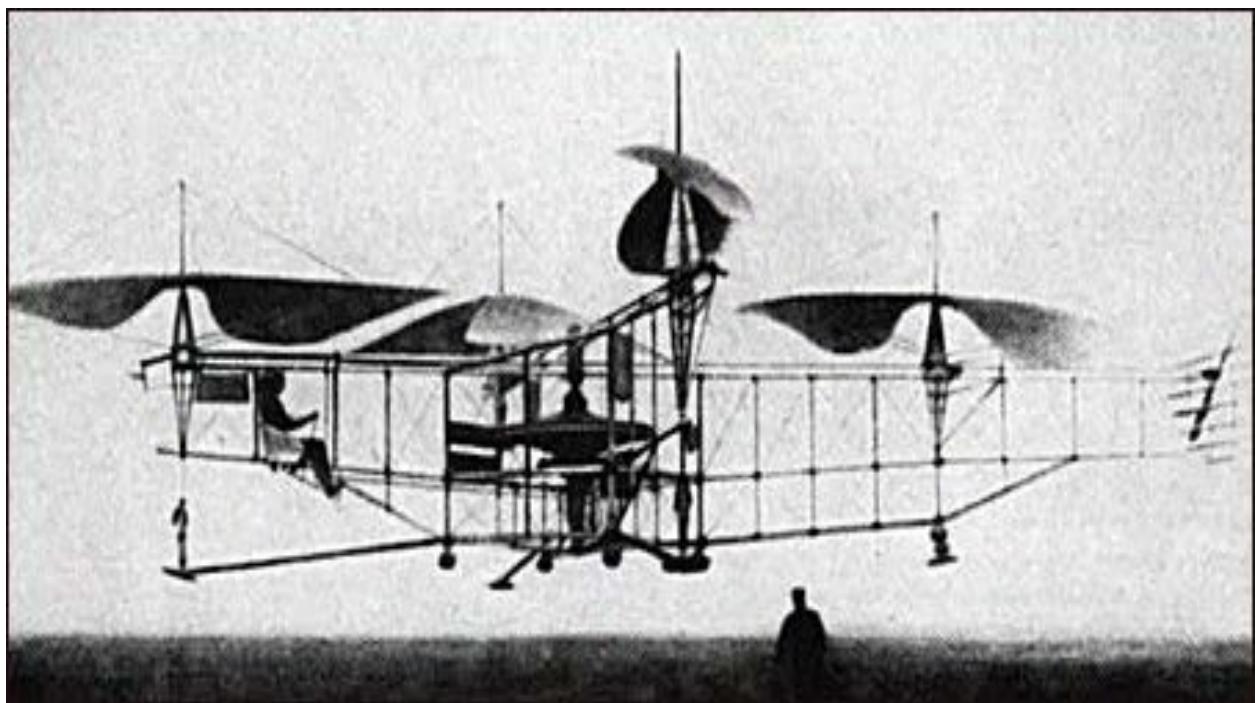


Figura 3 - Quadricóptero de Étienne Oehmichen

Posteriormente, Dr. George de Bothezat e Ivan Jerome desenvolveram esta aeronave, com seis pás rotores na extremidade de uma estrutura em forma de X. O principal problema deste tipo de sistema é a sua instabilidade demandando um grande esforço do piloto para manter a máquina em voo. Duas pequenas hélices com passo variável foram utilizados para controle de pressão e de guinada. Construído pelo Serviço Aéreo dos EUA, ele fez seu primeiro voo em outubro de 1922. Apesar de demonstrar viabilidade, era de baixa potência, sem resposta, mecanicamente complexo e suscetíveis a problemas de confiabilidade. O trabalho do piloto era muito durante a tentativa de movimento lateral. Posteriormente, com o avanço da tecnologia, os obstáculos mais graves na controlabilidade foram resolvidos viabilizando a construção de um helicóptero mais simples.

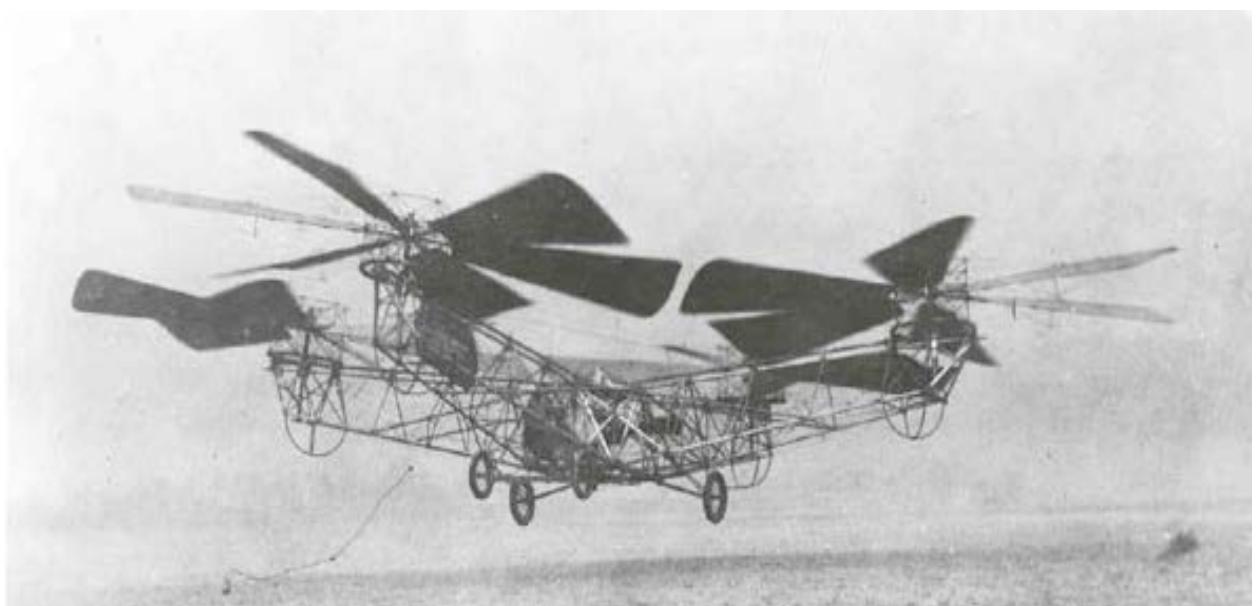


Figura 4 - Helicóptero de Bothezat

Convertawings em 1956 desenvolveu um modelo de quadricóptero que foi o único concebido para ser o protótipo de uma linha de quadricópteros civis e militares. Voou muitas vezes com sucesso, em meados da década de 1950, este helicóptero provou o projeto quadricóptero e foi também o primeiro helicóptero de quatro rotores, para demonstrar o voo bem sucedido para a frente. No entanto devido à falta de encomendas de versões comerciais ou militares, o projeto foi encerrado.

Por fim, o Curtiss-Wright VZ-7 era um avião VTOL (*Vertical Take Off and Landing*) projetado pela empresa Curtiss-Wright para o Exército dos EUA. O VZ-7 é controlado alterando a pressão de cada uma das quatro hélices.

1.2. Multicópteros na Atualidade

Nas últimas décadas houve um grande e notável crescimento no uso de Veículos Aéreos Não-Tripulados (VANT's) em especial para aplicações em que o alcance humano se torna muito difícil e com alto custo. Multicópteros em geral tem um baixo custo de fabricação e operação além de grande variedade de aplicações o que os torna muito versáteis e, certamente, solucionam muitos problemas de aplicações na agricultura e para exploração espacial. Os VANT's são os dispositivos do futuro para monitoramento. Eles podem ser classificados em dois grupos principais, semelhantemente aos veículos tripulados: os drones de asas rotativas e de asas fixas. É fato conhecido que em geral aeronaves de asas rotativas tem uma maior flexibilidade de aplicação, já que conseguem pairar no ar. Por esse motivo, o que mais vem sendo utilizado é o VANT com asas rotativas chamado multicóptero. Dependendo do número de rotores, podem ser chamados de quadricópteros (4 rotores), hexacópteros (6 rotores), etc. Multicópteros são veículos aéreos muito mais compactos capazes de fazer poucos e decolagens verticais. Atualmente, devido a sua estrutura simples e pequena, vem sendo utilizado com bastante frequência em tarefas diversas no nosso dia-a-dia. Podem ser controlados autonomamente ou por controle remoto, sendo essa última forma a prática mais comum.

Hexacópteros também podem ser classificados como helicópteros, ainda que diferente de um helicóptero padrão. São capazes de utilizar hélices de elevação fixa, as quais o ângulo de ataque não varia como as hélices de rotação. O controle de movimento da aeronave pode ser realizado variando-se a velocidade relativa de cada rotor para alterar o empuxo e o torque produzido por cada um. Assim como um helicóptero convencional, eles podem planar no ar, mas possuem outras vantagens, como uma mecânica mais simples e pilotagem mais fácil. Os multicópteros, diferentemente dos helicópteros padrões, são dispositivos capazes de voar utilizando rotores com pás de passo fixo para gerar o empuxo necessário para se permanecerem em voo.

Nas últimas décadas, em pequena escala Veículos Aéreos Não Tripulados tornaram-se mais comuns e são usados para muitas aplicações. A necessidade de aeronaves com maior capacidade de manobra e capacidade de pairar levou ao aumento atual na pesquisa de multicópteros. O seu design é relativamente simples na sua concepção, mas altamente confiável e manobrável. Investigações de ponta, continua a aumentar sua viabilidade, fazendo

avanços na comunicação, exploração do ambiente, e capacidade de realizar manobras diversas. O desenvolvimento de baterias leves, motores sem escovas e sensores MEMS (*Microelectromechanical systems*) contribuiu significativamente na construção e controle deste tipo de helicóptero. Por possuir uma estrutura mecânica muito simples, um multicóptero pode ser montado a partir de materiais facilmente encontrados no mercado. Se todas essas qualidades em desenvolvimento podem ser combinados entre si, os multicópteros seriam capazes de realizar missões autónomas avançadas que não estão atualmente possível com qualquer outro veículo.

Atualmente, o desenvolvimento de pesquisas e fabricação de VANT's são realizadas e estimuladas, principalmente, por militares estadunidenses, pelas Forças Armadas de Israel. Os drones são, há vários anos, um dos principais instrumentos da estratégia militar dos Estados Unidos, mas 51 Estados já possuem esta tecnologia. Ele vem desenvolvendo cada vez mais aplicações diversas tanta para uso militar, na indústria ou particular. Os campos de utilização desse dispositivo extravasam os limites da imaginação devido a sua grande versatilidade. Certamente o seu desenvolvimento e operação será um dos campos mais explorados e bem utilizados da robótica futuramente.

1.3. Motivação

Recentemente tem ocorrido um grande aumento do interesse por robôs aéreos do tipo multicóptero por parte de pesquisadores, robistas, e empresas ou pessoas interessadas em alguma aplicação operacional ou economicamente vantajosa desses veículos. O uso de tais veículos aéreos não tripulados na indústria militar, civil para monitoramento e operação e ainda em pesquisas acadêmicas se deve ao grande desenvolvimento tecnológico da parte de controle no que diz respeito a todos sensores, atuadores, controladores e ainda materiais mais versáteis, leves e de custo mais baixo. Isso tudo trouxe a possibilidade da criação de aeronaves com menor tamanho, mais funções operacionais e alta capacidade de processamento de dados.

Os VANT's da atualidade possuem em geral uma dinâmica de operação complexa e instável, o que torna essencial o contínuo estudo nessa área em busca de fontes mais rápidas e simples de aquisição de dados e controle. A busca de transporte de sinais e aquisição de dados

de forma mais rápida e eficiente estimula os estudos na área. A quantidade de projetos relacionados a drones será, certamente, de muito proveito para o desenvolvimento de novos sistemas de controle ou mesmo para o teste e melhor conhecimento dos sistemas já existentes. O desenvolvimento da estrutura geral dos multicópteros também é um fator muito importante e realmente é uma grande motivação para estudos nessa área. Uma das grandes restrições desse tipo de dispositivo é o peso, onde há a necessidade da constante redução de peso de sua estrutura para poder aumentar a capacidade de carga de equipamentos em voo e aumentar sua autonomia além de é necessário uma preocupação com a sua distribuição. Deve-se buscar configurações onde o peso total da aeronave esteja concentrado na parte mais inferior da estrutura para se ter uma maior estabilidade de voo. A evolução tecnológica, a busca por novos conhecimentos e o desejo de atingir a fronteira do conhecimento são a grande motivação para tornar realidade esses projetos realidade e trazer uma inovação nessa área da mecatrônica tão promissora.

Definitivamente, a principal motivação de todo esse projeto, além da possibilidade de uma grande contribuição na área de robótica aérea, é o grande exemplo que ele irá representar. Será um estudo de sucesso que espero que possa motivar outras pessoas a continuarem e expandirem o estudo do controle e operação de multicópteros. Com a criação do primeiro hexacóptero do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), espero que o projeto ITACopter 1 desperte o interesse de docentes e dezenas para estudos na área e criação de outros projetos. Quanto mais pessoas envolvidas e motivadas em tal estudo, melhor para uma expansão do Departamento de Robótica do nosso Instituto. Nesse projeto em específico será feita uma aplicação (monitoramento aéreo por meio de fotografias) e espero que isso sirva de motivação para a utilização de outras aplicações no futuro.

1.4. Objetivos

O presente projeto consistirá na montagem, teste e operação de um multicóptero constituído de seis rotores fixos (não vetoráveis) e todos perpendiculares a um mesmo plano (plano dos rotores); denominamos esse robô aéreo de hexacóptero. Para fins de demonstrar a operação desse hexacóptero, será desenhada uma aplicação de inspeção de andamento de obras de construção civil. O hexacóptero a ser montado será controlado por um autopiloto

Pixhawk e por rotores, rádio e bateria de aeromodelismo. Esse veículo carregará uma câmera GoPro Hero 3+ apontada verticalmente para baixo. Esse trabalho insere no escopo do projeto ITACopter 1 do Laboratório de Robótica Aérea do ITA (LRA-ITA). Com o intuito de demonstrar o sistema, será realizada uma inspeção do novo prédio da Divisão de Ciências Fundamentais do ITA.

No desenvolvimento do projeto será feito seguindo todas as etapas e especificações de um projeto de engenharia. Desde sua criação, montagem, configuração, simulação, operação e validação final. As etapas do projeto seguiram uma linha de desenvolvimento e ritmo de desenvolvimento constante, onde reuniões semanais com todos os envolvidos no projeto serão realizadas. Será seguido uma didática no projeto para que ele sirva de exemplo para futuros projetos na área de robótica aérea.

Podemos citar mais especificamente para o desenvolvimento do projeto que inicialmente será preciso trabalhar com todas as especificações de montagem, pensando em aspectos como configuração dos equipamentos, distribuição de peso, análise da estrutura em geral e como será feita a montagem dos equipamentos da forma mais eficiente possível. Temos ainda que analisar o controlador do projeto e realizar sua calibração de modo a realizar um voo de forma eficiente e equilibrada. Os testes de operação por questões de segurança e previsão de possíveis erros que possam acontecer antes de utilizar o protótipo para sua real aplicação é uma etapa muito importante também. Por fim, sua real utilização no objetivo para que foi planejado, que é o monitoramento das áreas de construção civil, atentando para a melhor forma de fixação e utilização da câmera que será utilizada na operação.

2. Montagem e Operação

Nesse capítulo será feito um levantamento de todos os componentes utilizados na montagem do hexacóptero do projeto ITACopter 1. Serão descritos ainda os passos de montagem e configuração do autopiloto Pixhawk. Por fim, será mostrado como foram realizados os testes relativos a fase de operação do drone.

2.1. Componentes

A montagem de um multicóptero e a obtenção das suas peças é relativamente simples. Ele pode ser construído a partir de peças disponíveis para aeromodelismo elétrico, e estas podem facilmente ser encontradas em lojas especializadas. Porém, devido os diversos tipos de componentes, a escolha dos componentes deve ser cuidadosa. Será descrito quais os principais componentes necessários para montagem e operação de um multicóptero assim como seu funcionamento e especificações.

2.1.1. Hélices

São os componentes que vão gerar o empuxo necessário para operar o drone. Possuem um baixo custo o que é totalmente compreensível já que eles podem se danificar por muitas vezes durante as fases de teste do multicóptero. Hélices são basicamente as mesmas utilizadas em aeromodelos que podem ser usadas também em multicópteros de forma satisfatória. Estas hélices têm certas particularidades que são caracterizadas pelo seu diâmetro, pelo passo e tipo. Todas estas informações, normalmente são especificadas através de uma sequência de dígitos. Cada fabricante tem sua designação para o tipo de hélice que podem ser resumidas em dois tipos: hélices para alta rotação (Sport, E, HD) e baixa rotação (SF, RD, GF). Por exemplo: uma hélice 11x4.7SF, possui 11 polegadas de diâmetro, 4.7 polegadas de passo e é do tipo Slow Flyer. Outra forma de representação seria SF1147. Utilizaremos 6 hélice GF1045 no

projeto ITACopter 1. O hexácoptero terá 3 hélices girando no sentido horário e 3 hélices no sentido anti-horário.



Figura 5 - Hélices

2.1.2. Motores

Responsável por transformar energia elétrica da bateria em energia cinética para movimentar as hélices e causar sustentação. Nesse caso, utilizaremos motores sem escovas que são muito mais eficientes e fáceis de operar por consumir menos bateria e por produzir um maior trabalho líquido. Para utilização desses motores, é necessário o conhecimento de quando mais alto o KV (número de rotações por minuto por Volt), menos força e mais velocidade vai ter o motor. Isso significa que devemos utilizar hélices menores. Para motores

com baixo KV, tempos mais força e menos velocidade, que significa que devemos utilizar hélices maiores. Motor é um ponto de grande importância em um projeto de um multicóptero devido a sua eficiência e preço, que precisam ser máxima e mínimo respectivamente. Pensando nesses aspectos, os motores de corrente continua sem escovas ou brushless são amplamente utilizados. Um motor brushless típico possui imãs permanentes que giram e uma armadura fixa, eliminando problemas associados ao fornecimento de corrente necessária para mover a armadura. Estes motores oferecem diversas vantagens em relação aos motores de corrente contínua com escovas, dentre as quais, pode-se destacar um maior torque por peso, vida útil mais longa, confiabilidade mais elevada, menor ruído e mais torque por watt (maior eficiência). No entanto, estes benefícios vêm com o custo do sistema eletrônico de controle de potência, que é menos robusto, mais complexo e mais caro.



Figura 6 - Motor

2.1.3. Controlador Eletrônico de Velocidade

Controla a rotação do motor. Recebe o sinal da controladora central e vai regular a aceleração do motor, permitindo que ele acelere mais ou menos dependendo da situação. Para cada motor é necessário a utilização de um controlador específico para ser realizado o controle de rotação. Os motores Brushless exigem complexos controladores eletrônicos de velocidade (electronic speed control ou ESC) para funcionar. O ESC substitui a escova/comutador de um motor escovado, mudando continuamente a fase para os enrolamentos e mantendo a rotação do motor.



Figura 7 - Controlador Eletrônico de Velocidade

2.1.4. Baterias

A bateria é um componente que desempenha um papel muito importante em um projeto mecatrônico, pois ela irá definir a autonomia de utilização do dispositivo em questão. É necessário ainda considerar o peso da bateria como gargalo de projeto para não comprometer o desempenho do multicóptero no caso desse projeto. A posição de fixação pode influenciar ainda no balanço de peso da aeronave que pode comprometer a estabilidade de voo. Devido à relação peso-potência, as baterias de lítio polímero (LiPo) são as que

apresentam uma maior eficiência. Estas baterias são formadas por células de 3,7V associadas em série para conseguir a tensão necessária. A letra S significa o numero de células, por isso um Pack de 2S tem 7,4V e um de 3S tem 11,1V. A letra C expressa a relação entre a capacidade da célula ou do Pack em mA e a corrente em Amperes (1000:1). É usada normalmente para indicar a máxima corrente de carga e descarga do Pack (tal como 1C, 2C). Um Pack que forneça 2000mA (2A) a 30C por exemplo, poderá entregar até 60A para os motores continuamente. Essas baterias nunca podem descarregar menos que 3.5V e isso é controlado pela PMU. Foram utilizadas as seguintes baterias no projeto do ITACopter 1: *Turnigy Power Systems 2.2* (2200mAh, 20-30C, 3S) e *Turnigy Power Systems Nano-Tech 3.3* (3300mAh, 25-50C, 3S). Em geral essas baterias vão gerar uma autonomia de 10 a 15 minutos de voo, dependendo do tipo de bateria utilizada.



Figura 8 - Baterias

2.1.5. Carregador da Bateria

As baterias de LiPo em geral precisam de um tratamento especial na hora de carregar, pois a não observância de aspectos importantes de segurança podem fazer a bateria até entrar em combustão. Foi utilizado um carregador inteligente no projeto que é próprio para esse tipo de bateria. Para realizar o carregamento de forma correta é necessário conectar o cabo do balanceador da bateria na porta do balanceador do carregador e o cabo central de alimentação. Em geral esses carregadores podem ser utilizados para baterias LiPo e LiFe. Portanto é necessário observar como o carregador em questão está configurado para operar para que o carregamento seja feito de maneira satisfatório. Deve-se observar ainda a amperagem da bateria para que seja configurado também junto ao carregador.



Figura 9 - Carregador com Bateria 3S (60C)

2.1.6. Estrutura

Foi utilizado a estrutura pronta para a montagem do hexáptero do projeto ITACopter 1. O motivo de ter se utilizado esse tipo de componente já pronto é a falta de tempo hábil para o desenvolvimento customizado, além de que as estruturas do mercado são muito bem feitas e com acabamento satisfatório. Poderia ter sido utilizado uma impressora 3D para a confecção de todas as partes da estrutura, o que demandaria uma mão de obra e tempo muito maior, além de que não teríamos certeza se a estrutura teria sido feita da melhor maneira possível. Devido à simplicidade mecânica do multicóptero, a estrutura deste pode facilmente ser construída com materiais simples e facilmente encontrados. É necessário que a estrutura seja rígida o suficiente, mas não poderá ser muito pesada. Materiais como madeira ou tubos de alumínio, possuem uma boa rigidez com pouca massa e por isso são muito utilizados na construção da estrutura. Contudo, devido à popularização dos multicópteros, hoje é possível encontrar em lojas de aeromodelismo estruturas em forma de kit para montar de diversas formas e tamanho, construídos desde madeira até fibra de carbono. Foram utilizados frames de plástico do modelo F550 nesse projeto em específico por terem um custo menor em relação aos feitos de alumínio ou fibra de carbono. Ela é composta de 6 extensões onde serão fixados os rotores e duas placas metálicas de condução de corrente. Nessas placas além de serem fixadas as estruturas onde estarão os motores, também será fixado o trem de pouso.



Figura 10 - Estruturas

2.1.7. Trem de Pouso

Foi utilizado nesse projeto um trem de pouso único especialmente projetado que pode ser instalado com Multifuncional FPV Câmera Mount. Alta: 200 mm; Ampla Top: 90 mm; e de largura Inferior: 295 mm. Possui características de dimensão 34,0 cm x 0,5 cm x 18,0 cm e peso de 340 g. Foi decidido a utilização de um trem de pouso para o hexácoptero para proteção e suporte da estrutura tanto nas decolagens e pousos do multicóptero. A equipe atentou para a utilização de um modelo que fosse de acordo com a estrutura utilizada no projeto (F550).



Figura 11 - Trem de Pouso

2.1.8. Controlador de Voo

A controladora central é o dispositivo que controla todas as funções do drone. A placa de controle de voo é parte essencial de um multicóptero. Ela identifica as entradas do transmissor e regula independentemente cada motor, permitindo o multicóptero pairar no ar enquanto realiza os movimentos de manobra. Dentro desse dispositivo se encontram todos os sensores que são importantes para os movimentos. As controladoras podem ser formadas a partir de um processador central e de diversos sensores. O acelerômetro que vai medir a velocidade que com que drone faz os movimentos nos eixos. O giroscópio, que mede o ângulo que o drone está em relação ao solo. A partir de giroscópios eletrônicos, é possível perceber as pequenas variações no movimento do aparelho e assim compensar este movimento alterando a rotação dos motores. Porem outros sensores podem ser utilizados para melhorar a estabilidade do aparelho e facilitar sua operação. Por isso, além dos giroscópios algumas controladoras podem utilizar outros sensores como acelerômetros, magnetômetros, sensor barométrico e GPS. O barômetro que é um sensor de pressão que vai medir a altura do drone, que permite que ele fique sempre na mesma altura ou faça movimentos de altitude com precisão. As controladoras podem ser formadas a partir de um processador central e de diversos sensores. A partir de giroscópios eletrônicos, é possível perceber as pequenas variações no movimento do aparelho e assim compensar este movimento alterando a rotação dos motores. Porem outros sensores podem ser utilizados para melhorar a estabilidade do aparelho e facilitar sua operação. A Pixhawk é uma controladora de código aberto, ou seja, temos acesso aos algoritmos que fazem todo esse processamento de funções. Tem-se ainda acesso ao software para configuração do controlador junto ao multicóptero que varia dependendo do projeto de acordo com configuração e quantidade de rotores, peso, bateria utilizada, etc. Utilizou-se uma controlador de código aberto, porém não foi realizado nenhum tipo de programação no algoritmo de funcionamento. Utilizou-se apenas o software específico para o controlador, visto que os códigos de processamento já estão prontos e não foi necessário uma demanda de tempo com programação de códigos-fonte de controle. O foco do projeto é a construção da estrutura, operação e aplicação do multicóptero. No escopo desse projeto será utilizado uma autopilot Pixhawk com todos os seus componentes como controlador central.

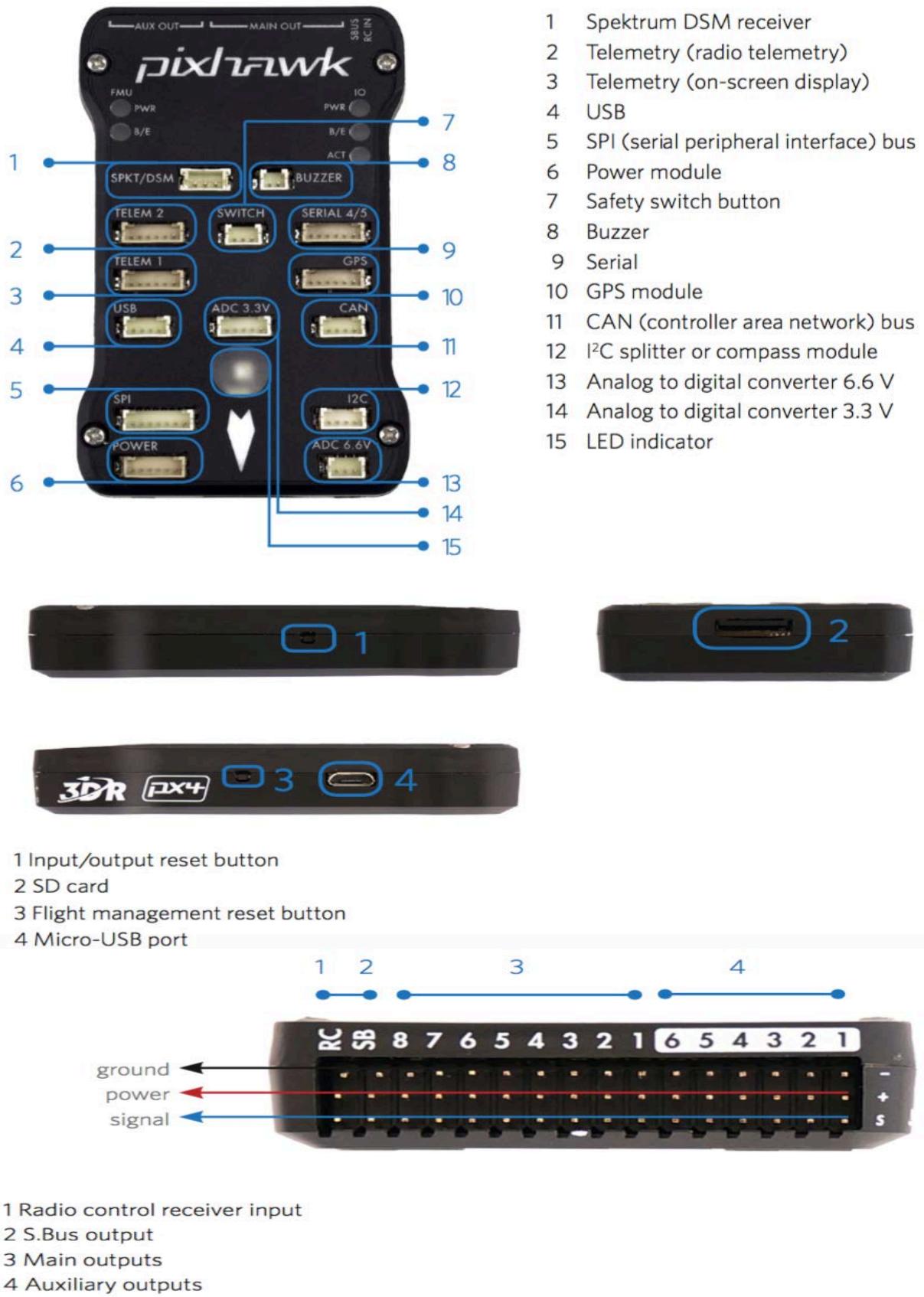


Figura 12 - Visão Geral da Autopilot Pixhawk



- 1 Pixhawk
- 2 Buzzer
- 3 Safety switch
- 4 Micro-SD card and adapter
- 5 Micro-USB cable
- 6 Six-wire cable x2

- 7 Power module
- 8 I²C splitter module
- 9 Four-position I²C splitter cable
- 10 Three-wire servo cable
- 11 Mounting foam

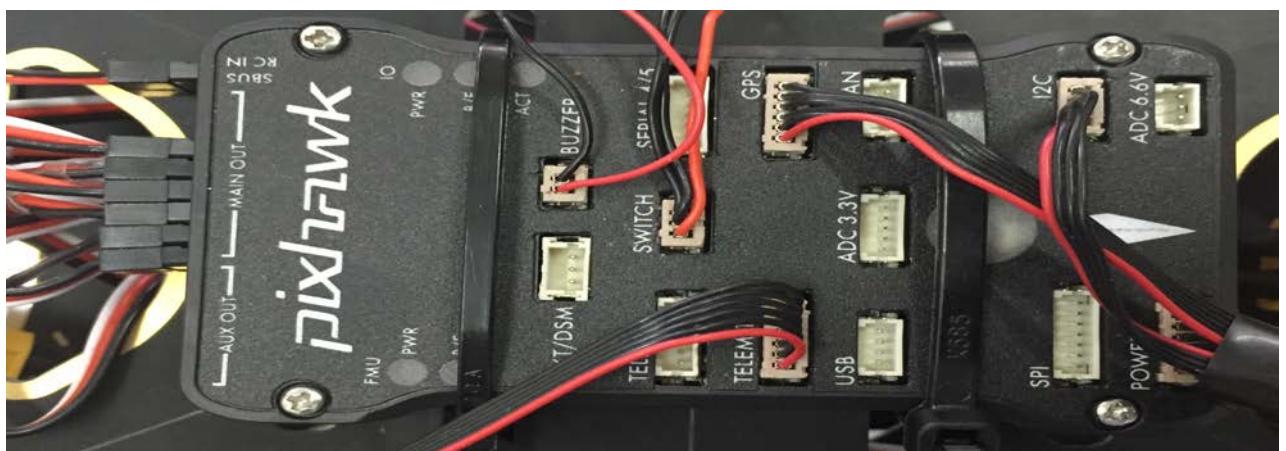


Figura 13 - Controladora e dispositivos para operação

2.1.9. PMU

A PMU tem a função de medir a voltagem da bateria, informando essa voltagem para a controladora central, informando assim ao piloto se ela está baixa ou não. Ele tem também a função de alimentar o sistema com uma voltagem constante. Ela permite ainda que a bateria, como estamos utilizando uma bateria de 3 células (11 V), nunca descarregue menos que 3.5V.



Figura 14 - PMU

2.1.10. GPS

Composto pela antena do GPS, a bússola e o módulo do GPS propriamente dito. Função de informar para a controladora central as informações de latitude e longitude em tempo real. Desse modo o drone pode ficar parado ou retornar ao local onde ele decolou.



Figura 15 - Suporte para antena do GPS

2.1.11. Receptor de Radiofrequêcia

O receptor é responsável de decodificar o sinal de radiofrequência que vem do controle remoto em uma linguagem que a controladora central possa processar.



Figura 16 - Receptor de Radiofrequêcia

2.1.12. Rádio Controle

Principal comunicação entre o piloto e o multicóptero. A maioria dos rádio controles utilizados em drones nos dias de hoje são os mesmos que eram utilizados em aeromodelos no passado. Normalmente eles trabalham na faixa de frequência de 2.4 GHz. Um controle pode ter vários canais, dependendo do tipo de multicóptero que está sendo projetado. Em geral os controles tem sete canais onde cada um responsável por um comportamento do drone.

Comandos de arfagem, guinada e rolagem são os que comandam todos os tipos de aeronaves. Podem ser utilizado ainda nos canais comandos como ligar ou desligar o GPS ou ainda movimentar a câmera de acordo com a aplicação do projeto.



Figura 17 - Rádio Controle

O rádio controle usado no projeto ITACopter 1 foi Turnigy TBT 9X de 9 canais de controle que se mostrou muito eficiente para alocar todas as possíveis operações a serem realizadas no hexacóptero de forma remota.

2.2. Montagem

Para a montagem de um multicóptero serão necessárias algumas ferramentas específicas para esse tipo de projeto. Segue abaixo a lista de algumas dessas ferramentas e materiais:

- Ferro de Solda;
- Estanho;
- Alicate de corte para poder realizar a soldagem dos fios na placa do frame;
- Chaves de fenda (2 mm);
- Braçadeiras para fixação dos ESC's na placa central;
- Termoretráteis.

Obtido esses materiais, será iniciado a montagem do multicóptero. Inicialmente será feito a preparação e fixação dos ESC's na placa central. Isso será feito por meio do ferro de solda e serão utilizados termoretráteis como proteção das conexões. Observe que nesse projeto em específico serão utilizados 6 ESC's que serão fixados por meio de braçadeiras nas extensões da estrutura que liga com os rotores. Os ESC's foram fixados abaixo dos braços do hexacóptero com a intenção de deslocar o máximo do centro de massa para a parte inferior. Isso irá gerar uma maior estabilidade de voo, já que a maior parte do peso estará concentrado abaixo dos rotores.

Após a fixação dos ESC's, será realizada a fixação da PMU na placa central onde será conectada a bateria posteriormente. Feito isso, será feito a montagem dos “braços” do multicóptero e a fixação dos motores nas suas respectivas extremidades. Para tal, foram utilizados os parafusos que vieram inicialmente no kit da estrutura de hexáoptero (F550). Foram utilizados 4 parafusos para a fixação de cada rotor em cada extensão da estrutura. Foi adotado como frente do drone os dois braços na cor vermelha bem como a parte posterior do drone outros dois braços na cor amarela. Observe que os braços brancos representam a divisão entre a parte anterior e posterior do hexacóptero.

Feito isso, agora será feita a conexão dos ESC's com os rotores. Observe que os motores precisam alternar entre girar no sentido anti-horário e horário, ou seja, três dos

rotores irão girar no sentido anti-horário e os outros 3 rotores no sentido horário. A forma de determinar essa rotação é na forma como conectar os rotores aos ESC's. A sequência dos fios que são conectados dos motores nos ESC's irá definir o sentido de rotação. Após conectar o rotor e perceber que ele está girando no sentido errado no que foi determinado inicialmente, basta trocar quaisquer dois fios de posição entre si para que o motor passe a girar em outro sentido de rotação.

Próximo passo seria a fixação da controladora central no frame. Para realizar essa fixação pode ser utilizado fita dupla face, braçadeira, velcro ou qualquer outro tipo de meio de fixação. No projeto do hexacóptero foram utilizados braçadeiras. A posição da controladora central no frame normalmente é no centro do multicóptero. No próprio dispositivo da controladora existe uma seta que indica onde é a parte anterior do drone. Ou seja, no caso desse projeto, a Pixhawk precisa estar com essa seta apontada para os braços vermelhos. Feito a fixação da controladora central no frame, será feito então a sua conexão aos ESC's no respectivo canal de cada motor (M1 a M6).

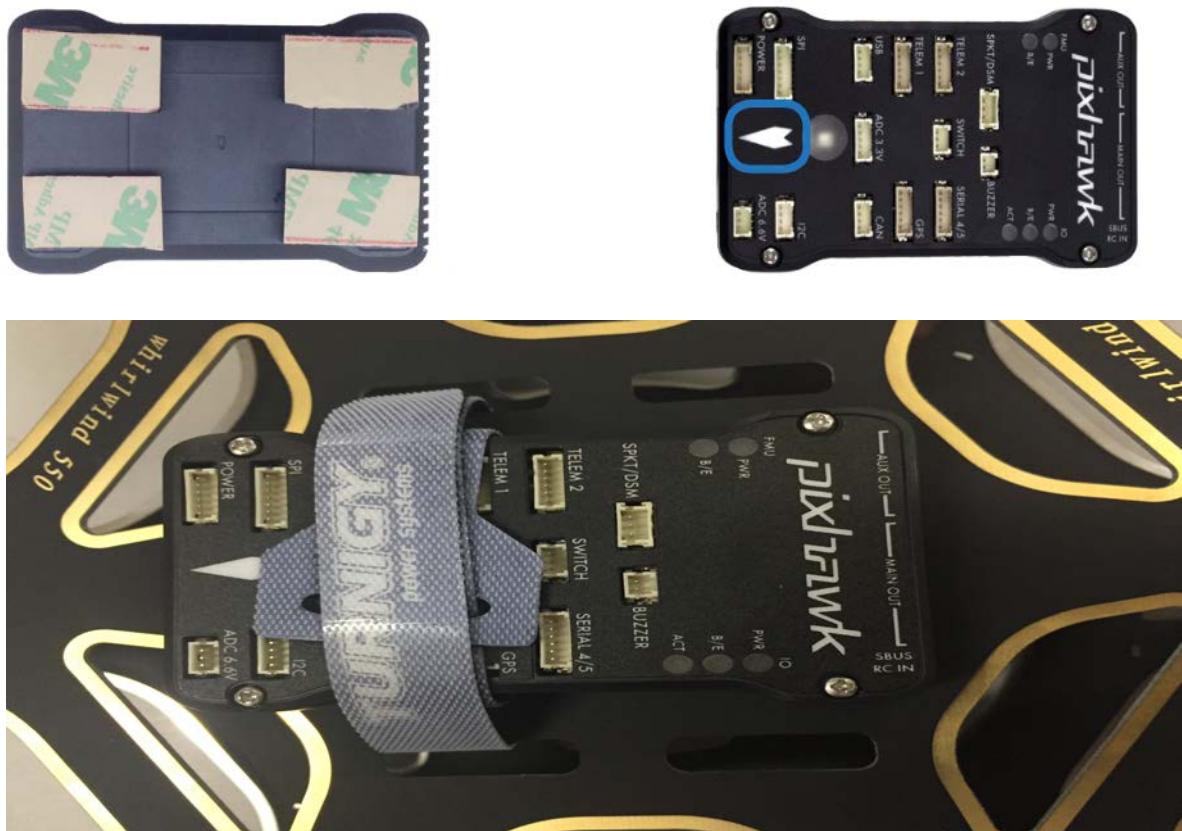


Figura 18 - Fixação da Pixhawk

Nesse momento será feita a conexão da PMU a controladora central por meio de dois fios: um de quatro vias que vai conectado na porta LED e um conector de três vias que vai conectar na porta X3, que vai alimentar a controladora central com a carga recebido da PMU pela bateria.

Irá ser feito agora a fixação do suporte da antena do GPS. A antena do GPS fica em um suporte específico para que o magnetismo dos imãs dos motores não afetem a bússola que fica dentro da antena do GPS. Observe que existe uma seta na antena do GPS que deve ser apontada para a frente do multicóptero. Por fim será colocado no frame do hexacóptero a PMU e o receptor que é responsável por fazer a comunicação entre o controle remoto e a controladora central. O fio do receptor será conectado na controladora central na porta X2. Por fim, iremos colocar a bateria. Observe que esse é um ponto importante, pois a bateria é o grande responsável por parte do peso do drone. Nesse sentido, optou-se por colocar a bateria na parte mais inferior do hexacóptero para gerar mais estabilidade de voo e para a facilidade de remoção no momento de um novo carregamento. A alocação das hélices nos rotores será feita posteriormente após a configuração e calibração da controladora central por uma questão de segurança já que pode acontecer que durante a fase de calibração da controladora os motores passem a atuar e caso as hélices estejam alocadas pode vir a ser perigoso.

Por fim, a montagem geral da estrutura, a alocação das placas juntamente com os braços do multicóptero além da alocação do trem de pouso, item indispensável de segurança para proteção de toda a estrutura do drone.



Figura 19 - Fixação do Trem de Pouso

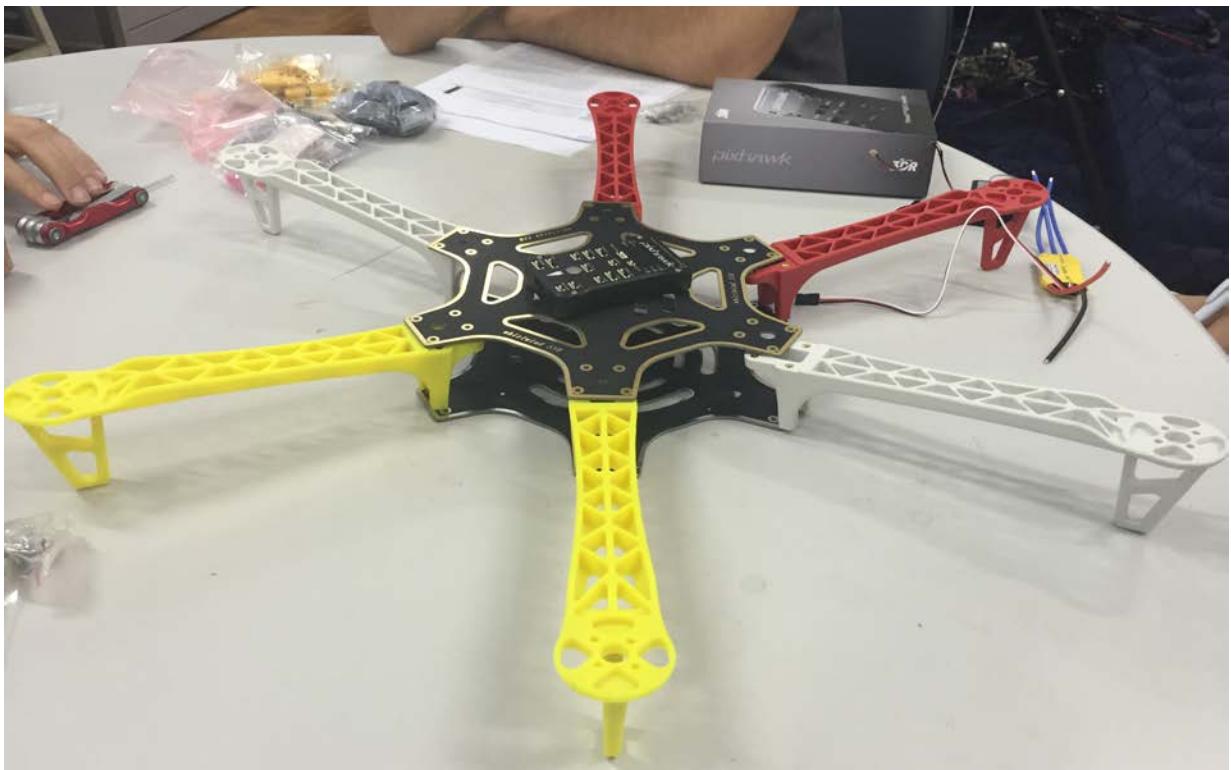


Figura 20 - Alocação dos braços nas placas condutoras



Figura 21 - Acoplamento da hélice no motor

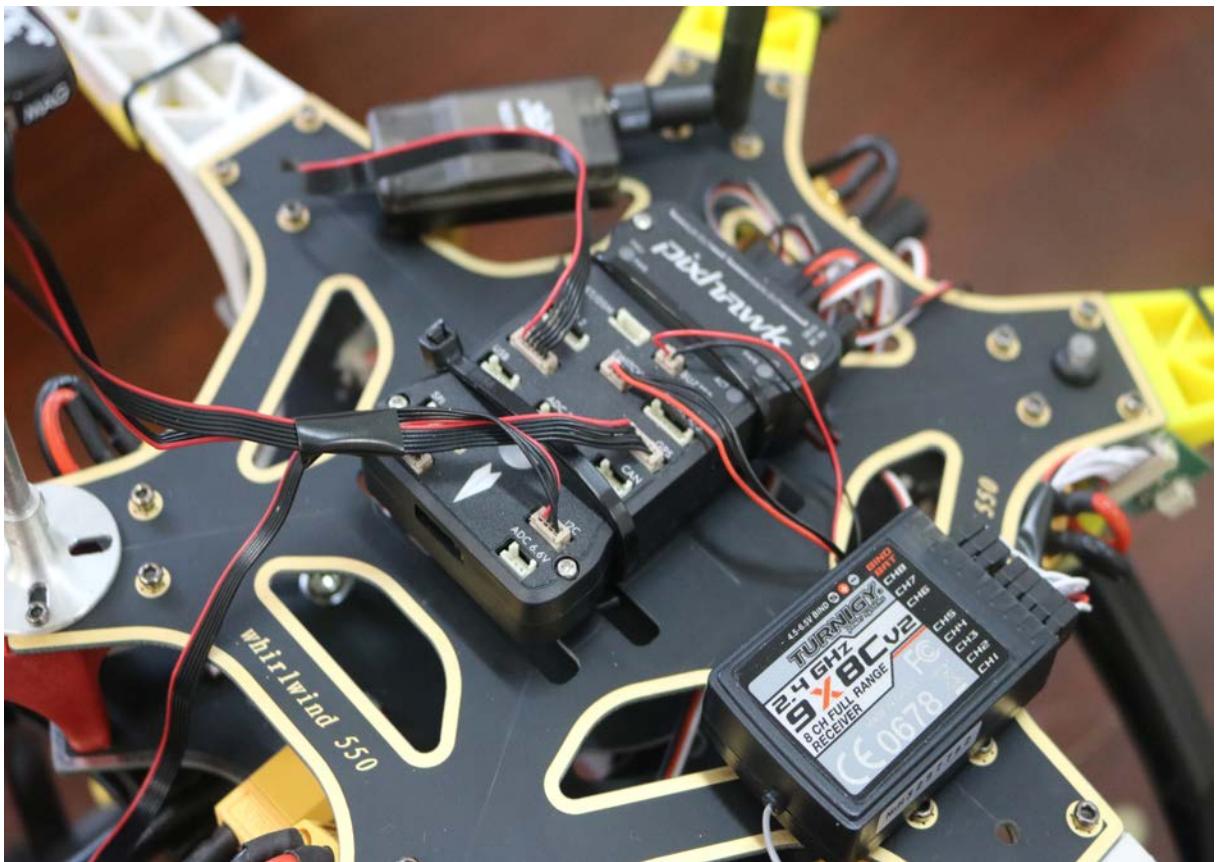


Figura 22 - Parte superior do hexacóptero montado



Figura 23 - Fixação da Bateria



Figura 24 - Fixação do ESC

2.3. Configuração do Autopiloto

Serão seguidos quatro passos básicos para a configuração da Pixhawk: montagem, conexão, carregamento do firmware e calibração. Após a montagem de toda a parte estrutural do hexacóptero, é chegado o momento em que será realizado a configuração de cada canal do controle remoto. A controladora central será conectada em um computador e será utilizado o software específico da controladora. No caso desse projeto será utilizado o software da Autopilot Pixhawk. A conexão será por meio de um cabo USB na PMU que fará a conexão com os dois dispositivos.

Feito essa conexão da controladora no computador, será utilizado agora o software específico da controladora Autopilot Pixhawk. Para tal, será necessário o download no site do fabricante no computador onde será realizado a sua configuração. No software é possível configurar a controladora central para diferentes tipos de multicópteros em diferentes configurações. Nesse projeto em específico foi utilizado a configuração para seis rotores.

Faremos agora o carregamento do firmware que é o cérebro da controladora central e deve ser instalado antes de usar Pixhawk. Para carregar firmware para Pixhawk, deve-se instalar um aplicativo planejador de missão em seu computador que será a estação terrestre. Escolha qualquer Planner Mission (Windows) ou APM Planner para (Windows, OS X, e Linux).



Figura 25 - Carregamento do Firmware da Pixhawk

Observe que nesse momento será configurado que tipo de veículo está sendo trabalhado no projeto. No caso desse estudo temos um multicóptero de 6 rotores.



Download Mission Planner (Windows)

Ardupilot.com → Downloads → Mission Planner

Mission Planner « Downloads

Sort by: Title | Hits | Date

- [MissionPlanner - Installer](#)

Select the installer package to download.



Download APM Planner (Windows, OS X, and Linux)

Ardupilot.com → Downloads → APM Planner 2.0

APM Planner 2.0 « Downloads

Sort by: Title | Hits | Date

- [APM Planner 2.0 Mac](#)
- [APM Planner 2.0 Windows](#)
- [APM Planner 2.0 Linux](#)

Select your platform to download.

Figura 26 - Softwares da Pixhawk para diferentes plataformas

Depois de selecionar o arquivo correto, leia as informações de segurança e selecione Download. Abra o arquivo para executar o assistente de configuração. Continue com todos os avisos de segurança e instale todos os *drivers* sugeridos. Quando a instalação for concluída, abra o aplicativo e conectar Pixhawk para o seu computador utilizando o cabo micro-USB. O computador irá instalar automaticamente os drivers corretos. Não selecione Connect neste momento; Pixhawk só pode carregar o firmware enquanto não ligado à Mavlink.



Figura 27 - Instalação do firmware

Quando solicitado, siga as instruções para carregar o firmware. Uma vez que a barra de status mostra que o download foi concluído, desligue e religue a controladora por desconectar e reconectar o USB. Se você ouvir um tom musical, a instalação do firmware está concluída. Se você ouvir uma série de tons seguido por três sinais sonoros, desligue o cabo USB e volte a ligar enquanto mantém pressionado o botão de segurança. Após o reinício, você deve ouvir uma série de tons seguido por dois bips indicando que o firmware foi carregado com êxito.

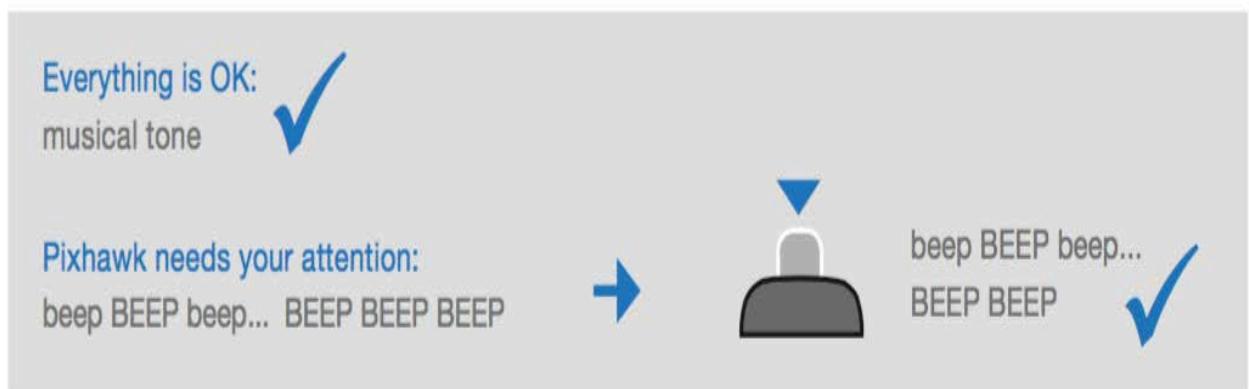


Figura 28 - Verificação do carregamento do firmware

Após realizado o carregamento do Firmware, será realizada a calibração do hexacóptero. Com Pixhawk conectada ao computador, selecione a opção de comunicação a partir do menu para PX4 FMU, definir a taxa de 115200, e selecione o ícone *Connect*. Selecione *Initial Setup* e *Mandatory Hardware* para acessar os assistentes de calibração.



Figura 29 - Início da Calibração

Por questão de segurança, verifique novamente se as hélices não estão alocados nos rotores. Para a calibração, observe as figuras a seguir que mostram o passo a passo de configuração que será a seleção do tipo de frame do multicóptero, as calibrações da bússola, acelerômetro, do rádio e por fim seleção dos modos de voo.

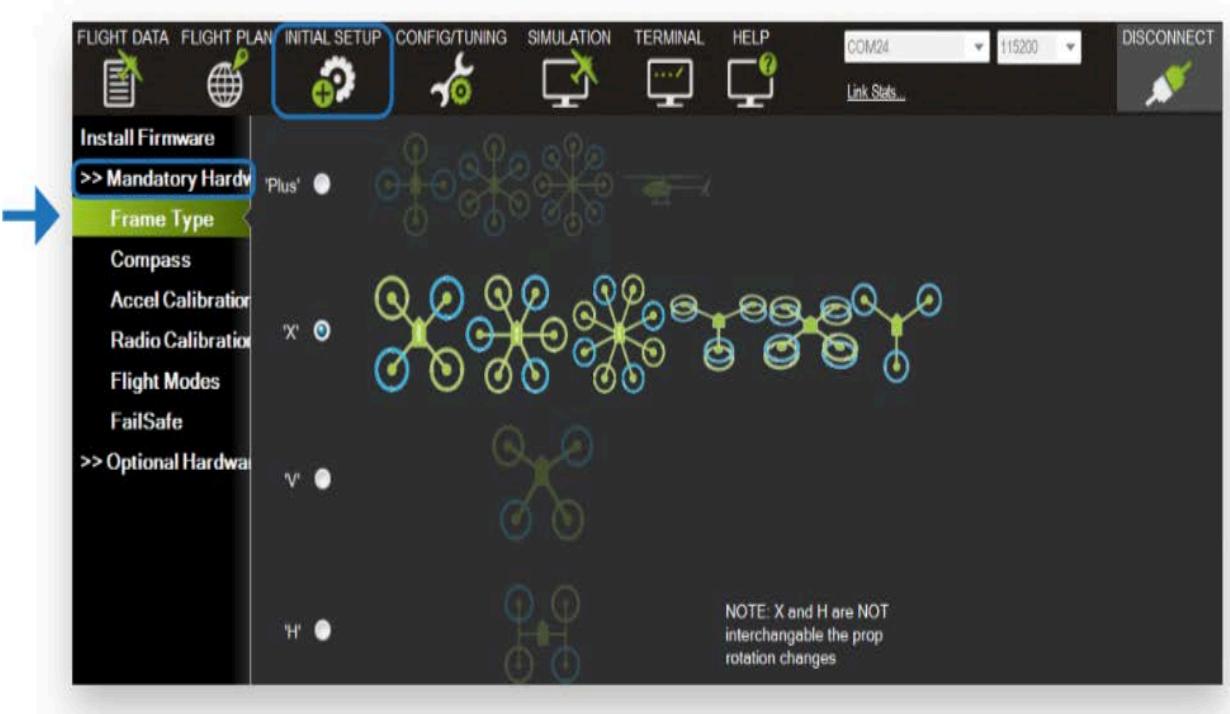


Figura 30 - Calibração do Tipo de Frame

Deve-se selecionar as opções para ativar a bússola; para permitir o cálculo automático de declinação; e para especificar Pixhawk. Selecione Calibração Live para iniciar o assistente e siga as instruções.

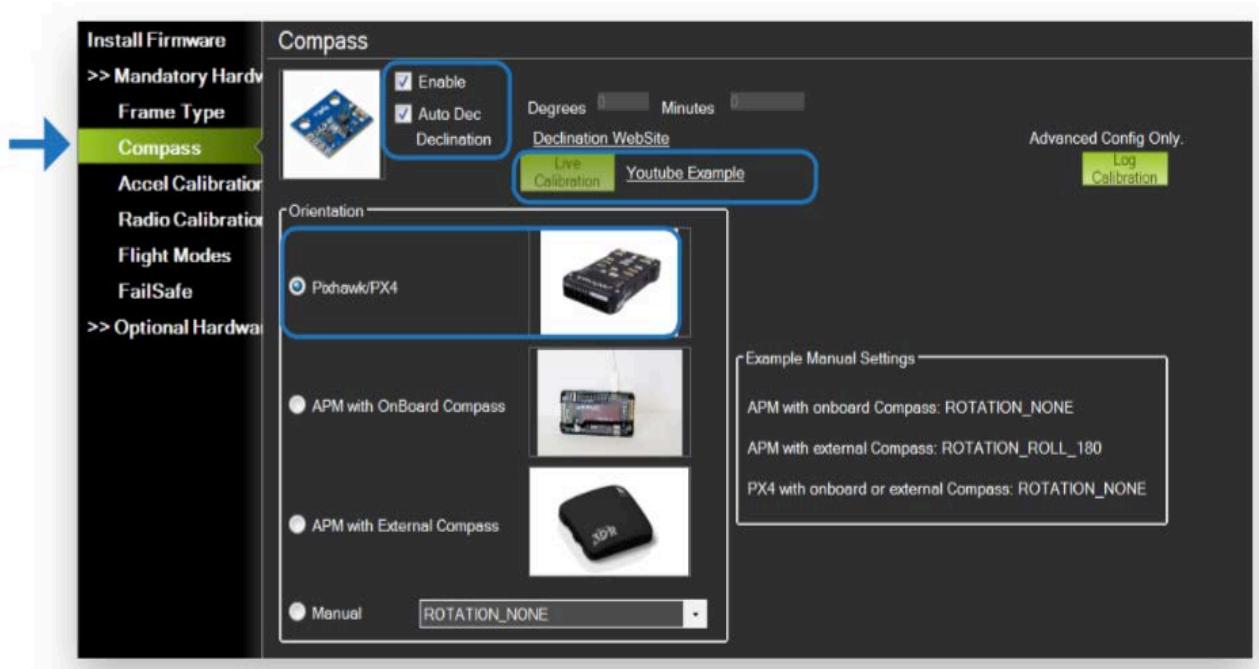


Figura 31 - Calibração da Bússola

Após a calibração da bússola, será feito a calibração do acelerômetro. Marque a caixa para AC 3.0+, selecione Calibrar e siga as instruções para calibrar o acelerômetro do Pixhawk. Certifique-se de esperar alguns segundos antes e depois de mudar as posições do veículo.

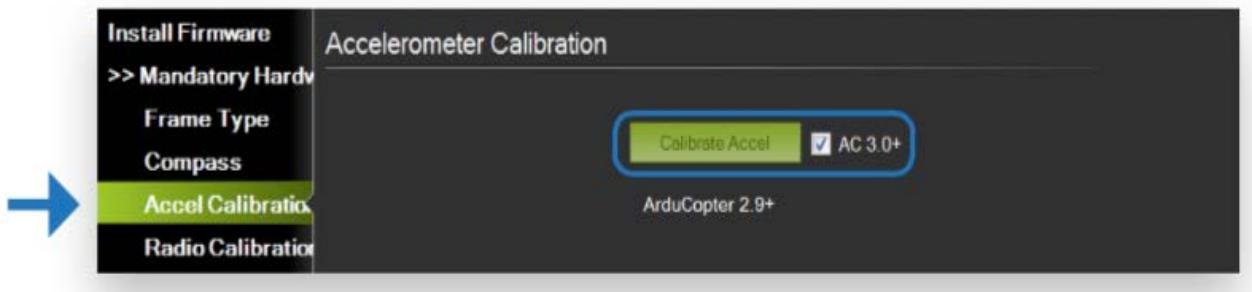


Figura 32 - Calibração do Acelerômetro

Selecione Calibração de rádio para configurar a Pixhawk para trabalhar com seu transmissor RC. Ligue o transmissor, selecione Calibrar Radio, e movimente todas as sticks e switches para as suas posições extremas. Selecione *click when done* uma vez as barras vermelhas estão sendo mostradas para todos os canais disponíveis.



Figura 33 - Calibração do Rádio

Posteriormente, move cada chave em seu transmissor para suas posições disponíveis. O *mission planner* indicará a posição selecionada no momento com um realce verde. Selecione um modo para cada posição da chave, e selecione *save modes*.

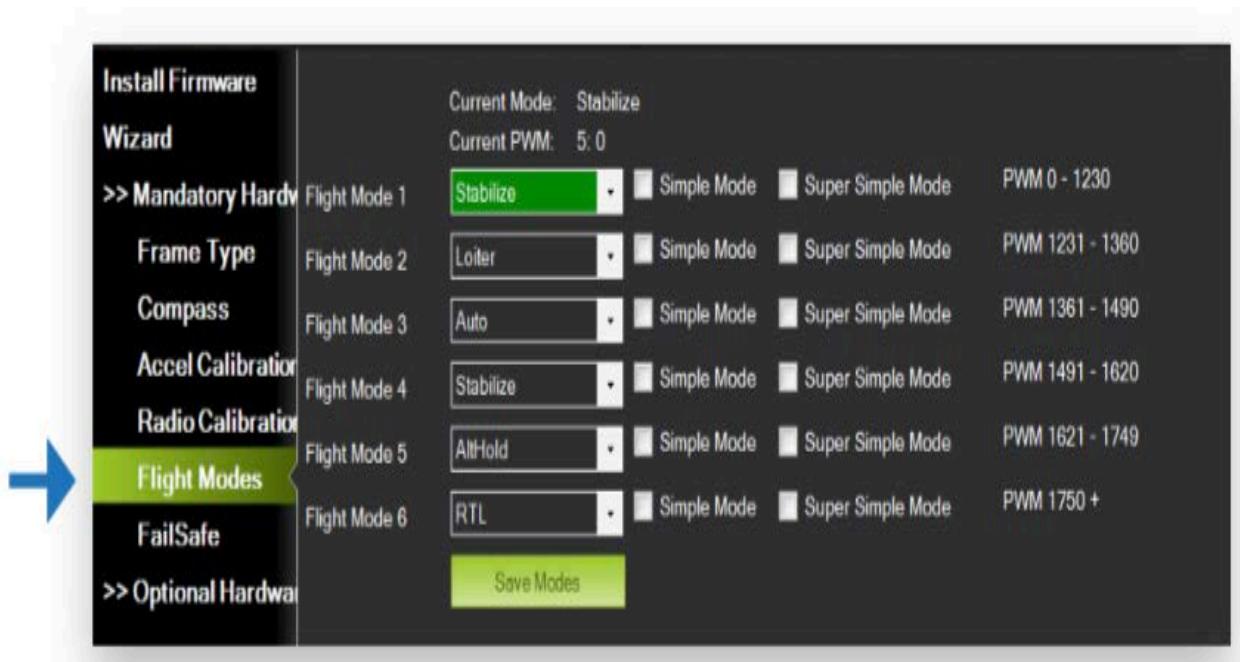


Figura 34 - Escolha dos Modos de Voo

Note que estas instruções descrevem a configuração básica para Pixhawk e não representam o conjunto completo de procedimentos de configuração necessárias para construir um helicóptero, avião ou qualquer outra aeronave. Para obter mais informações sobre a calibração ESC, monitorização da bateria, failsafes, a descrição dos modos, e mais, o mais indicado é verificar o site da ardupilot e obter as informações desejadas. A montagem do hexacóptero foi feito de forma minuciosa e seguindo todas as instruções do manual da controladora, sempre priorizando a segurança de projeto.

Após realizada a calibração e configuração de todos os dispositivos da controladora central, o multicóptero está pronto para a fase de testes de voo e posteriormente sua aplicação para monitoramento de áreas de construção civil. Somente após a realização de todas as etapas de montagem e calibração é que se deve fazer a alocação das hélices. Feito isso, o hexacóptero da equipe ITACopter 1 está pronto para a fase de testes de voo.



Figura 35 - Hexacóptero ITACopter 1 montado

2.4. Testes de Voo

Foi realizado anteriormente a montagem estrutural, calibração e validação de todos os dispositivos necessário para a realização do voo do multicóptero do projeto. Nessa fase de projeto é possível a realização dos primeiros testes reais de controle do hexacóptero. Inicialmente foram realizados testes em solo sem as hélices para verificação de funcionamento dos rotores e sentido de rotação correto para cada um. A plataforma de testes com restrição de graus de liberdade proporcionou a segurança do correto funcionamento do veículo para os comandos realizados no controle de rádio. Foi possível realizar o teste da controladora central e o funcionamento de todos os dispositivos atrelados à ela. Verificou-se os graus de movimento do drone e se o envio de comandos do controle remoto para o veículo estavam sendo feitos de maneira adequada.

Inicialmente, verificou-se uma sensibilidade extrema dos comandos de voo. Pequenos movimento no controle de rádio geravam grande movimentos no hexacóptero. Tal comportamento foi reparado, após realização de uma calibração feito de maneira mais cautelosa. Posteriormente, os testes de voo foram realizados em ambientes abertos e seguros para verificar o real funcionamento do hexacóptero em um ambiente fora de laboratório, onde condições reais de voo tais como pressão, temperatura, solo, umidade e velocidade do vento pudessem influenciar no comportamento do multicóptero ou até comprometer a estabilidade e forma de manobrar quando realizando o voo.

Os testes de voo real demonstraram a proximidade com o que era esperado para tal situação. A estrutura desenvolvida suportou os impactos realizados no pouso e quedas, demonstrando assim o seu correto dimensionamento. O trem de pouso certamente teve um papel decisivo para a proteção de todo o equipamento utilizado na parte de controle das funções do hexacóptero. Variações externas como ventos e turbulências com a proximidade do solo foram fatores desafiadores para o controle do veículo. A aeronave apresentou estabilidade considerável nessas situações o que demonstrou a qualidade do projeto com um todo e ainda a experiência de voo de veículos não tripulados por parte do piloto do projeto. mas ainda foi possível o controle por meio do controle remoto. A autonomia do veículo encontrada em testes de voo foi similar aquela esperada no início de projeto para o caso das baterias descritas nesse estudo que foi por volta de dez minutos, número totalmente satisfatório pensando no tipo de aplicação para que ele será utilizado futuramente.



Figura 36 - Preparativos para Teste de Voo



Figura 37 - Hexacóptero decolando em Teste de Voo



Figura 38 - Equipe Responsável pela realização do 1º Teste de Voo

3. Aplicações

Serão descritos todos os principais campos de atuação dos multicópteros na sociedade moderna. Além disso, será dado foco na aplicação de monitoramento de áreas de construção civil. Por fim, será feito o estudo do caso que trata-se da aplicação do hexacóptero do projeto na área de contrução no novo prédio de Ciências Fundamentais do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA).

3.1. Campos de Atuação

Os multicópteros estão sendo utilizados para as mais diversas aplicações nos dias de hoje. É possível citar uma centena dessas aplicações que certamente estão tornando as distâncias ainda menores no mundo atual. Além do mais, está existindo uma valorização do fator humano com a utilização dessa tecnologia, já que o trabalho que no passado era realizado por uma pessoa com uma baixa segurança de operação, muitas vezes colocando em risco a vida desses profissionais, passa a ser realizado por dispositivos mecatrônicos de baixo custo. Por exemplo, em estruturas altas onde pessoas não poderiam acessar, os VANTS são bastante recomendados nesse tipo de aplicação. A segurança é um fator de grande importância nesse caso, já que o mapeamento remoto e a possibilidade de inspeção remota evita a necessidade de funcionários acessar locais perigosos de uma obra. Visto isso, um dos assuntos mais debatidos na área da robótica é o uso de drones em projetos de Engenharia. Dentre as vantagens oferecidas estão o mapeamento da área onde o projeto será realizado, avaliação de viabilidade e geração de pré-projetos, acompanhamento da evolução da obra com documentação fotográfica, entre outras tarefas.

Pode-se utilizar os drones para realizar inspeções. Além de câmeras fotográficas e de vídeo em alta resolução, eles podem utilizar outros sensores de captação de informação. Um deles seria, por exemplo, um sensor termal. O sensor termal poderia ser utilizado na inspeção de equipamentos e estruturas. Caso o operador detecte pontos com excesso de calor, ele pode tomar uma ação corretiva para sanar algum possível defeito da estrutura ou do equipamento utilizado. A economia de tempo, dinheiro e a maior segurança para os funcionários também

são questões importantes para esse mercado. Trabalhos que levariam semanas para um equipe de profissionais especializados em determinada tarefa, dependendo do grau de detalhamento, um drone pode sobrevoar e realizá-la em horas. Tem-se ainda que para garantir o fornecimento de eletricidade, gás e petróleo, inspeções regulares das instalações são obrigatórias. Devido aos seus tamanhos e estruturas, eles são muitas vezes inspecionados a partir do ar. Em vez de contratar uma empresa externa, as inspeções podem ser efetuadas com um veículo aéreo não tripulado. Usando a função de navegação automática que está inserida em alguns tipos de multicópteros, pode-se inspecionar uma instalação relevante de forma autônoma, sem a necessidade de instruções de navegação a partir de um piloto. O resultado é uma inspeção rápida e completa. É até mesmo possível inspecionar linhas de alta tensão e as turbinas eólicas. Alguns drones tem um sistema eletrônico que pode suportar tensão até 380kV e não são afetados por campos magnéticos.

Temos ainda a utilização de tais dispositivos em operações de busca e salvamento onde cada segundo é precioso. De modo a funcionar de forma tão eficiente quanto possível, é importante ser capaz de obter uma rápida solução do problema e muitas vezes apenas possível a partir do céu. Enquanto aviões e helicópteros exigir algum tempo para estar pronto para a implantação, um multicóptero pode ser colocado em ação imediatamente, sem perda de tempo. Sua estrutura leve e forte, muitas vezes feito de fibra de carbono, permite aos drones para operar com sucesso sob condições de teste tais como chuva ou neve e em temperaturas extremas, como no caso de incêndios. Com a transferência de dados para o computador da estação terrestre ocorrendo em tempo real, não é mais necessário para os bombeiros ou outro pessoal de apoio entrar na zona de perigo, a fim de analisar a situação. Os drone agora podem cumprir esse papel. Todo e qualquer tipo de dispositivo pode ser instalado para operar nos multicópteros. Por exemplo, pode ser utilizado um dispositivo de medição de gás para comunicar as equipas de combate a incêndios sobre um possível incêndio. Uma câmera de imagem térmica pode ajudar em buscas de pessoas desaparecidas, através da identificação de pessoas em florestas, campos, etc.

No mundo de hoje, a segurança civil é de grande importância. A proteção das pessoas contra ameaças como ataques terroristas e na identificação de crimes, apoio aéreo adequado pode ser uma vantagem decisiva. O helicóptero pode ser uma importante fonte de apoio às equipas no terreno. No entanto, como uma forma de apoio aéreo eles são caros e podem levar algum tempo para estar pronto para o compromisso. Os drones são uma alternativa mais rápida rentável e tão bem sucedido. Uma vantagem particular dos multicópteros é a facilidade

com que eles podem ser usados. Leva apenas um curto período de tempo para aprender a dirigir esses dispositivos, economizando em programas de treinamento de alto custo. Além disso, um drone pode ser instantaneamente ativado para agir, permitindo o apoio aéreo imediato. Usando várias cargas úteis, eles podem ser utilizados em qualquer situação. Por exemplo, com um dispositivo para gravação detalhada da cena de um acidente de trânsito pode ser feita, o que simplifica a elaboração do relatório de acidente.

Em situações como grandes encontros ou protestos, onde o monitoramento por muitas vezes é difícil devido a complexidade de manter uma visão geral de todos, os drones podem ser um instrumento bastante útil permitindo que a situação possa ser vista do alto. Uma série desvantagem de helicópteros e aviões de vigilância no trabalho é o alto nível de ruído que eles emitem. Os motores elétricos altamente eficientes e pequenos desenvolvidos especialmente para os multicópteros ou aeromodelos permitem a vigilância discreta e quase silenciosa. O software da controladora do drone permite a transferência quase instantânea de dados para o computador base, de modo que a operação de vigilância pode ser coordenado em tempo real. É comum os drones possuírem cores especiais para esse tipo de aplicação, favorecendo a camuflagem de acordo com o terreno e minimizando o risco de ser avistado. Juntamente com as câmeras de vídeo convencionais, existe a possibilidade de utilizar uma câmara de carga térmica, de modo que quaisquer seres vivos, por exemplo, podem ser mais facilmente detectados no escuro ou na vegetação densa.

Com relação a monitoramento por fotografia, graças à tecnologia *GPS-Position-Hold*, é possível a obtenção por meio dos drones de imagens nítidas mesmo com ventos fortes. A câmera pode ser configurada de forma otimizada para o objetivo de alcançar o melhor resultado possível. Em geral, para se garantir a melhor qualidade de imagem possível, é comum que sejam usados nos multicópteros apenas as câmeras single-lens reflex de fabricantes estabelecidos. Obviamente, quaisquer outras câmeras realizaram o monitoramento de forma equivalentemente adequada. Estendendo um pouco essa aplicação, é possível criar filmes e vídeos profissionalmente e com baixo custo. Neste contexto, o drone é uma alternativa excelente a um helicóptero ou avião. Com sua estrutura de fibra de carbono, esses veículos aéreos pode ser utilizados em condições climáticas extremas, como no deserto ou uma floresta. Com dispositivos de gravação de vídeos de alta eficiência é possível fazer longas gravações, com a duração do vídeo, dependendo, principalmente, na capacidade de armazenamento da câmera. Zonas de mapeamento são uma parte importante de Sistemas de Informação Geográfica, e podem ser simplificadas, principalmente, pelo uso de drones. Em

comparação com aeronaves convencionais, utilizando um multicóptero pode realizar tais tarefas de mapeamento de forma mais fácil e eficiente. Usando uma determinado comando, o caminho de voo sobre uma área específica podem ser gerados automaticamente. Também é possível exportar a rota para o Google Earth para obter uma melhor visão geral do percurso. Usando um scanner a laser, áreas inteiras podem ser capturados rapidamente e facilmente e posteriormente processadas no computador.

Por fim uma aplicação realmente importante dos drones é para o transporte de carga. Engenheiros de aeronaves e especialistas em logística estão focando na construção doe dispositivos para realizar entregas de encomendas em todo o mundo. Espera-se um futuro com transporte seguro, rápido e sustentável. Hoje alguns drone já são utilizados na entrega de medicamentos de urgência e outros bens em áreas de difícil acesso, tais como nas montanhas ou sobre o mar ou acima de rios e lagos. Atualmente tem havido um contínuo investimento em novos trabalhos de investigação e desenvolvimento de novas tecnologias de carga não tripulados e métodos para melhorar a logística. Especialmente em grandes cidades como São Paulo, Nova York ou Tóquio, esse tipo de tecnologia terá oportunidade no futuro de abrir mais camadas para a mobilidade, bem como para a logística.



Figura 39 - Aplicação agrícola de drones



Figura 40 - Amazon utilizando drones para entregas



Figura 41 - Drone sendo utilizado para entrega de pizza



Figura 42 - Uso militar dos drones

3.2. Monitoramento na Construção Civil

Uma das aplicações de multicópteros que está sendo cada vez mais valorizada é a de monitoramento de áreas de construção civil. Grandes empresas dessa área em específico estão contratando esse tipo de serviço especializado para ajudar de maneira rentável a monitorar todas as fases de suas atividades de construção, de preparação do local e até a conclusão do projeto de engenharia. Os drones são fáceis de gerenciar, portáteis e flexíveis. Todas essas características permitem esses aparatos mecatrônicos a chegar rapidamente às áreas de construção de forma bastante eficiente e segura de modo a monitorar qualquer tipo de atividade no sítio de construção. Esses VANT's podem com segurança imediatamente transmitir fotografias de alta resolução e vídeos para a equipe de gerenciamento de construção, que podem realizar uma tomada de decisão de projeto ou mesmo averiguar alguma tipo de irregularidade. Este processo de custo e economia de tempo precisa permite que a equipe a avaliar, sob demanda, todos os aspectos do processo de construção e tomar quaisquer decisões ou ações adequadas no local. Com as imagens precisas e detalhadas transmitida por um pequeno multicóptero, os planejamentos para determinado projeto podem ser comparadas com a construção real, cada aspecto da construção e montagem pode ser inspecionado pelo controlo da qualidade e materiais podem ser monitorados e gerenciados. Além disso, mapeamento e tarefas de modelagem 3D pode ser realizadas de forma mais rápida e eficientemente executados bem como volumes de terraplanagem podem ser calculados de forma mais satisfatória.

Não existem informações específicas para a área de construção mas algumas dezenas de VANTS já foram adquiridos por diferentes empresas que prestam serviço para esta finalidade. O mercado para esse novo serviço está avançando. Sem dúvidas está crescendo e este crescimento tende a ser cada vez mais agressivo, por se tratar de uma tecnologia inovadora que traz inúmeros benefícios. Não há dúvidas que esta tecnologia se tornará uma das principais empregadas no mapeamento e monitoramento de obras na engenharia em um futuro não distante. A economia de tempo, dinheiro e a maior segurança para os funcionários também são questões importantes para o uso de multicópteros para tal aplicação. Pode-se citar como exemplo que enquanto uma equipe de engenheiros de uma grande obra poderia levar semanas para levantar uma área de 100 hectares, dependendo do grau de detalhamento, um drone pode sobrevoar esta área em menos de meia hora.

A segurança também é um outro ponto chave, o mapeamento remoto e a possibilidade de inspeção remota evita a necessidade de funcionários acessar locais perigosos de uma obra. Muitas vezes a documentação fotográfica aérea, mesmo em obras pequenas, era feita com aeronaves tripuladas ou helicópteros, o que aumentava o custo. Com os VANTs, os custos de campo tais como combustível e logística são reduzidos a valores desprezíveis. Não existe um levantamento preciso de quantos drones operam dentro da construção civil no mundo atualmente mas acredita-se no potencial do negócio e de uma regulamentação estruturada no futuro para uso de tal tecnologia. Algumas dezenas de VANTs já foram adquiridos por diferentes empresas que prestam esse tipo de serviço para outras empresas na área de construção civil. Esse tipo de mercado está avançando e este crescimento tende a ser cada vez mais agressivo, por se tratar de uma tecnologia inovadora que traz inúmeros benefícios. Não há dúvidas que esta tecnologia se tornará uma das principais empregadas no mapeamento e monitoramento de obras na engenharia.

Partindo dessas premissas, iniciou-se o projeto de um equipamento para filmagens e fotografias aéreas que pudesse ser controlado a distância por meio de um rádio controle e um link de vídeo e que ainda fosse de fácil transporte e operação. Primeiro foram definidas as restrições do projeto em termos de tamanho, capacidade de carga e autonomia de voo e preço. Baseado nisso, a configuração escolhida do equipamento foi um hexacóptero, por se tratar de um drone com mais autonomia para realizar manobras, além de aumentar a sua autonomia e estabilidade que são pré-requisitos para realizar esse tipo de filmagem. Além disso, a quantidade de carga que esse multicóptero pode transportar é maior se comparada a outras configurações, pelo motivo desse dispositivo em específico possuir seis rotores, o que difere da maioria dos projetos nessa área onde temos apenas quatro motores (quadricópteros).

O uso de veículos multirotore autônomos se dividem principalmente em usos internos (voos indoor) e voos em ambientes externos. Muitos dos trabalhos da atualidade procuram desenvolver pequenas aeronaves para uso interno e, por isso, usam câmeras e outros sensores para mapear o ambiente. Por meio destes dados eles conseguem estimar sua posição relativa ao ambiente. A proposta é o desenvolvimento de veículos pequenos, estáveis e com baixo custo, o que permitiria o uso das plataformas para o mercado de construção civil que possam ter uma aplicação em ambiente externo. Diferentemente dos trabalhos anteriores, a intenção do projeto da ITACopter 1 é a criação de um veículo desde o estágio inicial até a criação do protótipo e aplicação real que tenha a possibilidade em ambientes externos. Para isso, ele possui câmeras e GPS. Desta forma, pretende-se que o veículo seja capaz de ser adaptado a

todos os ambientes, com um foco maior em atividades em locais externos onde ele possui maior autonomia. O uso deste veículo pretende focar em monitoramento de todo tipo de área de construção civil.



Figura 43 - Monitoramento de construções por drones

3.3. Estudo do Caso

3.3.1. Proposta

Um grande problema nas construções civis atualmente é a necessidade de monitoramento para os mais diversos motivos. Muitas das obras mais tradicionais de nossa nação como pontes, escolas, hotéis, dentre outros está na necessidade de reabilitação ou manutenção, consequentemente, inspeções mais frequentes e detalhadas.

A infraestrutura inspeção de hoje é:

- Um processo intensivo de trabalho manual que envolve equipamentos caros e as condições de trabalho potencialmente perigosas;
- Não abrangentes - apenas alguns componentes são observados;
- Difícil de monitorar com precisão e comparar com o tempo.

É possível como em um canteiro de obras em que robôs aéreos controlados por computador de forma autônoma navegariam nos ambientes de trabalho interiores e exteriores da obra realizando uma inspeção visual com câmeras a bordo. Estes robôs podem medir o progresso da construção de obras de construção civil e fornecer dados detalhados e contínuas de desempenho sobre os trabalhadores e equipamentos. Os multicópteros já estão a sendo cada vez mais implantados em alguns locais de construção, mas a sua utilização é atualmente limitada a tirar fotografias e vídeos. Além disso, todos os drones agora podem ser utilizados em locais de construção para poder operar de forma autônoma somente necessitando do acesso aos dados de GPS; caso contrário, eles devem ser operados por pessoas. A equipe ITACopter 1 está desenvolvendo nesse projeto algo muito semelhante: um hexacóptero com uma câmera acoplada que possa otimizar a fiscalização, verificação e o progresso de canteiro de obras. Além disso estão prevendo o uso dessas câmeras para outras tarefas, tais como rastreamento da localização de trabalhadores e equipamentos e maximizar a precisão em interpretações de atividade para fins de monitoramento de desempenho.

A construção civil é uma indústria que move bilhões no Brasil e com uma grande participação no desenvolvimento do país. O monitoramento da construção melhora a eficiência ao caracterizar a medida em que os planos de construção estão sendo seguidas e em que medida os trabalhadores e equipamentos são totalmente utilizados. Os métodos atuais

demonstram ser muito caros e subjetivos, resultando em um monitoramento menos frequente do que é o ideal. Os métodos de coleta de dados atuais são tediosos, árduos e propensos a serem feitos apenas de forma intermitente. Muitas empresas acabam por ter dados de desempenho incompletos, e não é possível montar qualquer análise com base em tais avaliações.

A equipe ITACopter 1 está desenvolvendo trabalhos desta da seguinte forma: o hexacóptero irá tirar fotos e vídeos do local de construção, orientada por um plano de voo baseando nos aspectos importantes a serem observados naquele local. As atividades dos robôs aéreos são totalmente remotas, incluindo decolagem, navegação e pouso. As imagens e vídeos capturados são então usados para criar conclusões a respeito de possíveis problemas a serem corrigidos na área de construção. Uma vez que os dados são capturados e transferidos para um computador, é possível controlar os trabalhadores e o equipamento e definir as atividades de recursos. Essas imagens e vídeos também podem ser disponibilizados para profissionais da construção através de smartphones e tablets com a utilização de aplicativos específicos, permitindo-lhes tomar decisões de controlo eficazes dentro e fora do local mais rapidamente e facilmente. Certamente, a natureza versátil e simples do sistema em termos de recolha de dados e as análises de desempenho irá melhorar significativamente as práticas de monitoramento e controle em construção.

O resultado do uso de drones na construção civil será uma nova forma de aumentar a eficiência no local de trabalho, dando a rotina, as tarefas tediosas para os multicóptero, para que os profissionais de construção pode se concentrar em tarefas mais importantes de tomada de decisão para não provocar desvios de análise do desempenho da construção em análise. É necessário minimizar o tempo para acessar informações precisas desempenho e não é eficiente que profissionais da construção gastem tempo fazendo análises de como os procedimentos estão sendo executados no local de trabalho e sim se concentrar em como as atividades poderiam ser melhoradas.

O projeto ITACopter 1 consiste na montagem, teste e operação de um multicóptero constituído de seis rotores fixos e todos perpendiculares a um mesmo plano. Optou-se pela utilização de um drone de seis rotores devido a sua maior estabilidade de voo. Um multicóptero com mais rotores consegue suportar uma maior resistência de agentes externos como por exemplo rajadas de vento ou influências climáticas. Por ser tratar de um dispositivo para voos externos, já que foi projetado para realizar monitoramento de áreas de construção

civil, precisa ter uma maior resistência a todo tipo de adversidade que venha a existir no terreno que comprometa a forma como operar o multicóptero. Foram demonstrados nas seções anteriores todas a particularidades da montagem e operação (testes) do hexacóptero do projeto. Nesse momento será feito a aplicação do multicóptero para fins de monitoramento. Será feita a operação desse hexacóptero onde sua aplicação consiste na inspeção no andamento de obras de construção civil. O veículo do estudo carregará uma câmera GoPro Hero 3 apontada verticalmente para baixo, podendo ser levemente inclinada para uma obtenção de melhores imagens e vídeos da área. Com o intuito de demonstrar o sistema e testá-lo em um ambiente externo real de aplicação, será realizada uma inspeção do novo prédio da Divisão de Ciências Fundamentais do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Para a realização desse monitoramento, será seguido um plano de voo, baseando-se nas necessidades de testes pré-operação e particularidades para operar na área desejada.



Figura 44 - Primeiro e segundo prédio novo da Divisão de Ciências Fundamentais do ITA



Figure 45 - Terceiro Prédio novo da Divisão de Ciências Fundamentais do ITA

A principal motivação desse projeto é a inspeção das áreas de construção do novo prédio de Ciências Fundamentais do ITA. Para tal foram levantadas algumas aplicações que o hexacóptero poderia realizar naquela área. Segue algumas das principais que foram levantadas para a realização do projeto:

1. A aplicação de argamassa projetada é realizada nas regiões mais superiores da construção e por muitas vezes fica difícil ao engenheiro verificar se ele foi colocada de forma adequada pelo responsável por tal atividade;
2. Atividades da construção a serem realizadas em pontos que são de difícil acesso devido a altura como apertos de parafusos em ponto altos das estruturas principais do prédio por vezes necessitam de inspeção para verificação da realização do procedimento de forma adequada e segura;

3. Fiscalização de todos os operários se estão realizando o trabalho corretamente como planejado e orientado no projeto bem como a utilização de equipamentos de segurança (EPI) por parte de todos os envolvidos na construção;
4. Monitoramento de fatores de segurança como movimentação de pessoas desconhecidas dentro da obra ou verificação da realização de atividades de risco por algum indivíduo na obra, além de servir como um registro formal de monitoramento caso seja necessário devido a algum tipo de irregularidade ou atentado à obra de construção civil;
5. Estudos preliminares de reconhecimento de área onde o terreno ainda não foi preparado para início da construção propriamente dita;
6. Verificar a utilização correta do material de construção disposto no sítio de construção além de assegurar que não está havendo desperdício por quem está utilizando e trabalhando com os componentes utilizados na construção como pedras, cimento, madeira, vigas, etc;
7. Obtenção de imagens mais generalistas que possibilitem uma melhora da logística de movimento de pessoas e cargas na área de construção bem como a verificação dos horários onde devem ser observados melhores formas de realizar as tarefas de forma mais eficiente, como por exemplo horários de início e término de expediente, onde o movimento de pessoas e veículos se torna intenso nas dependências da área de construção e no próprio Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA);
8. Por fim, verificar a evolução da obra como um todo o que garante que a construção está sendo realizada de forma contínua e que está evoluindo como esperado no projeto de modo a cumprir os prazos pré-estabelecidos para término.

Pode-se levantar como principais vantagens dessa aplicação o auxílio dos profissionais responsáveis por coordenar o andamento das obras de construção no ITA. Certamente, o auxílio fornecido pelo multicóptero trará inúmeros benefícios de acordo com os objetivos traçados nesse tipo de aplicação. Uma das possíveis desvantagens do uso de tal dispositivo em obras de construção seja a possibilidade de danificação da obra caso ocorra algum acidente na área de voo devido a uma falha de operação do drone. Outra possibilidade seja o não levantamento preciso dos dados realizados pelo multicóptero que como consequência pode fazer o engenheiro responsável da obra tomar um decisão equivocada referente a algum questionamento na obra. Podemos citar por fim que o multicóptero venha a distrair os trabalhadores da obra o que pode atrasar o andamento dos procedimentos necessários para a conclusão do Prédio.

Existem alguns estudiosos que já estão pesquisando sobre o monitoramento de áreas de construção civil por meio de veículos multicópteros como um serviço que pode ser utilizado futuramente por empresas especializadas. Este cenário futurista da tecnologia está sem tornando realidade graças à investigação do professor Mani Golparvar-Fard e colaboradores Timothy Bretl, professor de Engenharia Aeroespacial, e Derek Hoiem, professor assistente de Ciência da Computação da Universidade de Illinois em Urbana-Champaign nos Estados Unidos. Golparvar-Fard e sua equipe de pesquisa está desenvolvendo quadricópteros que serão utilizados para automatizar totalmente a coleta de dados e a análise e comunicação de informações sobre o progresso no canteiro de obras. Um destaque seria que eles seriam totalmente automatizados e controlados por computador. Eles também desenvolveram uma maneira para que estes robôs para instalar câmeras automaticamente em pontos estratégicos do canteiro de obras. Eles estão prevendo o uso dessas câmeras para outras tarefas, tais como rastreamento da localização de trabalhadores e equipamentos e maximizar a precisão em interpretações de atividades para fins de monitoramento de desempenho.

3.3.2. Metodologia de Projeto

Para a realização do monitoramento da área de construção do ITA foi traçado um plano de voo para ser realizado no local de construção de modo a obter todas as informações importantes para os profissionais responsáveis pela obra. O plano de voo segue o seguinte modelo:

1. Fixação da câmera de monitoramento e testes operacionais de todos os dispositivos importantes para a realização do voo;
2. Decolagem do hexacóptero em um local afastado dos prédios principais de construção devido ao fator segurança, pois caso haja algum tipo de problema não venha a danificar o veículo multicóptero e a obra de construção;
3. Realização de decolagem vertical até uma altura segura de monitoramento (por volta de 50 m em relação ao solo). Foi utilizado uma altura próxima de 50 m baseado no alcance da câmera que melhor se adequaria a esse tipo de situação;
4. Aproximação dos perímetros externos das obras de construção de modo a sempre manter uma distância segura para que não ocorra nenhum tipo de acidente

aeronáutico. O voo não deve exceder 5 minutos após chegar ao local apropriado devido a autonomia da bateria ;

5. Realização de manobras mais complexas que exigirem um maior perícia de pilotagem dependendo do objetivo de monitoramento que será realizado no voo em específico;
6. Retorno a área inicial de decolagem para a realização do pouso de término de missão;
7. Visualização, processamento e interpretação das informações (fotos e vídeos) obtidos durante o voo experimental.

Seguindo o plano de voo descrito nessa sessão, todos os objetivos pré-estabelecidos no início de projeto serão cumpridos de forma a obter um melhor aproveitamento do veículo multicóptero. A metodologia utilizada para o comprimento dos objetivos do monitoramento das áreas de construção dos novos prédios do ITA foi formulada de acordo com os aspectos do veículo multicóptero do projeto sempre priorizando o fator segurança como aspecto mais importante em todos os momentos.

3.3.3. Procedimentos

Inicialmente foi necessário realizar o carregamento de todas as baterias do disponíveis no Laboratório de Robótica Aérea do ITA para o tempo de voo ser melhor aproveitado sem interrupções. Além disso a Câmera que será utilizado no projeto foi devidamente configurado e carregada para o grupo não ter problema de falta de um dispositivo para obter as imagens do projeto. Após os procedimentos iniciais citados, foi necessário a realização a verificação do ESC's no hexacóptero, já que nesse momento passaria a ser usado uma Bateria de 4S ou seja 14,8 V. Seria perigoso se o ESC's não pudesse aguentar a esse tipo de voltagem, mesmo que nas especificações do próprio dispositivo tem avisos alertado que ele suportaria baterias de 2S até 4S.

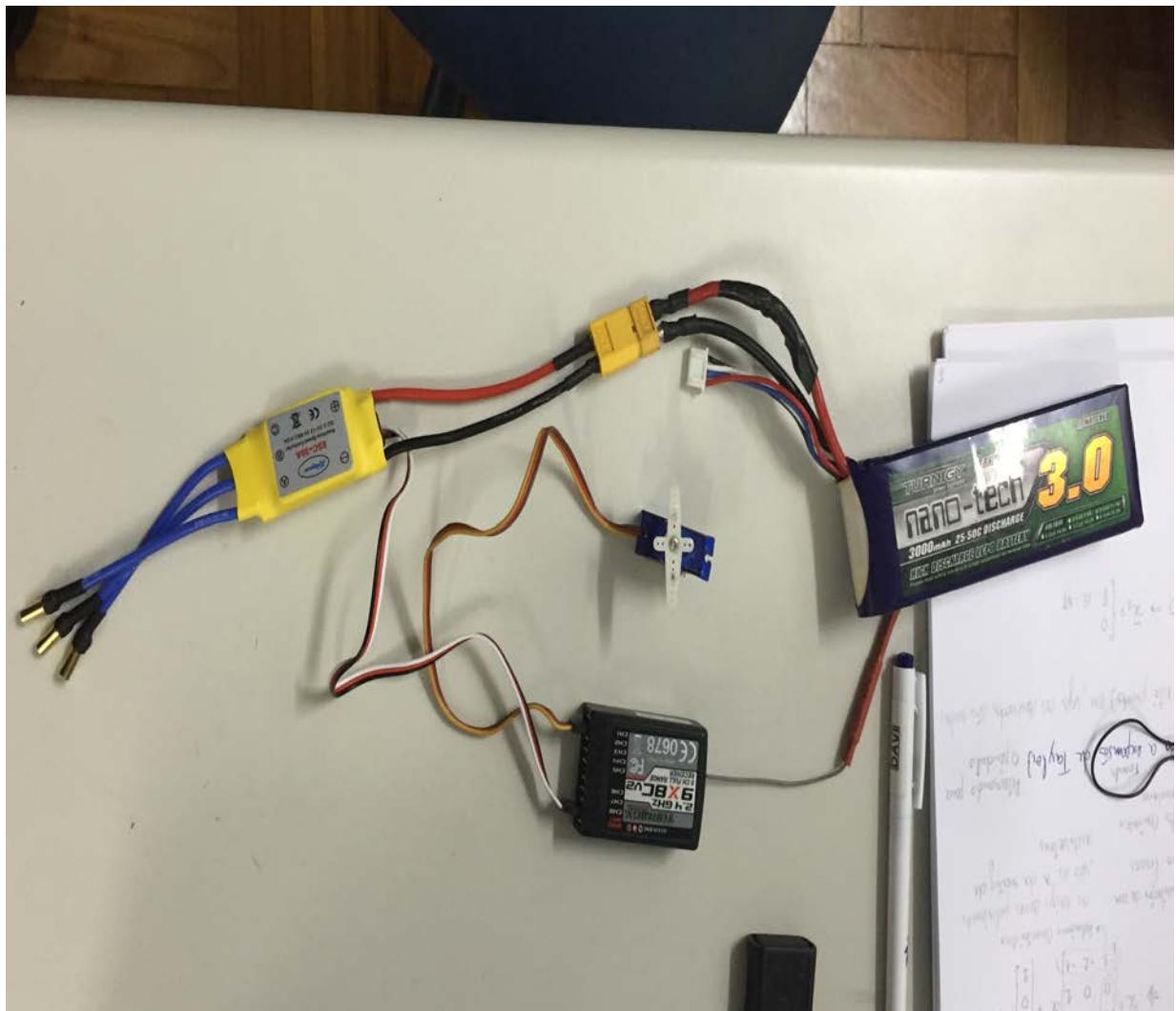


Figura 46 - Teste do ESC antes do voo

Como ele estaria operando em voltagem máxima, foi realizado o teste em um ESC's separado para verificar se haveria algum problema de segurança no projeto. O ESC's funcionou normalmente e todos os comandos foram realizados de forma satisfatória.



Figura 47 - Fixação da câmera GoPro no drone

Em seguida foi feita a calibração da telemetria por meio do APM Planner, que o dispositivo utilizado para configurar os canais e modos de voo do hexacóptero. Como seria realizado um voo externo, optou-se por configurar o modo de voo *Position Hold* que trata-se de um piloto automático que mantém o multicóptero em uma posição fixa quando acionado.

Esse modo de voo foi configurado no canal 5. Além disso colocou-se no modo de voo *Default* a configuração *Stabilizer* que dá ao multicóptero uma maior estabilidade em todos os momentos do voo. No escopo desse projeto foram utilizados apenas esse modos de voo de auxílio a pilotagem por se tratarem dos mais essências para esse tipo de aplicação. Entretanto, existem outros tipos de modo de voo que poderiam ser alocados no futuro como o *follow me*, onde o drone segue as coordenadas do piloto por meio de um GPS. Tem-se ainda a possibilidade de realização de pouso automático por meio de um sensor de altura configurado no multicóptero ou ainda o RTL que permite o drone retornar para um ponto pré-definido após realizar determinado movimento.

A partir desse momento foi feitos os testes preliminares para a verificação de todos os componentes do drone, bem como verificar o funcionamento e autonomia para poder ser traçado um plano de voo que fosse possível cumprir os objetivos nos quais o multicóptero foi projetado. O teste foi realizado em um local aberto nas dependências externas do ITA com um solo que fosse favorável caso o multicóptero viesse a sofrer algum acidente. O teste foi realizado com segurança e foi possível obter particularidades dos comandos de voo para aquela nova configuração de calibração bem como o uso da nova bateria. Houve um momento é que o multicóptero perdeu o sinal de GPS, possivelmente por uma falha de alimentação da bateria junta a controladora, de modo que o hexacóptero teve um pouso forçado. Entretanto, devido ao trem de pouso bastante reforçado e flexível, não houve danos a estrutura do drone.

Além disso, foram realizadas filmagens teste para a verificação da filmagem que viria a ser realizada em um ambiente real de monitoramento. Esses foram os últimos voos teste que foram realizados antes do voo na área de construção do ITA. Portanto, ele foi essencial para o piloto e todos os componentes da equipe para a prevenção de possíveis problemas que pudessem vir a acontecer em uma situação real realizando a atividade área, principalmente devido ao terreno que na área de construção terá um solo mais irregular além de mais obstáculos que devem ser contornados durante o voo para manter a integridade do multicóptero do projeto.

Após um levantamento de todas as possíveis aplicações do hexacóptero desse projeto para a área de construção no ITA, foi realizado o voo para a obtenção das imagens e vídeos para a realização dos objetivos citados anteriormente.



Figura 48 - Preparativos para último voo teste



Figura 49 - Teste com a câmera instalada

3.3.4. Resultados

O voo foi realizado satisfatoriamente de modo que foi possível obter uma visão geral da área de modo a cumprir uma grande parte dos objetivos que foram traçados em apenas alguns minutos de operação. Isso mostra quando eficaz é o uso de multicópteros nas áreas de construção civil e como isso deve ser cada vez mais desenvolvido em atividades futuras para a melhoria das operações necessárias nas áreas em estudo.

Uma das aplicações que seria de muita utilidade para engenheiros civis seria a utilização dos drones para realizar um levantamento topográfico que hoje realizados por meio da Estação Total ou Teodolito. Estação total é um instrumento eletrônico utilizado na medida de ângulos e distâncias. O teodolito é um instrumento de precisão óptico que mensura ângulos verticais e horizontais, aplicado em diversos setores como na navegação, na construção civil, na agricultura e na meteorologia.

A evolução dos instrumentos de medida de ângulos e distâncias trouxe como consequência o surgimento destes novos instrumentos. Em termos da Estação Total, que pode ser explicado como a junção do teodolito eletrônico digital com o distancímetro eletrônico montados num só bloco, que é muito mais comum nos dias atuais, seria possível substituí-la por um drone equipado com um dispositivo que pudesse realizar as mesmas funções topográficas. A estação total é capaz de inclusive armazenar os dados recolhidos e executar alguns cálculos mesmo em campo. É possível determinar ângulos e distâncias do instrumento até pontos a serem examinados. Com o auxílio de trigonometria, os ângulos e distâncias podem ser usados para calcular as coordenadas das posições atuais (X, Y e Z) dos pontos examinados, ou a posição do instrumento com relação a pontos conhecidos, em termos absolutos. Esse tipo de atividade seria feita de forma muito mais eficiente por um multicóptero que pudesse realizar o mapeamento de um terreno por exemplo e informar a quantidade em m^3 que foi deslocada em determinado momento. No caso do Teodolito, utilizado para calcular a área de um local, primeiramente o teodolito é posicionado no primeiro ponto, de forma que totalmente nivelado com o eixo de gravidade do local e que o 0° do movimento horizontal esteja direcionado a um ponto de referência no polo mais próximo. Depois, o segundo ponto, marcado com uma estaca ou outro ponto é mirado através do telescópio, e a angulação obtida é medida na horizontal e na vertical. Usando uma fita métrica, mede-se a distância entre os dois pontos. Segundo esse raciocínio, a distância e os

ângulos vertical e horizontal entre os outros pontos do local a ser estudado são medidos e a área pode ser calculada. O problema desse tipo de procedimento é que torna-se arcaico, custoso e demorado. O uso da tecnologia de veículo multicópteros pode fornecer informações mais precisas com relação a esse tipo de procedimento topográfico em um tempo muito menor, o que iria aumentar a eficiência das atividades de construção civil além de fornecer uma precisão maior dos dados de projeto. O funcionamento seria baseado em um levantamento completo do drone por meio de sensores para fazer a leitura topográfica do terreno. Após a leitura, seria realizada os cálculos necessários por meio de um software atrelado ao drone utilizando as informações obtidas no mapeamento para obter valores específicos do tipo de terreno analisado. Esse tipo de atividade seria uma evolução no modo de realizar mapeamento em todo tipo de área de construção e certamente traria melhorias consideráveis na qualidade das construções.



Figura 50 - Imagem obtida pelo hexacóptero (frontal baixa)



Figura 51 - Imagem obtida pelo hexacóptero (telhado)



Figura 52 - Imagem obtida pelo hexacóptero (visão geral da construção)



Figura 53 - Imagem obtida pelo hexacóptero (outro ângulo)

4. Conclusões

Em um visão mais geral, a construção de um multicóptero com uma configuração básica como a que foi apresentada nesse projeto mecatrônico apresenta baixo nível de complexidade. Qualquer indivíduo com conhecimentos mínimo de controle e estrutura consegue realizar a montagem e operação desse tipo de veículo. A existência de plataformas em código aberto tornaram o acesso a esse conhecimento muito mais acessível já que os códigos disponíveis podem ser aproveitados, pois já estão prontos e configurados com a ajuda de um software específico para cada fabricante. Elas apresentam uma grande vantagem quando se necessita de um novo equipamento com algumas características específicas e por isso se tornaram tão populares. Apesar da baixa complexidade na montagem, alguns cuidados devem ser observados quando se tratando de projeto de multicópteros. Os sensores são muito sensíveis a vibrações e por isso elas devem ser evitadas. Por esse motivo, a parte estrutural é muito importante em termos de projeto, já que é nesse momento que o engenheiro deve tomar a decisão pela melhor maneira de alocar os dispositivos do drone de modo a manter sua integrada. Montar a placa controladora do sistema sobre pequenos amortecedores (esponjas) é uma boa solução sua proteção. É necessário pensar ainda no balanceamento das hélices que é fundamental, pois as maiorias das hélices não vêm balanceadas de fábrica e usá-las desta forma, além de gerar muita vibração no conjunto, diminui a eficiência do sistema propulsor, consequentemente dificultando a atividade aérea. A falta de balanceamento acaba por diminuir a estabilidade de voo que se torna perigoso caso o multicóptero venha a sofrer algum tipo de acidente em operação. Além disso, a configuração correta dos dados da controladora no software foi uma etapa muito importante no projeto.

Foi desenvolvido no projeto ITACopter 1 um veículo com seis rotores cumprindo todos os passos de um projeto real de engenharia desde montagem, operação, testes e por fim a realização de aplicações, em especial, no monitoramento de áreas de construção civil. Esse projeto possibilitou ao final desenvolver uma aeronave inteiramente funcional que pode ser aplicado nas mais diversas situações. A aeronave foi criada especialmente para operar em ambientes abertos (o que não impede de ser operada em ambientes fechados também) e possui a capacidade de ser controlada remotamente através do rádio controle.

A estrutura da aeronave foi inteiramente pensada de acordo com o objetivo do projeto. Utilizou o frame F550, que é uma estrutura pronta, que foi montado e suas peças configuradas

levando em conta todo o escopo do projeto. Todas as peças envolvidas no projeto foram descritas de acordo com suas especificações e foram levantados comentários e questionamentos para cada parte de montagem do drone. Após isso foi exposto todos os passos de montagem do multicóptero. Foi explicitado todos os momentos e particulares que cabe ao engenheiro de estruturas considerar na montagem de um hexacóptero.

Em seguida, após as configurações de montagem estarem prontas, foi realizada a configuração, calibração e testes da controladora de modo a está de acordo com as especificações do ITACopter 1. Foi utilizado o software da autopilot, que é o driver específico da controla do projeto. Ele permite configurar todos os dispositivos atrelados a controladora, entre eles os acelerômetros, a bússola, o rádio controle e até os modos de voo.

Os testes finais de voo permitiram o fechamento desse projeto e a verificação de que o modelo de projeto do hexacóptero foi montado e configurado de forma satisfatória. Apesar de haver problemas de instabilidade devido a velocidade do vento, turbulência com a proximidade do solo ou outros fatores externos, o veículo se mostrou que é capaz de ser controlado por um operador sem experiência alguma em pilotagem, pois apresentou um controle adequado para efetuar suas aplicações.

Por fim, a parte das aplicações é a que se mostra como a parte mais interessante nesse tipo de projeto, pois é o momento que serão dados objetivos específicos ao multicóptero para um solucionar um problema, que é a intenção principal da engenharia. Foram descritos diversos tipos de aplicações das mais variadas formas e meios para os drones em estudo. Pode-se constatar que esse tipo de dispositivo certamente será muito bem utilizado no futuro para realizar atividades de monitoramento, fiscalização, transporte de carga e informações, etc.

No escopo desse trabalho foi traçado uma aplicação para a construção civil, mais especificamente para monitoramento das áreas das obras de construção, onde foi realizado um levantamento por meio de fotos e vídeos de um dos prédios que está sendo construído no Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Foram levantadas hipóteses juntamente com os engenheiros da obra e com uma equipe de engenheiros civis consultores sobre o que se deveria monitorar na obra a ser analisada no projeto. Foram apontados todos os pontos que seriam relevantes a serem observados para esse tipo de construção.

Por fim, foi realizado o voo sobre a área com o objetivo de cumprir todos ou grande parte das hipóteses que foram inicialmente propostas no projeto. Boa parte dos objetivos pré-estabelecidos para o voo foram realizados e o hexacóptero cumpriu seu papel como veículo de monitoração remota de forma totalmente satisfatória. O voo realiza não deve demais problemas com um autonomia de voo variando em cindo a seis minutos onde pode ser feito um levantamento inicial do que seria importante verificar na área de construção do Prédio de Ciências Fundamentais do Instituto Tecnológico de Aeronáutica e seus arredores.

O projeto deixou uma expectativa para que em projetos futuros outros tipos de aplicação sejam colocados em prática de modo a melhorar ainda mais o ramo da construção civil no país. Certamente, um projeto com essa extensão e impacto servirá de inspiração e motivação para que no futuro novos estudos e aprimoramentos na área da Robótica Aérea venham a ser realizados e cumpram seu papel de resolução de problemas e melhoraria de todos os tipos de atividades desempenhadas pelo homem na nossa sociedade.

O ITACopter 1 passa a ser uma grande herança para o Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) por se tratar de um projeto que acompanhou todos os passos de um multicóptero desde a sua concepção até a fase final de operação (aplicações). A construção detalhada e didática do projeto de um veículo com seis rotores permite o desenvolvimento de trabalhos futuros a partir dos conceitos e premissas que foram utilizada nesse trabalho. O projeto teve caráter altamente multidisciplinar e teve um acompanhamento de pessoas de diferentes níveis acadêmicos que trouxe uma troca de experiências sem precedentes para o Laboratório de Robótica Aérea do ITA. Além de gera um importante material de pesquisa e desenvolvimento para o ramo de robótica aérea entre os alunos da graduação, pós-graduação e professores, houve ainda o estímulo para que no futuro novos projetos de engenharia relacionados a multicópteros venham a ser desenvolvidos.



Figura 54 - Equipe no dia do voo no novo prédio de Ciências Fundamentais do ITA

Anexo A – Proposta Inicial do Projeto

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA
DIVISÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE MECATRÔNICA

Proposta de Projeto de um Hexacóptero

1. Orientadores

Prof. Davi Antônio dos Santos, davists@ita.br (IEM)
 Prof. Rafael Thiago Luiz Ferreira, rthiago@ita.br (IEM)
 Prof. Carlos Henrique Quartucci Forster, forster@ita.br (IEC)
 Eng. Ícaro Viana, icaroviana@yahoo.com.br (doutorando do PG-EAM)
 Eng. Marcos Máximo, maximo.marcos@gmail.com (mestrando do PG-EEC)
 Eng. Igor Acampora Prado, igoracampora@gmail.com (doutorando do PG-EAM)

2. Descrição

Propõe-se aqui o projeto de um hexacóptero para formação de engenheiros aptos a desenvolverem alguns dos subsistemas de um sistema de robótica aérea. O dispositivo a ser projetado deve ter as seguintes características básicas:

- Seis rotores com eixos colineares;
- Massa em torno de 1 kg;
- Diâmetro máximo de 0,5 m;
- Duração de voo de 7-10 min;
- Carga útil: câmera de vídeo, fixa à estrutura e com apontamento para baixo.

Visando contribuir tecnologicamente com a área de robótica aérea, o hexacóptero aqui proposto deverá ter, além das funcionalidades básicas dos multicópteros de mercado, a capacidade de realização de pouso automático num heliponto com cor e forma bem conhecidas, em ambiente interior, com o auxílio da câmera embarcada.

3. Subprojetos

O projeto será dividido em subprojetos. Cada subprojeto deverá ser executado majoritariamente de forma individual, para que o andamento de um não invabilize a conclusão de outro dentro do prazo de formatura dos alunos. Os subprojetos escolhidos são os seguintes.

a. Estrutura Ótima:

Trata-se do projeto de uma estrutura com geometria otimizada. A metodologia a ser seguida é constituída de quatro etapas. A primeira trata do levantamento de estruturas dos principais veículos multirotore comecializados atualmente. A segunda etapa refere-se ao desenho e análise estrutural de três estruturas comerciais que se destaque por sua simplicidade e leveza. A terceira etapa consiste na proposta de uma estrutura que seja qualitativamente melhor que as três analisadas na segunda etapa. Por fim, a quarta etapa consiste na otimização estrutural da estrutura proposta na terceira etapa.

b. Guiamento e Controle de Atitude:

Consiste no projeto e análise de uma estratégia de controle preditivo para guiamento autônomo, bem como no projeto e análise de uma lei de controle proporcional-derivativa saturada para controle de atitude. Em particular, a estratégia de guiamento se baseará em waypoints e levará em conta a existência de uma referência de velocidade de viagem entre os waypoints sucessivos. Levar-se em conta a existência de obstáculos e a estratégia deverá ter a funcionalidade de, explicitamente, evitar os obstáculos por meio de uma escolha adequada, em tempo de controle, do conjunto de restrições da posição do veículo. Numa etapa futura, essas estratégias de controle serão implementadas e testadas no piloto automático a ser desenvolvido no presente projeto (subprojeto d).

c. Localização por Imagens para Pouso Automático:

Consiste no projeto e análise de: i) um algoritmo de fusão (visão, inercial, ultrassom), para a estimativa da posição do hexacóptero relativamente à posição de um heliponto; ii) uma lei de guiamento (controle de posição) que realize o pouso automático de forma segura. Essa lei de guiamento deverá usar as estimativas de posição da parte i como variável de realimentação. A parte i deverá ser implementada num computador dedicado a tal.

d. Piloto Automático:

Consiste no projeto de um piloto automático (PA) baseado na placa Beaglebone Black. Esse PA será constituído de três placas montadas em sanduíche: uma placa beaglebone black para controle de atitude e posição e data handling; uma placa de sensores (girômetros, acelerômetros, magnetômetros, ultrassom e GPS); e uma placa beaglebone para fusão de dados de visão, INS e ultrassom para fins de estimativa de posição relativa a um heliponto.

e. Dimensionamento, Montagem e Teste em Voo:

Consiste no dimensionamento, montagem e teste em voo de um hexacóptero usando componentes comerciais de aeromodelismo elétrico. Esse equipamento deverá ter uma massa em trono de 1 kg, diâmetro máximo de 0,5 m e duração de voo de 7-10 min. Na medida em que os demais subprojetos produzirem subsistemas confiáveis para serem testados em voo, esses deverão substituir os correspondentes subsistemas comerciais do hexacóptero montado no subprojeto aqui descrito. Nesse processo, espera-se no futuro chegar a um hexacóptero que pode ser dito projetado por alunos do ITA!

4. Alunos participantes

A Tabela 1 lista os alunos participantes do projeto aqui proposto.

Tabela 1. Alunos participantes do projeto.

Aluno	Email	Turma	PIGM	Subprojeto
José Agnelo Bezerra	agnelo.bgs@gmail.com	MEC 15	Sim	b
Yuri Torres	yuritorres16@gmail.com	MEC 16		a
Rafael Leonardo de Sena	leonardosena92@gmail.com	AER 16		c
Roberto Brusnicki	rbrusnicki@gmail.com	ELE 16		d
				d
				e

5. Orçamento

A Tabela 2 apresenta os orçamentos dos componentes requeridos no projeto. Os componentes 1-12 serão utilizados na montagem de um hexacóptero baseado no autopiloto *open-source/open-hardware* APM 2.6 (subprojeto e). Os componentes 13-19 serão utilizados para a construção de um novo autopiloto de baixo custo a ser projetado (subprojeto d).

Tabela 2. Orçamentos.

Item	Descrição	Qt.	Valor	Empresa	Link de Compra
1	Estrutura de hexacóptero (475 g, diâm. 0,55 m)	1	R\$249,99	RC Parts	http://www.rcparts.com.br/produto/Estrutura-%28Frame%29-Tarot--FY550-Hexacoptero-Aircraft-Rack-%252d-Pe%E7as-para-Modelismo.html
2	Par de hélices 10x4.5" Preta	5	R\$99,95	RC Parts	http://www.rcparts.com.br/produto/Par-de-Blade-H%E9lices-Propeller-10x4.5%22-para-Drone%2C-Multi%252dRotor%2C-Quadcoptero-%252d-Pe%E7as-para-Modelismo.html
3	Baterias LiPo 3S de 2800 mAh Turnigy	2	R\$699,80	Action Modelismo	http://www.actionmodelismo.web474.uni5.net/produto/4s50c-baterialipo4s148v40c-50c5000mahturnigy
4	Motor Brushless EMAX BL2215/20 - 1200 Kv	7	R\$483,00	iFly electric Hobby	http://www.iflye.com.br/motor-brushless-emax-bl2215-20-1200-kv-pr-18-341339.htm
5	ESC EMAX 30A BEC 5V 2*	7	R\$483,00	iFly electric Hobby	http://www.iflye.com.br/esc-emax-30a-bec-5v-2a-pr-218-341339.htm
6	Módulo de alarme de bateria com baixa tensão	1	R\$49,35	Megacopter	http://megacopter.com.br/item/Buzzer-de-baixa-tensao-para-2S%7B47%7D3S%7B47%7D4S-Indicador-de-alarme-de-bateria-Lipo-DA02.html
7	Rádio controle de 9 canais	1	R\$399,90	RC Megashop	http://www.rcmegashop.com.br/radios-receptores/18-radio-tx-rx-turnigy-9x-24ghz-9-canais.html
8	Módulo GPS com cabo para APM	1	R\$344,89	Mercado Importados	http://www.mercadoimportados.com.br/products/U%252dblbox-LEA%252d6H-Alta-Precis%C3%A3o-M%C3%B3dulo-GPS-com-cabo-para-APM2.5.2-ArduPilot-MWC-FPV-%252d-DX261328.html
9	Módulo Xbee 1mW com antena externa	1	R\$219,00	Multilógica Shop	http://multilogica-shop.com/catalogo/wireless/m%C3%B3dulos-xbee
10	Adaptadores Xbee	1	R\$107,00	Multilógica Shop	http://multilogica-shop.com/adaptador-xbee-usb-difrobot
11	Placa de distribuição de potência	1	R\$79,90	Yellow Hobby	http://yellowhobby.com.br/eletricaetronica/cabos-fios/painel-de-carga-paralelo.phtml
12	APM 2.6 3DR	1	R\$1.300,00		
13	Câmera LifeCam Cinema	1	R\$423,00	Microsoft	http://www.microsoft.com/hardware/pt-br/p/lifecam-cinema/H5D-00013
14	Beaglebone Black	2	R\$659,94	Farnell Newark	http://www.farnellnewark.com.br/ferramentas/beagleboneblackarmcortexa84gbflas.product_EMB_0002,0.aspx?utm_source=site&utm_medium=banner&utm_campaign=beaglebbanner
15	Placa de circuito impresso	2	R\$23,40	Eletrodex	http://www.eletrodex.com.br/placa-prototipo-fibra-de-video-10x25.html
16	Sensor de Pressão Barométrica BMP180	1	R\$59,00	Robocore	https://www.robocore.net/modules.php?name=GR_LojaVirtual&prod=526

17	Magnetômetro de Três Eixos - HMC5883L	1	R\$59,00	Robocore	https://www.robocore.net/modules.php?name=GR_LojaVirtual&prod=344
18	IMU 6DOF	1	R\$259,00	Robocore	https://www.robocore.net/modules.php?name=GR_LojaVirtual&prod=280
19	Fios e conectores		R\$100,00	Tarzan	
	TOTAL		R\$6.099,12		

6. Atividades e Cronograma

De forma geral, as atividades principais do projeto são as seguintes:

- A1. Projeto e construção de estrutura ótima.
- A2. Análise e projeto do sistema de guiaamento e controle de atitude.
- A3. Análise e projeto do sistema de fusão de dados de câmera, sensores inerciais e sensor ultrassônico, para estimativa de posição relativa a um heliponto.
- A4. Análise e projeto de uma lei de guiaamento segura, levando em conta a realimentação de estimativas de posição providas pelo sistema projetado em A3, para pouso automático.
- A5. Concepção, projeto e implementação do hardware de um piloto automático baseado na placa Beaglebone Black.
- A6. Concepção, projeto e implementação do software de um piloto automático baseado na placa Beaglebone Black.
- A7. Montagem e testes de um hexacóptero usando componentes comerciais de aeromodelismo.
- A8. Substituição da estrutura comercial do hexacóptero montado em A7 pela estrutura ótima projetada em A1.
- A9. Substituição do autopiloto comercial do hexacóptero montado em A7 pelo autopiloto projetado em A5-A6.
- A10. Implementação dos métodos projetados e analisados em A2 no autopiloto projetado em A5-A6.
- A11. Implementação dos métodos projetados e analisados em A3-A4 no autopiloto projetado em A5-A6.
- A12. Testes em voo;
- A13. Relatórios e artigos.

A Tabela 3 apresenta o cronograma de atividades.

Tabela 3. Cronograma de atividades.

Atividade	Semestre 1	Semestre 2	Semestre 3	Semestre 4	Semestre 5
A1					
A2					
A3					
A4					
A5					
A6					
A7					
A8					
A9					
A10					
A11					
A12					
A13					

Anexo B – Registros de Reuniões do Projeto

Projeto Hexacóptero – Montagem *Pixhawk*

Registro de reunião – *checkpoint*

Data: 12/agosto/2015, 16h00 às 18h00

Participantes: José Agnelo, João Dantas, Ícaro Viana, Raphael Ballet.

Local: LRA

1. Cronograma

Em relação ao cronograma para término da montagem do hexacóptero, João sinalizou necessidade de antecipação de prazo para primeiro voo do protótipo. Em seu TG, será necessário realizar voos com o protótipo para captura de imagens aéreas do prédio novo do fundamental do ITA. Desta forma, houve um consenso em tentar reduzir o prazo em 50% da duração inicial prevista para conclusão da montagem, passando o novo prazo de 4 meses para 2 meses.

2. Andamento do projeto

Durante o início das montagens, foram verificadas necessidades de mudança na especificação de alguns componentes. A primeira é a troca da bateria de 2200 *mAh* por outra com maior amperagem. Uma solução proposta é utilizar outras baterias que possuem no LRA, ou pedir ao Prof. Davi a compra de uma bateria de 3000 *mAh*. Outra necessidade é a de reduzir o diâmetro das hélices. Para o primeiro voo, foi definido utilizar as hélices que já foram adquiridas.

Para a próxima reunião foi sugerido estender o horário do encontro até a noite, caso necessário, de forma a finalizar toda a parte de montagem física da estrutura e realizar a soldagem de alguns componentes, antes do início dos testes dos atuadores.

3. Divisão de tarefas

Para organização da montagem do hexacóptero, foi realizada divisão de tarefas, em módulos, conforme se segue:

3.1 Estrutura (Responsável: João Dantas)

- Posicionamento e fixação da **Pixhawk**;
- Distribuição de peso;
- Fixação dos motores e ESCs;
- Fixação de câmera.

3.2 Atuadores (Responsável: Raphael Ballet)

- Calibração dos ESCs;
- Teste dos sinais de PWM;
- Soldagem;
- Fixação de “switch” a partir de conexão com a bateria.

3.3 Controle e Telemetria (Responsáveis: Ícaro Viana, Igor Prado, José Agnelo)

- Testes de software;
- Interface software e PC;
- Integração com SONAR e GPS.

4. Novas Tarefas

Novas Tarefas	O quê	Quem	Prazo
1	Verificar qual a melhor configuração para o Hexacóptero, se em “+” ou em “X”, de modo a determinar o posicionamento da <i>Pixhawk</i> na estrutura.	João	19/agosto/2015
2	Pesquisar se será necessário colocar trem de pouso na estrutura do veículo.	João	19/agosto/2015
3	Comprar parafusos <i>Philips</i> de 12 mm para fixação dos motores.	Ícaro	19/agosto/2015
4	Comprar velcros para fixação dos ESC's.	Ícaro	19/agosto/2015
5	Realizar estudo sobre a influência da proximidade das hélices. Avaliar se será necessário, futuramente, trocar as hélices por outras com menor diâmetro.	João/Agnelo	19/agosto/2015

6	Pesquisar como fazer o <i>BIND</i> do rádio controle.	Ícaro/Raphael	19/agosto/2015
7	Comprar <i>switch</i> para ligação com a bateria.	Ícaro/Raphael	19/agosto/2015
8	Fazer estudo sobre todos os periféricos da Pixhawk (<i>inputs/outputs</i>), como é feita a comunicação com o receptor, bem como a ligação do módulo de alimentação com a placa.	Agnelo/Ícaro/Igor	19/agosto/2015
9	De posse das especificações dos atuadores e baterias que foram comprados, “estimar” tempo de autonomia de voo da missão.	João	19/agosto/2015
10	Verificar se o software da <i>Pixhawk</i> faz a calibração dos ESCs.	Raphael	19/agosto/2015

6. Tarefas pendentes de reuniões atrás:

O quê	Quem	Comentários	Novo prazo
-	-	-	-

A próxima reunião de *checkpoint* do projeto está confirmada para a próxima quarta-feira, 19/agosto/2015, às 16h00.

Projeto Hexacóptero – Montagem *Pixhawk*

Registro de reunião – *checkpoint*

Data: 19/agosto/2015, 16h30 às 18h30

Participantes: José Agnelo, João Dantas, Ícaro Viana, Raphael Ballet, Igor Prado e Davi Castro.

Local: LRA

1. Cronograma

Em relação ao cronograma, o grupo de estruturas finalizou a montagem dos motores no frame. A tarefa para fazer o *BIND* do rádio controle foi concluída, validando a vinculação entre o receptor/transmissor através de acionamento de servo. A compra de parafusos, chaves, termo retrátil, baterias para o rádio e aquisição de velcros foram efetivadas.

A equipe do projeto passou a ter um novo integrante, o doutorando Davi Castro (PG/EAM), que se comprometeu em ajudar o grupo nas atividades relacionadas a *Pixhawk* e em participar das reuniões semanais do grupo.

2. Andamento do projeto

Foi definida a configuração em “X” para ser adotada para o Hexacóptero, bem como foi determinado o posicionamento da *Pixhawk* na estrutura. João decidiu que será necessário colocar trem de pouso na estrutura do veículo. Uma requisição deverá ser feita junto ao Prof. Davi para compra do trem de pouso.

João verificou que a proximidade das hélices é observada na maioria dos multicópteros pesquisados. Desta forma, fica mantido o uso da hélice de 10 mm até o final do projeto. Durante o início das montagens e primeiros testes da *Pixhawk* no PC, foi verificada necessidade de uso de pinça, para melhor manuseamento dos cabos conectores da placa.

Para a próxima reunião foi sugerido priorizar a soldagem de componentes de forma a finalizar toda a parte de montagem física da estrutura. Para tal, um espaço físico dedicado deverá ser disponibilizado para realização desta atividade. Desta forma, parte da equipe

pode trabalhar na soldagem, enquanto que o grupo de Controle e Telemetria poderá focar na calibração de sensores e demais atividades relacionadas a *Pixhawk*.

3. Divisão de tarefas

A organização da montagem do hexacóptero, após atualizações, ficou da seguinte forma:

3.1 Estrutura (Responsável: João Dantas)

- Posicionamento e fixação da **Pixhawk**;
- Distribuição de peso;
- Fixação dos motores e ESCs;
- Fixação de câmera e trem de pouso.

3.2 Atuadores (Responsável: Raphael Ballet)

- Calibração dos ESCs;
- Teste dos sinais de PWM;
- Soldagem;
- Fixação de “switch” a partir de conexão com a bateria.

3.3 Controle e Telemetria (Responsáveis: Ícaro Viana, Igor Prado, José Agnelo e Davi Castro)

- Testes de software;
- Interface software e PC;
- Calibração de sensores;
- Integração com SONAR e GPS.

4. Novas Tarefas

Novas Tarefas	O quê	Quem	Prazo
1	Especificar trem de pouso para compra e verificar onde vai ser fixado o mesmo.	João	26/agosto/2015
2	Definir a melhor posição de fixação dos ESCS (se na parte superior ou inferior do frame).	João	26/agosto/2015
3	Identificar os terminais do “switch” para que seja feita a soldagem com a placa.	Ícaro	26/agosto/2015
4	Enviar o manual com os passos necessários para operação da <i>Pixhawk</i> para o grupo.	Igor	26/agosto/2015
5	Verificar como é feita a calibração dos sensores no Mission Plane, para realização desta tarefa na próxima reunião.	Davi Castro	26/agosto/2015
6	Especificar carenagem para compra.	João	26/agosto/2015
7	Organizar espaço no LRA para soldagem.	Igor/Raphael	26/agosto/2015

6. Tarefas pendentes de reuniões atrás:

O quê	Quem	Comentários	Novo prazo
Verificar se o software da <i>Pixhawk</i> faz a calibração dos ESCs.	Raphael	A calibração dos ESCs poderá ser feita “manualmente”.	26/agosto/2015
Fazer estudo sobre todos os periféricos da Pixhawk (<i>inputs/outputs</i>), como é feita a comunicação com o receptor, bem como a ligação do módulo de alimentação com a placa.	Grupo de Controle e Telemetria	O grupo deverá estudar o manual repassado pelo Igor.	26/agosto/2015
“Estimar” tempo de autonomia de voo da missão.	João	Será utilizado bateria de 3300 mAh.	26/agosto/2015

A próxima reunião de *checkpoint* do projeto está confirmada para a próxima quarta-feira, 26/agosto/2015, às 16h00.

• PROJETO ITACOPTER - I (MONTAGEM PIXHAWK)

REUNIÕES : QUARTAS-FEIRAS (das 16h00 às 18h00)

• MÓDULOS:

1) ESTRUTURA : ① JOÃO PAULO

* POSICIONAMENTO e FIXAÇÃO da PIXHAWK;

* DISTRIBUIÇÃO de peso;

* FIXAÇÃO DOS NOTOPES e ESC'S.

2) TELEMETRIA e CONTROLE ③

* TESTES de SOFTWARE;

ÍCARO / AGIDELO

3) INTERFACE SOFTWARE e PC; ④

* INTEGRACÃO com GPS e SONAR.

4) ATUADORES: ②

* CALIBRAÇÃO DOS ESC'S;

RAPHAEL

* TESTE DOS SINAIS DE PWM;

* SOLDAGEM;

* FIXAÇÃO DE "SWITCH" A PARTIR DE CONEXÃO COM A BATERIA.

Figura 55 - Divisão de Tarefas no início do projeto



Figura 56 - Primeira reunião de montagem do hexacóptero

Referências

- [1] BARANEK, R.; Solc, F., "Modelling and control of a hexacopter," Carpathian Control Conference (ICCC), 2012.
- [2] BOUABDALLAH, S., SIEGWART, R. Full Control of Quadrotor. In Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego, CA., USA: IEEE, Oct. 2007.
- [3] BOUABDALLAH, S. Design and Control of Quadrotor with Application to Autonomous Flying. Tese — École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2007.
- [4] BOUFFARD, P.; WASLANDER, S. A hybrid randomizednonlinear programming technique for small aerial vehicle trajectory planning in 3d. In: Planning, Perception and Navigation for Intelligent Vehicles (PPNIV). St. Louis, MO - USA, 2009.
- [5] BRAMWELL, A. R. S.; DONE, G. T. S.; BALMFORD, D. Bramwell's Helicopter Dynamics. Second. Jordan Hill, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.
- [6] CARRILLO, L. R. G. et al. Quad Rotorcraft Control. London: Springer-Verlag, 2013.
- [7] CUTLER, M. et al. Comparison of fixed and variable pitch actuators for agile quadrotors. In: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2011.
- [8] FRESK, E.; NIKOLAKOPOULOS, G. Full quaternion based attitude control for a quadrotor. In: European Control Conference, 2013.
- [9] HOFFMANN, F.; GODDEMEIER, N.; BERTRAM, T. Attitude estimation and control of a quadrocopter. In: Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on, 2010.
- [10] HOFFMANN, G. M. et al. Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment. In: Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2007.
- [11] LUPASHIN, S. et al. A platform for aerial robotics research and demonstration: The flying machine arena. Mechatronics, Elsevier, 2014.

- [12] MARTIN, P.; SALAUN, E. The true role of accelerometer feedback in quadrotor control. In: Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on, 2010.
- [13] NEWCOME, L. Unmanned Aviation: A Brief History of Unmanned Aerial Vehicles. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [14] POUNDS, P., MAHONY, R., CORKE, P. Modelling and Control of a Quad-Rotor Robot. In Proceedings of the Australasian Conference on Robotics and Automation, Auckland, New Zealand: Australian Robotics & Automation Association, Dec. 2006.
- [15] SAMPAIO, U. P. Simulação e Controle de Posição de Veículo Quadrirotor. Dissertação (Mestrado) — Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2013.
- [16] SANTANA, P. H.; BORGES, G. A. Modelagem e controle de quadrirrotores. In: XIX Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2009.
- [17] SPONG, M., VIDYASAGAR, M. Robot Dynamics and Control. N.Y.: J.Wiley, 1989.
- [18] WAGTENDONK, WJ. Principles of Helicopter Flight. Newcastle, WA: Aviation Supplies & Academics, Inc., 2006.
- [19] YENNE, B. Attack of the Drones: A History of Unmanned Aerial Combat. MBI Publishing Company, 2004.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 17 de novembro de 2015	3. REGISTRO N° DCTA/ITA/TC-034/2015	4. N° DE PÁGINAS 98
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Hexacóptero para monitoramento de construção civil: montagem, testes e operação.			
6. AUTOR(ES): João Paulo de Andrade Dantas			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Robótica aérea. Hexacóptero. Monitoramento de obras de construção civil.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Aeronave não-tripulada; Rotores; Processamento de imagens; Construção civil; Robótica; Controle.			
10. APRESENTAÇÃO:		<input checked="" type="checkbox"/> Nacional	<input type="checkbox"/> Internacional
ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Mecânica-Aeronáutica. Orientador: Prof. Dr. Davi Antônio dos Santos. Publicado em 2015.			
11. RESUMO: Recentemente tem havido um aumento expressivo do interesse por robôs aéreos do tipo multicóptero por parte de pesquisadores, robistas, e empresas ou pessoas interessadas em alguma aplicação operacional ou economicamente vantajosa desses veículos. O presente trabalho consistirá na montagem, teste e operação de um multicóptero constituído de seis rotores fixos (não vetoráveis) e todos perpendiculares a um mesmo plano (plano dos rotores); denominamos esse robô aéreo de hexacóptero. Para fins de demonstrar a operação desse hexacóptero, será desenhada uma aplicação de inspeção de andamento de obras de construção civil. O hexacóptero a ser montado será controlado por um autopiloto Pixhawk e por rotores, rádio e bateria de aeromodelismo. Esse veículo carregará uma câmera GoPro Hero 3 apontada verticalmente para baixo. Esse trabalho se insere no escopo do projeto ITACopter 1 do Laboratório de Robótica Aérea do ITA (LRA-ITA). Com o intuito de demonstrar o sistema, será realizada uma inspeção do novo prédio da Divisão de Ciências Fundamentais do ITA.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () SECRETO			