

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
(PPGE3M)

**DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE VEÍCULO AÉREO NÃO
TRIPULADO DE BAIXO CUSTO E INTEGRAÇÃO COM FERRAMENTA
EDUCACIONAL PARA TREINAMENTO DE VOO**

Henrique Yanaguibashi Shibata

Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia

Porto Alegre

2019

Henrique Yanaguibashi Shibata

**DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE VEÍCULO AÉREO NÃO
TRIPULADO DE BAIXO CUSTO E INTEGRAÇÃO COM FERRAMENTA
EDUCACIONAL PARA TREINAMENTO DE VOO**

Tese submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas,
Metalúrgica e Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

Porto Alegre

2019

Henrique Yanaguibashi Shibata

DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE VEÍCULO AÉREO NÃO
TRIPULADO DE BAIXO CUSTO E INTEGRAÇÃO COM FERRAMENTA
EDUCACIONAL PARA TREINAMENTO DE VOO

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia, na área de Tecnologia Mineral e Metalurgia Extrativa e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materias (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

Prof. Dr. Afonso Reguly
Coordenador do PPGE3M

Banca Examinadora:

Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa – UFRGS_____

Prof. Dr. Áttila Leães Rodrigues – UFRGS_____

Prof. Dr. Ítalo Gomes Gonçalves – UNIPAMPA_____

Sumário

RESUMO	x
ABSTRACT	xi
CAPÍTULO 1	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Justificativa e relevância do tema.....	4
1.3 Meta.....	4
1.4 Objetivos Específicos	5
1.5 Contribuição da Tese	5
1.6 Estrutura da Tese	6
CAPÍTULO 2	8
2.1 Revisão da literatura	8
2.2 Histórico	8
2.3 Classificação dos RPAs	12
2.4 Regulamentação.....	15
2.5 Aplicações	18
2.6 Desenvolvimento de RPAs.....	21
2.7 Quadricóptero: definição e componentes eletrônicos.....	25
2.8 Ferramentas de ensino e treinamento	28
2.9 Ambientes de desenvolvimento.....	35
CAPÍTULO 3	38
3. Metodologia.....	38
3.1. Projeto e configuração da aeronave protótipo	38
3.2 Desenvolvimento da plataforma de treinamento.....	42
3.3 RPA	44
3.3.1 Fases de desenvolvimento	44
3.3.2 Especificação dos componentes	44

3.3.3 Montagem.....	45
3.3.4 Configuração da aeronave	50
3.3.5 Planejamento de voo.....	53
3.3.6 Custo Total do RPA.....	57
3.4 SIMULADOR DE VOO E PILOTAGEM.....	58
3.4.1 Descrição geral do simulador	58
3.4.2 Cenário	59
3.4.3 Objetivos.....	61
3.4.4 Realidade virtual e interface do simulador	64
3.4.5 Controle	68
3.4.5 Áudio	69
3.4.6 Elementos gráficos	69
3.4.7 Versão alfa.....	71
3.4.8 Versão beta	73
3.4.9 Testes de usuários.....	74
CAPÍTULO 4	75
4.1 Análise de Resultados.....	75
4.2 Testes com o RPA	75
4.3 Análise do simulador.....	84
CAPÍTULO 5	91
5.1 Conclusão	91
5.2 Trabalhos futuros.....	93
6. BIBLIOGRAFIA	95

Lista de Figuras

Figura 1. Utilização de balões com câmera fotográfica, Whittlesley (1970 apud Eisenbeiss, 2009).....	8
Figura 2. Utilização de câmeras em pombos (esquerda) e em pipas (direita), Newhall (1969 apud Eisenbeiss, 2009)	9
Figura 3. Comparação de RPA com aeronaves tripuladas e satélites, JORGE & INAMASU (2014).....	10
Figura 4. RPAs e seus componentes (ANDRADE, 2013)	12
Figura 5. Classificação de RPAs quando a altitude e alcance, adaptado de Blyeburgh (1999).....	13
Figura 6. Tipos de sensores embarcados em mini VANTs	19
Figura 7. Dirigível Robótico Autônomo não tripulado para monitoração remota, CenPra.	22
Figura 8. μ VANT desenvolvido pela UNB para o DNPM (BICHO, 2013)	23
Figura 9. VANTs das empresas G-drones, Xfly e Xrobots	25
Figura 10. Movimentos básicos de um quadricóptero (RAZA,2010).....	26
Figura 11. Controladoras de voo	28
Figura 12. Simulador de voo.	30
Figura 13. Interface do DroneSim Pro versão de demonstração	32
Figura 14. RealFlight Drone Flight Simulator.	33
Figura 15. Interface Heli-X6	34
Figura 16. Interfaces do Drone Simulator (a), Free Flight Drone Simulator (b) e RC Drone Quadcopter (c).....	34
Figura 17. Frame F450.	39
Figura 18. Ligação dos ESCs e rotores ao frame.	39
Figura 19. Controladora de voo Pixhawk.....	40
Figura 20. Esquema resumo da parte eletrônica do drone.....	41
Figura 21. Fluxograma resumo da montagem do protótipo	42
Figura 22. Portas de conexão da controladora para os ESCs.	45
Figura 23. RPA logo após a primeira parte da montagem.....	46
Figura 24. Conexão do buzzer e do switch de segurança.....	46
Figura 25. Conexão do power module com a placa controladora.	47
Figura 26. RPA após ser realizada a adição do switch, buzzer e power module. ...	47

Figura 27. Esquema de um quadricóptero.	48
Figura 28. GPS instalado na frente da aeronave.	49
Figura 29. Suporte improvisado para o GPS.	49
Figura 30. Nova posição e suporte do GPS.	49
Figura 31. Entrada de conexão com computador via usb.	51
Figura 32. Configuração do GPS.	52
Figura 33. Calibração do rádio controle.	53
Figura 34. Tela de planejamento de voo no Mission Planner	54
Figura 35. Adicionando pontos de controle manualmente.	54
Figura 36. (A) Criação de polígono para demarcar a área alvo; (B) Acesso ao Survey (Grid) para incluir os waypoints no polígono; (C) Janela de informações e opções após criar os waypoints.	55
Figura 37. Planejamento de missão no modo Grid do Pix4D Capture.	56
Figura 38. Planejamento de missão pelo modo Polygon do Pix4D Capture.	56
Figura 39. Cenário concebido para o simulador.	60
Figura 40. Típico cenário de mineração em unidades de produção de agregados (pedreiras).	60
Figura 41. Localização do objetivo do primeiro leve.	62
Figura 42. Localização dos cubos no Level 2	63
Figura 43. Localiazação dos pontos do objetivo do Level 3.	63
Figura 44. Level 4 com vários objetivos.	64
Figura 45. Equipamento HTC Vive.	65
Figura 46. Visão do usuário das interfaces dentro do simulador.	66
Figura 47. Interface de conclusão do Level e informações mostradas na estação terrestre.	67
Figura 48. Estação terrestre mostrando informações de voo e o texto informando o objetivo.	67
Figura 49. Semelhança entre o joystick e um rádio controle do Mavic.	68
Figura 50. Esquema de comandos do controle.	69
Figura 51. Foto real do equipamento (esquerda) e modelo 3D de drone implementado no simulador (direita).	70
Figura 52. Eelementos com funções estéticas (círculo vermelho) como prédios e árvores.	70

Figura 53. Elementos utilizados para os objetivos nos Levels (bandeira verde, cubo cinza e seta verde).....	71
Figura 54. Cenário inicial de testes do simulador.	72
Figura 55. Menu Inicial do simulador	73
Figura 56. Exemplo de um log de voo com alta interferência magnética.	76
Figura 57. Log de voo do segundo teste de voo.	77
Figura 58. Ângulos de roll, pitch and yaw demonstrados em um RPA.	78
Figura 59. Gráfico Roll (linha vermelha) vs DesRoll (linha verde).....	79
Figura 60. Gráfico Pitch (linha verde) vs DesPitch (linha vermelha)	79
Figura 61. Gráfico Yaw (linha verde) vs DesYaw (linha vermelha).....	79
Figura 62. Dados de vibração acima do recomendado.	80
Figura 63. Dados de vibração dentro dos limites.	80
Figura 64. Número de satélites abaixo do recomendado.....	81
Figura 65. Valor de HDOP acima do valor recomendado.....	82
Figura 66. Número de satélites acima do recomendado.	82
Figura 67. Valores de HDOP no nível recomendado.	82
Figura 68. Gráfico das resposta das perguntas: P1 e P2.....	85
Figura 69. Figura do gráfico da pergunta P3	86
Figura 70. Resultados das perguntas P4 e P5.	87
Figura 71. Resultado da pergunta P6.....	88
Figura 72. Resultado da pergunta P7.....	88
Figura 73. Resultado das resposta da pergunta P8.	89

Lista de Tabelas

Tabela 1. Classificação de RPAs quanto a altitude e massa (MADDALON et al, 2013).....	16
Tabela 2. Tabela resumo das exigências de cada categoria de RPAs pela ANAC.	17
Tabela 3. Número de referência de RPAs, iniciativas de desenvolvimento e propósitos do ano de 2005 a 2013 (COLOMINA e MOLINA, 2014)	21
Tabela 4. Exemplos de empresas brasileiras e modelos de VANTs produzidos.....	24
Tabela 5. Listagem de Peças e Preços do RPA	57

RESUMO

Os RPAs (*Remotely Piloted Aircrafts*) ganharam grande espaço no cenário atual com a possibilidade de diversas aplicações em agricultura, construção civil, meio ambiente, mineração, entre outros. Através dessas aplicações diversas surge a necessidade da customização e montagem de drones com as vantagens de diminuição de custo e possibilidade de configuração para atender determinada finalidade específica. Dentro essa proposta, foi realizada a especificação, a montagem e a configuração de uma aeronave (quadricóptero) para aplicação em mineração com o objetivo de contribuir para a capacitação de pessoas na utilização de RPAs e capaz de aquisição de dados multifinalitários de áreas de interesse na mineração. Para isso, foram realizadas várias etapas para o projeto de construção da aeronave, tais como: especificação e aquisição de componentes; montagem; configuração; testes de voo e análises de desempenho. Cada etapa foi essencial para se ter um RPA funcional para missões de treinamento de voo assim como apto para realizar missões de voo para mapeamento e modelagem.

Um dos maiores problemas da popularização de aeronaves remotamente pilotadas (ou drones) tem sido a utilização desses equipamentos por pilotos inexperientes ou sem nenhuma instrução de voo, o que pode representar riscos a pessoas, objetos de terceiros e ao próprio equipamento. Para proporcionar maior interação prévia aos usuários, foi concebido um *software* de simulação de voo para dar o primeiro contato além de desenvolver a habilidade de pilotagem para pessoas inexperientes nesse tipo de equipamento. A ferramenta trata-se de um simulador de voo com utilização de Realidade Virtual, em que é possível treinar a pilotagem de maneira segura e imersiva, realizando objetivos para melhorar as habilidades de controle de voo livre manual. A construção do simulador foi realizada através da plataforma Unity, uma *engine* gráfica para construção de jogos, passando por etapas de projeto, produção e implementação. Após o desenvolvimento, o software foi apresentado a pessoas com pouca ou nenhuma experiência de voo para verificar a eficácia da ferramenta e logo após foi realizado uma avaliação do software através de um questionário respondido pelos usuários. Através disso, foi possível verificar a eficácia da ferramenta computacional e como os elementos de treinamento sistematizado ajudaram os alunos submetidos aos testes a terem uma melhor experiência no primeiro contato com um equipamento real.

ABSTRACT

The RPAs (*Remotely Piloted Aircrafts*) have gained large space in the current scenario with the possibility of various applications in agriculture, civil construction, environment, mining, amongst others. Through these various applications, the need for customization and assembly of drones with the advantages of cost reduction and possibility of customized settings to achieve a specific purpose arises. Within this proposal, it was specified, assembled and setup an aircraft (Quadcopter) for mining applications aiming to contribute in training people to use RPAs and capable to the acquisition of multi-purpose data in the areas of interest. To accomplish this, several steps in the project of building the aircraft were taken, such as: specification and acquisition of components; assembly; set up; flight tests and performance analysis. Each step was essential to have a functional RPA to the purpose of flight training and also able to perform flight missions for mapping and modeling purposes.

One of the major problems of the popularization of RPAs (or drones) is their use by unexperienced pilots or without any flight instruction, which can represent risks to other people, third parties objects and to the equipment itself.

To provide more intensive interaction before flying, a flight simulation software was designed to give them the first flight contact and to develop piloting skills for inexperienced people in this type of equipment. The tool is a flight simulator which uses Virtual Reality, in which it is possible to train the pilots in a safe and immersive environment, accomplishing goals to improve the manual free flight control skills. The creation of the simulator was carried out using the Unity platform, a graphics engine for game development, going through the design, production and implementation stages. After the development, the software was presented to people with little or no flight experience to verify the effectiveness of the tool and after that a software evaluation was requested through a questionnaire answered by the users. Through this, it was possible to verify the tool effectiveness and how the elements of systematic training helped the students to have a better experience in their first contact with a real equipment.

CAPÍTULO 1

1.1 Introdução

Com a popularização dos RPAs (*Remotely Piloted Aircraft*), diversas áreas de pesquisa estão utilizando esses equipamentos para diferentes aplicações, como aerofotografia, monitoramento, inspeção de obras, agricultura de precisão, entre outras. Com tantas aplicações e facilidades que eles possuem, torna-se de grande interesse para usos também em pesquisas científicas.

Esses veículos aéreos, sejam do tipo asa fixa ou multirotor, possuem uma gama de tecnologias embarcadas, que fazem com que sejam muito atrativos e fáceis de serem utilizados. Além do *hardware*, que contam com dispositivos de GPS (Global Positioning System) acoplado, unidade de medida inercial (IMU), rotores, controladores de velocidade (ESCs), controladores de voo, hélices, possuem também softwares para planejamento de voo e comunicação com a aeronave, através de *data links*. Para o conjunto desses veículos aéreos não tripulados, controles de voo e o sistema de operação dá-se o nome de Sistema Aéreo Não Tripulado (SANT) (RASI, 2008), também denominado pelo ICA 100-40 como Remotely Piloted Aircraft System (RPAS). As aplicações para essas aeronaves são bastante variadas, como por exemplo, fotografias aéreas, monitoramento de áreas de preservação, agricultura de precisão, aplicação militar, mapeamento, entre outras mais (EISENBEISS, 2004; JORGE, 2014). Os tipos de aeronaves podem ser distinguidos entre os de asa fixa e os de asa rotativa. Os modelos de asa fixa são mais parecidos com aeromodelos, em que apresentam a vantagem de percorrer maiores distâncias, devido a sua maior autonomia de voo. Em contrapartida, os equipamentos de asa rotativa apresentam maior facilidade de chegar em locais de difícil acesso, permitem pouso e decolagem vertical, porém sua autonomia de voo é mais limitada que os modelos de asa fixa.

Países como Estados Unidos, China, Inglaterra, Japão entre outros estão desenvolvendo “drones” (termo mais popular) com os mais variados tamanhos, tipos e sofisticação de sistemas. Estados Unidos e Israel estão mais voltados para avanço dessa tecnologia para uso militar (JORGE, 2014). Entretanto, países como Japão vem desenvolvendo VANTs (Veículo Aéreo Não Tripulado) para uso na agricultura de alto desempenho (SIMPSON, 2003). No Brasil, também já existe um

histórico de desenvolvimento de VANTs como é o caso da Embrapa, para utilização agrícola (JORGE, 2014). Além da Embrapa, empresas iniciadas em universidades como a Xrobots, Airship, Flight Solutions, entre outras, estão montando drones para atender ao mercado. Os preços desses equipamentos podem variar bastante dependendo do tipo de aplicação. Para utilização como lazer, por exemplo, pode-se encontrar equipamentos que custam a partir de R\$1.000,00. Já para usos específicos em que se exige uma maior qualidade de sensores e outros dispositivos da aeronave o preço pode chegar a valores de mais de R\$150.000,00. Considerando o valor de investimento em determinados equipamentos é clara a necessidade de treinamentos específicos para poder operá-los para garantir tanto a qualidade do produto gerado, como a própria integridade do equipamento, dos dispositivos nele embarcados bem como de terceiros. Entretanto, é possível utilizar equipamentos com custos reduzidos que também podem possuir desempenho similar a esses de custos mais elevados, como o caso de Koh e Wich (2012), em que desenvolveram um RPA para monitoramento da fauna e flora, Bendea et al. (2007) também desenvolveram um equipamento para ser utilizado na aerofotogrametria, entre outros tantos desenvolvimentos em uma área que cresce a cada dia.

Com o desenvolvimento do RPA foi possível montar um equipamento de custo reduzido em comparação aos equipamentos montados por empresas brasileiras, possuindo o custo total de R\$11.587,00. Além disso, ele já vem embarcado com o sensor NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) Red + NIR (*Near Infra Red*), o que acaba abrindo alternativas para novas análises, como por exemplo, a verificação do impacto ambiental em regiões de mineração. Esse tipo de sensor adicionou um custo maior ao RPA, porém nos equipamentos encontrados no mercado, eles acabam vindo com um sensor RGB, ou mesmo sem qualquer sensor, o que não possibilita esse tipo de análise. O quadricóptero montado também possui desempenho similar aos encontrados no mercado, possuindo aproximadamente 14 minutos de voo e de peso aproximado de 1,45 Kg. Portanto, a aeronave acaba sendo uma alternativa barata, podendo ser utilizado em aerolevantamentos e inspeções em áreas de mineração, e também para o treinamento de voo com equipamento real, com o objetivo de evitar que pilotos iniciantes acabem destruindo ou danificando equipamentos de alto custo.

Em consequência a essa grande popularização tornou-se muito fácil a aquisição desse tipo de equipamento para uso civil, o que torna mais que necessário saber utilizá-lo de modo seguro, tanto para fins recreativos como para uso profissional. Em função desse crescimento do uso, a ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) lançou uma regulamentação, a RBAC – E nº 94/2017, para evitar qualquer dano que esses veículos possam causar e também a legalidade deles para usos profissionais. Alguns outros países já tomaram a frente com a regulamentação, como é o caso dos Estados Unidos, Austrália, países da Europa, entre outros (CLARKE & MOSES, 2014).

A preocupação com acidentes que possam ser causados por drones é algo a ser considerado, tanto para usos profissionais quanto para quem só utiliza o equipamento para divertimento ou hobby. Além disso, a ANAC estabelece que para certos tipos de categoria de drone deverá ser exigida uma habilitação de voo, ou seja, o piloto deverá ser habilitado a voar com o equipamento após treinos ou cursos. Para cumprir com parte dos requisitos de pilotagem e operação, Kozuba e Bondaruk (2014) relatam a importância do uso de simuladores de voo para treinamento de pilotos. Através dessa ideia, se pode pensar em um simulador específico para drones, com o mesmo objetivo do uso de simuladores de voo para aviação civil e militar, que seria a habilitação e preparação do piloto em condições controladas. A ferramenta proporcionaria parte dos requisitos para habilitação das pessoas que vão utilizar o equipamento, permitindo uma experiência imersiva e realista, no sentido de operação do equipamento, sendo os objetivos finais desse treinamento: o uso correto, preparação e educação do piloto. A grande vantagem dos simuladores é justamente proporcionar experiências e situações diversas sem o risco de danos ao equipamento ou a terceiros.

A proposta temática da ferramenta é um cenário baseado em minas a céu aberto para treinamento de pilotos iniciantes que vão utilizar o RPA em um cotidiano de mineração, onde a maior parte do uso seria na utilização de execução de tarefas, como a tomada de fotos para coleta dados e/ou inspeção da mina. Para isso foi utilizado um motor gráfico conhecido por Unity. Nele foram construídos objetivos para a os usuários terem desafios para completar e assim fazer com que criem afinidade e pratiquem o controle de uma aeronave. Além disso, foi incorporado a realidade virtual através do óculos da HTC Vive para maior imersão do piloto no simulador. A construção da ferramenta foi realizado em 3 fases:

Designe e Projeto; Produção; Implementação. Após vários testes e verificação de erros de implementação, foram então realizados testes com usuários para verificar a eficácia da ferramenta no treinamento de pilotos. Os usuários foram submetidos ao treino virtual e após isso o treinamento, o mesmo grupo foi treinado com um equipamento real, após a coleta de opiniões realizada por um questionário, os usuários relataram que a ferramenta ajudou para complementar o treinamento de voo.

1.2 Justificativa e relevância do tema

A utilização de RPAs está ganhando cada vez mais espaço no mercado atual, seja para uso civil, profissional, militar, pesquisas ou simplesmente para lazer e entretenimento. Assim se torna de extrema importância o conhecimento desses equipamentos no aspecto de utilização, montagem, configuração, funcionamento e pilotagem, para se obter o máximo de proveito dessa tecnologia, com segurança. Em virtude da regulamentação para uso desses equipamentos de maneira legal e segura, será uma tendência a exigência de um mínimo de conhecimento a respeito de pilotagem, tornando-se de grande importância o treinamento e o uso correto desse tipo de equipamento. Assim, pensou-se na construção de uma ferramenta educacional para treinamento de pilotos iniciantes com propósito de formação de recurso humano com capacitação suficiente para operar um RPA. O simulador dispõe de recursos para ajudar na utilização desse tipo de equipamento, incorporando recursos de realidade virtual para ajudar na imersão do usuário. O cenário de mineração dentro do simulador tem o objetivo de capacitar pilotos que vão utilizar RPAs nesse tipo de ambiente. Além disso, a customização e montagem de um equipamento de baixo custo para ser utilizado para coleta de dados e também fazer parte do treinamento de voo, juntando o treinamento virtual e o treinamento real, com a utilização do equipamento montado nesse trabalho.

1.3 Meta

A meta do trabalho é contribuir com o estudo do uso de veículos aéreos remotamente pilotados de pequeno porte no transporte de sensores, através do desenvolvimento de um RPA de baixo custo, com desempenho suficiente para

capacitação de pilotos e utilização na aquisição de dados multifinalitários de áreas de mineração. Além disso, integrar com o desenvolvimento de uma interface de treinamento para pilotos iniciantes de RPAs, utilizando um simulador em ambiente de realidade virtual com um cenário de mina a céu aberto, para promover imersão e eficácia no treinamento de voo com RPAs.

1.4 Objetivos Específicos

Para atingir a meta desse trabalho são necessários atingir os seguintes objetivos específicos:

- Investigar os mecanismos (componentes eletrônicos e mecânicos) utilizados para o desenvolvimento de um RPA;
- Realizar a análise dos tipos de configurações de um RPA para atender as necessidades do uso desse equipamento em aerolevantamentos de mina a céu aberto;
- A partir da definição e construção do RPA, avaliar testes de eficácia do equipamento com a utilização de variáveis pertinentes para o indicativo de qualidade de voo da aeronave;
- Investigar plataformas de desenvolvimento gráfico para o desenvolvimento da ferramenta de treinamento;
- Realizar o desenvolvimento da ferramenta através de metodologias utilizadas no processo de construção de jogos educacionais e definir o tipo de treinamento para promover a capacitação de pilotagem com RPA;
- Analisar a eficácia da ferramenta através da aplicação de um treinamento com o simulador e posteriormente com um equipamento real em usuários, que possuam ou não conhecimento em pilotagem de RPAs, através da aplicação de questionários de avaliação, contendo os *feedbacks* delas.

1.5 Contribuição da Tese

Através do estudo no desenvolvimento de um RPA, o trabalho busca contribuir com o desenvolvimento de equipamento de baixo custo em relação as aeronaves montadas no mercado brasileiro. Promover a coleta de dados

multifinalitários em mina a céu aberto com o uso de diferentes tipos de sensores, sendo assim uma nova alternativa para automatizar ou semiautumatizar o processo de aerolevanteamento na área de mineração. Além disso, o desenvolvimento de uma ferramenta de treinamento vai proporcionar aos pilotos iniciantes de RPA um treinamento imersivo com a utilização de realidade virtual, promovendo a inserção dessa nova tecnologia para treinamentos de voo com RPA.

1.6 Estrutura da Tese

Capítulo 1 – Nesse capítulo, é feita uma introdução sobre o tema da tese abordando assuntos relacionados aos RPAs, como por exemplo, os tipos de RPA, legislação vigente nos países para regulamentação, entre outros. Além disso, é sobre a implementação de um simulador para treinamento de voo para pessoas com pouca ou nenhuma experiência em pilotagem. No final do capítulo, são apresentados a justificativa, relevância do tema, metas e objetivos do trabalho.

Capítulo 2 – É apresentado nesse capítulo um maior detalhamento dos RPAs, mostrando um pouco sobre a história de como surgiram, os tipos mais utilizados, legislação vigente sobre esses equipamentos em diferentes países, as diferentes aplicações que podem ser utilizados e o desenvolvimento dos diferentes RPAs no mercado. Ainda faz parte do capítulo, o detalhamento das ferramentas utilizadas para treinamento de voo.

Capítulo 3 – O capítulo faz o detalhamento da metodologia utilizada para a construção do quadricóptero, desde a montagem até a configuração do equipamento e planejamento de voo. Além disso, são mostrados os detalhes da implementação do simulador de voo, o cenário construído, os objetivos para o usuário executar e a aplicação da realidade virtual utilizada pelo simulador para maior imersão do treinamento.

Capítulo 4 – São analisados e discutidos os testes com o equipamento através da análise dos *logs* de voo, em que é possível verificar se o equipamento está funcionando de maneira satisfatória, conforme a montagem e configuração realizada. O capítulo ainda aborda a respeito dos resultados da construção do simulador através da análise de um questionário de pesquisa de opinião aplicado em alunos que utilizaram o simulador.

Capítulo 5 – São apresentados as conclusões da tese e também sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2.1 Revisão da literatura

Hoje em dia, nos céus é possível encontrar, além de helicópteros e aviões comerciais, as aeronaves de pequeno porte (ou como popularizado, os drones ou RPAs) estão sendo comumente vistos no céu, com finalidade diversas, como por exemplo, filmagens aéreas, fotografias, levantamentos aéreos, inspeções, entre outras aplicações. Muitos setores já estão investindo nesse tipo de equipamento e inclusive desenvolvendo melhorias em termos de *hardware* e *software*, devido a essa grande variedade de aplicações e versatilidade que os RPAs possuem.

2.2 Histórico

A utilização de artefatos aéreos não é totalmente novidade, pois esse tipo de recurso já vem sendo utilizado há vários anos. Na China há pelo menos 2000 anos atrás, instrumentos aéreos já eram usados para comunicação através de balões com lanternas. Além disso, balões foram utilizados na França em 1794 para carregar observadores, e também com a mesma finalidade foi utilizado na guerra civil americana em 1861 a 1865. Câmeras foram acopladas em balões (Figura 1), pipas e foguetes pela França em 1858 e em pombos (Figura 2) na Alemanha, por volta de 1907 a 1911 (CLARKE, 2014). Nos Estados Unidos, os drones tiveram bastante uso na área militar, sendo utilizados com sucesso na Guerra do Golfo (BLYENBURGH, 1999).

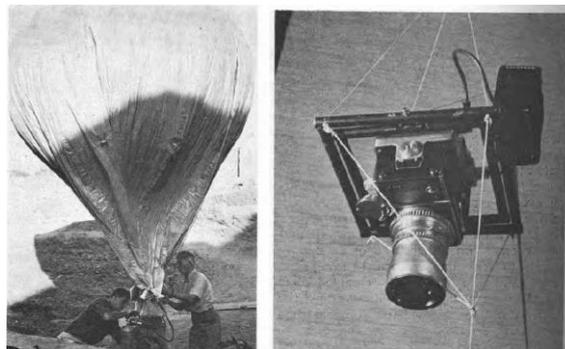


Figura 1. Utilização de balões com câmera fotográfica, Whittlesley (1970 *apud* Eisenbeiss, 2009)

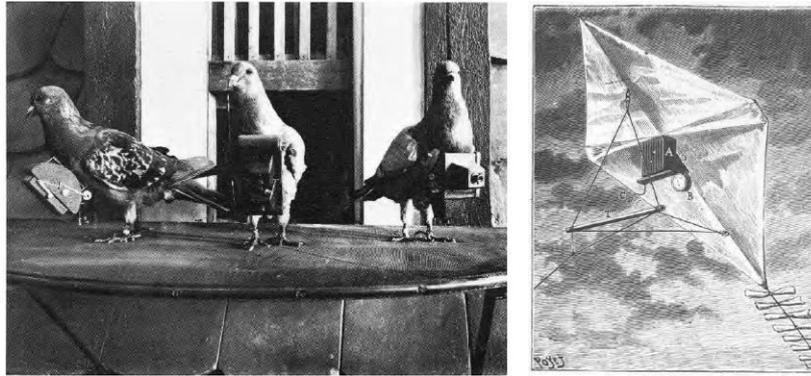


Figura 2. Utilização de câmeras em pombos (esquerda) e em pipas (direita), Newhall (1969 apud Eisenbeiss, 2009)

Além do termo drone, existem outras denominações utilizadas, como por exemplo, Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), *Unmanned Aircraft* (UA), *Remotely Operated Aircraft* (ROA), *Remotely Piloted Vehicle* (RPV), *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), *Remotely Piloted Aircraft* (RPA), sendo utilizado na Europa e na Austrália desde 2013 (CLARKE, 2014). Os termos ROA e RPA também são utilizados pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e a FAA (*Federal Aviation Administration*) nos Estados Unidos (EISENBEISS, 2009). Aqui no Brasil o termo empregado pela legislação do DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo) e a ANAC é o RPA, conforme os documentos ICA 100-40 e o RBAC-E nº 94/2017, em que podem ser acessados livremente nos devidos sites dessas instituições (DECEA, 2018).

Para Blyenburgh (1999), o termo UAV pode ser entendido como veículos aéreos motorizados reutilizáveis e inabitados, que podem ser controlados remotamente, semi-autônomo, autônomo ou a combinação dos dois. Uma outra interpretação segundo Villasenor (2012 apud Clarke, 2014), diz que são aeronaves não tripuladas que podem voar de modo autônomo, porém se torna inapropriado especificar a habilidade autônomo como uma definição mandatória, já que existem muitas aeronaves controladas por controle remoto. A própria legislação regula a questão de necessidade da presença do piloto, mesmo que em voos classificados como automáticos não sendo entendidos como autônomos. Já para a FAA um UAV é “Um dispositivo usado ou planejado para ser usado para voar no ar e que não tem um piloto a bordo. Esses dispositivos excluem mísseis, armas, ou ogivas explosivas, mas inclui todas as classes de aviões, helicópteros, dirigíveis e aeronaves de decolagem vertical (aeronaves multirotores) sem um piloto embarcado. UA não inclui balões tradicionais, foguetes, aeronaves com amarras e

planadores não motorizados” (FAA, 2013). Aqui no Brasil, segundo a ABA (Associação Brasileira de Aerodelismo), a definição de RPA é: “um veículo capaz de voar na atmosfera, fora do contato com o solo, que foi projetado ou modificado para não receber um piloto humano e que é operado por controle remoto ou autônomo” (JORGE E INAMASU, 2014).

A crescente popularização dos RPAs se deve às diversas vantagens que ele pode oferecer, como por exemplo: tempo curto de duração da operação; pouca ou nenhuma equipe de apoio; dispensa de um piloto a bordo; facilidade de transporte e mobilização de equipamentos; imagens com resolução superior à imagens de satélites; não necessita de áreas grandes para fazer a decolagem e pouso; diminuição do tempo de treinamento operacional; cobertura de áreas de difícil acesso, entre outros (MEDEIROS, 2007; JORGE e INAMASU, 2014; CLARKE, 2014; EISENBEISS, 2009). Um outro ponto que pode ser adicionado como vantagem é a flexibilidade de uso em comparação a satélites e aeronaves tripuladas, como pode ser observado na Figura 3, em que apesar dos satélites e aeronaves tripuladas terem maior recobrimento de áreas, os RPAs levam vantagem na frequência de atualização e flexibilidade. Além disso, com os grandes investimentos e avanços nesses tipos de equipamentos, novas tecnologias estão sendo desenvolvidas melhorando ainda mais essas características presentes nos RPAs.

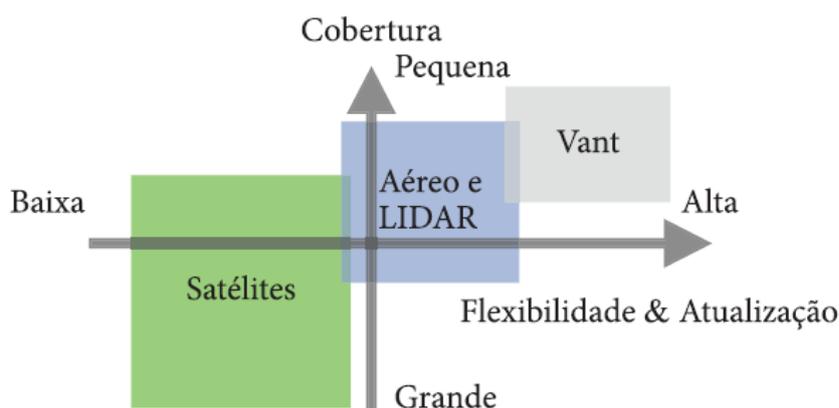


Figura 3. Comparação de RPA com aeronaves tripuladas e satélites, JORGE & INAMASU (2014)

Apesar das vantagens os RPAs apresentam limitações, como por exemplo: dependendo do tipo de drone a autonomia de baterias e conseqüentemente a duração do tempo de voo torna-se restrito, com duração média de 15 a 30 minutos.

Modelos menores apresentam pouca tolerância a ventos; pouca capacidade de carregamento de sensores e dispositivos com maior peso. Em comparação com imagem de satélites, apresentam menor área de cobertura. A distância de operação do RPA depende do alcance da conexão de rádio (EISENBEISS, 2009; CLARKE, 2014). Muitas dessas limitações estão sendo progressivamente melhoradas, mas não podem deixar de ser consideradas.

De acordo com JORGE e INAMASU (2014), além da aeronave, o RPA consiste de 5 componentes, que são: a unidade de medida inercial (IMU) 3 eixos, que é um sistema de navegação que integra as acelerações em Norte/Sul, Leste/Oeste por meio de sensores inerciais, determinando a posição; magnetômetro de 3 eixos, que é um sensor orientado de acordo com o campo magnético da Terra servindo como referência a atual orientação da aeronave; GPS (*Global Positioning System*); sistema de rádio com interface de servo e *safety pilot*, utiliza-se um sistema de telemetria para controlar a aeronave; controlador de voo, que tem como função manter a aeronave estabilizada e de executar manobras que a conduza através de uma rota selecionada (NERIS, 2001). Na figura 4 pode ser observado um esquema de RPAs de asa fixa e asa rotativa, mostrando os principais componentes presentes, além das câmeras para a aquisição de dados e também o sistema de controle terrestre (*Ground Station*). Para os drones de asa fixa existem modelos que possuem trens de pouso e outros não, para esses que não possuem trem de pouso a realização de decolagem se dá através de sistemas de propulsão ou por alguém arremessando a aeronave, o pouso é realizado com a “barriga” da aeronave, o que pode ocasionar danos. Modelos mais modernos possuem sistema de paraquedas, que vão proporcionar uma aterrissagem mais suave e com menor possibilidade de danos. Já para drones de asa rotativa como possuem aterrissagem e pouso vertical, o trem de pouso vai ajudar na melhor estabilização da aeronave no chão e também evitar que equipamentos acoplados abaixo da aeronave sofram algum dano. Com os avanços da tecnologia, esses componentes estão ficando cada vez melhores e se tornando mais fáceis de serem montados para que pessoas que não entendam de montagem de RPA possam seguir na customização do próprio equipamento.

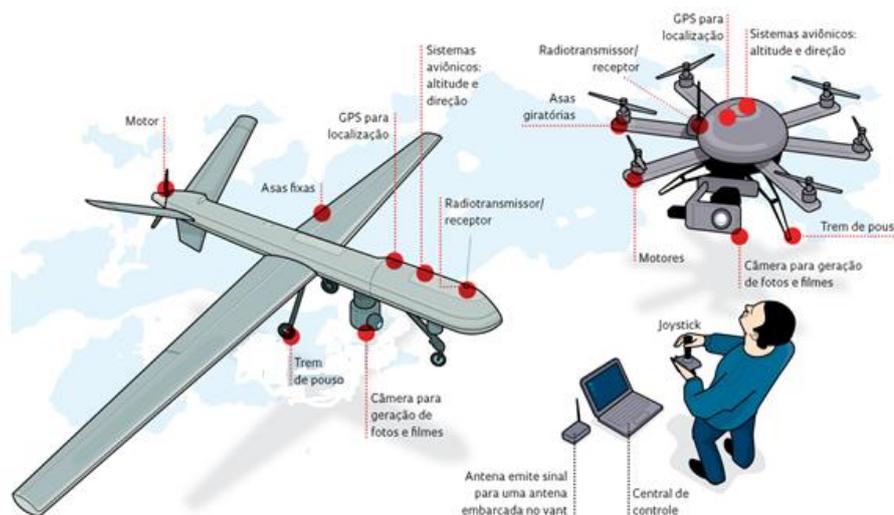


Figura 4. RPAs e seus componentes (ANDRADE, 2013)

2.3 Classificação dos RPAs

Muitos grupos propuseram diferentes tipos de classificação, segundo Blyenburgh (1999), presidente da Associação Europeia de Sistema de Veículos não Tripulados (EUROUVS), os RPAs podem ser classificados quanto a altitude e alcance de operação. Os micro e mini RPAs são plataformas pequenas que voam em baixas altitudes (abaixo dos 300 metros) e tem foco em operações de menor escala, dentro de estruturas, carregando dispositivos de gravação e câmeras pequenas. Já os RPAs táticos são categorias com plataformas mais pesadas e voam em grandes altitudes (entre 3000 a 8000 metros), eles são mais utilizados em operações militares. Os RPAs estratégicos voam em maiores altitudes e tendem a ser bem robustos, devido ao peso que tem que carregar dos equipamentos bem como para poderem ter grande alcance e atingir alturas elevadas. Essa classe de equipamento é também bastante utilizados na área militar (BENTO, 2008). A Figura 5 mostra a classificação quanto ao alcance e altitude.

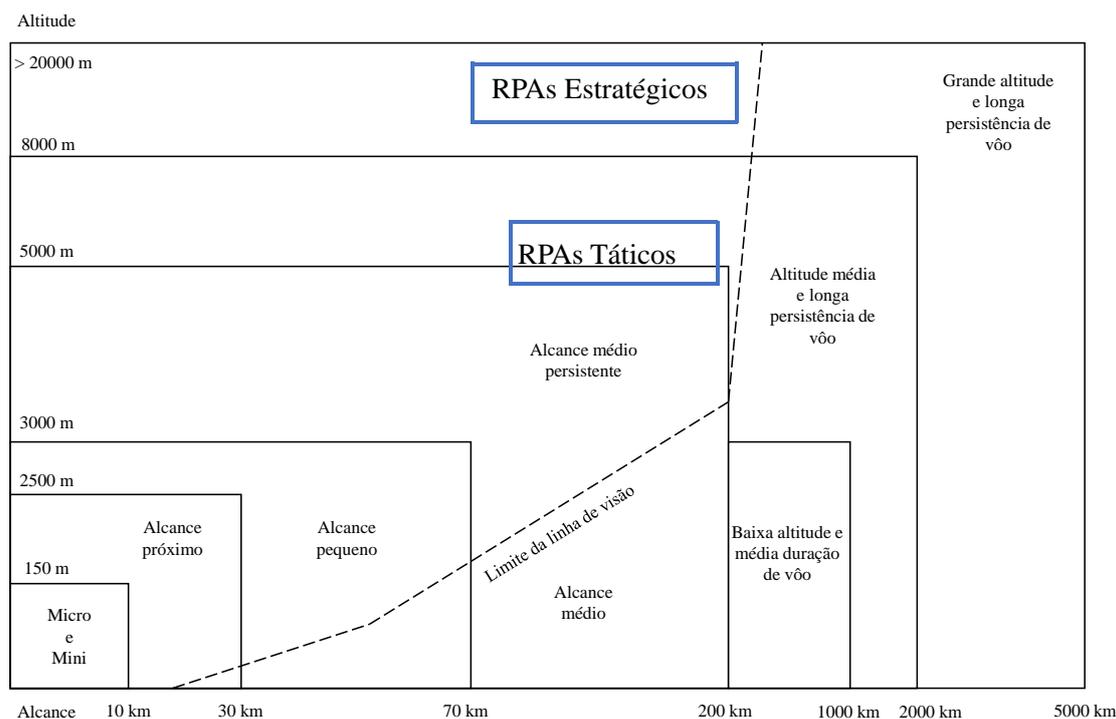


Figura 5. Classificação de RPAs quando a altitude e alcance, adaptado de Blyeburgh (1999)

Korchenko e Ilyash (2013) apresentam uma compilação de outras classificações através de outros tipos de características, totalizando 16 categorias, que são:

1) Aplicação das aeronaves – são divididos em: aviação militar, aviação civil e aviação antiterrorismo;

2) Tipo de sistema de controle – direto, são controlados por um operador no alcance de visão através de uma estação de controle terrestre. Monitorado, trabalha autônomo, mas pode ser potencialmente controlado por um piloto ou operador utilizando somente uma resposta através de outros subsistemas. Autônomo e não adaptativo, realiza ações pré-programadas sem um piloto humano a bordo e não tem a possibilidade de modificação do plano da ação estratégica durante o voo ou adaptação a mudanças externas, mas pode ser reprogramado antes de cada voo levando em conta mudanças de ambiente e coletando informação durante voos anteriores. Supervisionado, realiza gerenciamento de baixo nível com uma ajuda de sistemas embutidos ou estações terrestres, quando é gerenciado em alto nível é controlado por um operador. Autônomo e adaptativo I, o voo é controlado pelo sistema de aeronave não tripulado totalmente integrado sem a intervenção de um

operador ou o uso de estações terrestres de controle que possam ser reprogramados, levando em conta a mudança de ambiente ou novas aplicações;

3) Regras de voo – regras de voos visuais, o RPA está localizado e realiza um voo dentro da visão do piloto, o qual administra e controla durante o dia. Regras de voo instrumentais, o voo é executado em modo automático não somente em uma área visível, mas também em áreas cegas assim como durante a noite com um sistema de controle apropriado. Regras instrumento-visuais, quando são usadas regras visuais e instrumentais (por exemplo, decolar e pousar são visuais e a parte básica do voo é instrumental);

4) Classificação do espaço aéreo – segregado, onde os voos acontecem em áreas restritas, proibidas ou áreas especiais para voos de RPAs. Não segregados, espaço onde são permitidos o tráfego aéreo e serviços aéreos;

5) Tipo de aeronave – são divididos em aeronaves, helicópteros, convertiplano (combina um tipo aeronave e um tipo helicóptero) e o híbrido (combina um tipo dirigível com tipo aeronave e/ou tipo helicóptero);

6) Tipo de asas – podem ser classificados como fixo, geralmente utilizados em aeronaves e helicópteros. Também pode ser classificado como asas do tipo flutuante (mudam de forma, posição, tamanho no momento de pouso ou decolagem e o voo), são usados em convertiplanos;

7) Direção de decolagem e pouso – de acordo com a direção de decolagem podem ser classificados em horizontal, vertical, elevação múltipla. De acordo com o pouso pode ser horizontal, vertical, pára-quedas, sem parada, multi gatilho (combinação dos tipos de pouso);

8) Tipos de decolagem e pouso – de acordo com o tipo de decolagem pode ser aerodromo (realiza a decolagem em uma pista), lançamento (usa um sistema de partida), convés (decola de um convés utilizando um sistema de cabos ou gancho), aquático (decola da superfície da água), lançamento manual, decolagem não convencional e multi decolagem. Para o tipo de pouso pode ser classificado como aerodromo, ponto (realizado por um para-quedas), convés, aquático, sem parada, pouso não convencional e multi pouso;

9) Tipo de motor de aeronaves – motores elétricos, motores híbridos turboelétricos, motores de pistão, motores rotor-pistão, motores turbo hélices, motores a jato, motores eletrônicos de corrente alternada, entre outros;

10) Sistema de combustível – é dividido em sistema de combustível de aeronave descartável e sistema de combustível de multi aeronaves. O sistema de combustível de aeronave descartável é realizado em condições de produção pelo fabricante dentro da fábrica. Enquanto o sistema de combustível de multi aviões pode ser realizado: no solo, em plataformas, durante o voo;

11) Tipo de tanque de combustível – pode ser de dois tipos, o tipo básico e o tipo básico-reserva. O tipo básico possui um tanque principal e o tipo básico-reserva tem um tanque principal e um reserva (extra) ou mais tanques;

12) Número de exploração – dependendo do sistema de combustível pode ser descartável (sem parada; pouso) e exploração múltipla. Por exemplo, se não existir um sistema de pouso, é descartável, se o sistema de combustível de exploração múltipla é usado e tem um sistema de pouso, é um pouso descartável;

13) Categoria (de acordo com o peso e a distância máxima de voo do UAV) – são divididos em táticos (subdivididos em nano, micro, mini, alcance próximo), tático-operativo (subdividido em curto alcance), operativo (alcance médio e alcance médio persistente), estratégico-operativo (baixa altitude e longa persistência, e média altitude e longa persistência), estratégico (grande altitudes e longa persistência) e especial (veículos de combate não tripulados, letal, isca, estratosférico, exosférico e espaço);

14) Alcance de voo – próximo (raio de alcance menor que 40km), curto (menor que 70km), médio (abaixo de 300km), longo (abaixo de 1500km) e longa duração de voo (acima de 1500km);

15) Altitude de voo – baixa altitude (0,3 – 0,6 km), média altitude (6000 – 9000 km) e grande altitude (mais de 12000 km);

16) Funções da aeronave – podem ser divididos em observação, reconhecimento, monitoramento, ataque e reconhecimento, inteligência informacional, segurança eletrônica, comunicação, logística, suporte, entre outros.

2.4 Regulamentação

Muitas organizações estão categorizando os RPAs para fins da regulamentação de utilização civil, quanto ao peso e/ou altitude de operação, com o intuito de promover a correta utilização desses equipamentos e evitar acidentes. Uma organização internacional bastante importante formado por cerca de 191

países é a ICAO (*International Civil Aviation Organization*), esse grupo propôs guias técnicos e operacionais de questões aplicáveis para a integração de UAVs em espaços aéreos não segregados e aerodromos, um dos primeiros guias a serem lançados especificamente para VANTs foi o *Unmanned Aircraft System (UAS)* (Cir 328) em 2011 e mais tarde seguido do *Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS)* publicado em 2015 (ICAO, 2015). Grupos de autoridades locais como a FAA e a NASA nos Estados Unidos realizaram através de uma pesquisa pelo MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) uma proposta para classificação dos UAVs, como mostrado na Tabela 1. O Canadá, Austrália e Reino Unido utilizam o peso da aeronave para fazer a classificação dos RPAs (MADDALON *et al.*, 2013).

Tabela 1. Classificação de RPAs quanto a altitude e massa (MADDALON *et al.*, 2013)

Classe	Massa, m (Kg)	Área de operação	Altitude de operação, h (m)
Micro	$m < 0,9$	Local	$< 152,4$
Mini	$0,9 \leq m \leq 13,6$	Local	$30,48 \leq h \leq 304,8$
Tático	$13,6 \leq m \leq 45,35$	Regional	$457,2 \leq h \leq 5486,4$
Altitude Média	$45,35 \leq m \leq 1360,7$	Regional/Nacional	$5486,4 \leq h \leq 18288$
Grande Altitude		Regional/Internacional	$h > 18288$
Pesado	$m > 1360,7$	Nacional/Internacional	$5486,4 \leq h \leq 13716$

No Brasil, a ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) categorizou os RPAs quanto ao peso da aeronave, cada categoria exigirá certos requerimentos para a utilização dos equipamentos. De acordo com a ANAC, na classe 1 (peso maior que 150kg) as aeronaves deverão ser certificadas pela ANAC, serão registradas no Registro Aeronáutico Brasileiro (RAB) e pilotos deverão possuir Certificado Médico Aeronáutico (CMA), licença e habilitação, e todos os voos deverão ser registrados. Para a classe 2 (peso menor ou igual a 150kg e maior que 25kg) as aeronaves não precisarão ser certificadas, mas os fabricantes deverão observar os requisitos técnicos exigidos e ter o projeto aprovado pela Agência, também deverão ser registradas no RAB e pilotos deverão possuir CMA, licença e habilitação, e todos os voos deverão ser registrados. E por fim a classe 3 (peso menor ou igual a 25kg) se operados até 400 ft acima do nível do solo (aproximadamente 120 m) e em linha de visada que permita acompanhamento visual, serão apenas cadastrados (apresentação de informação sobre o operador e o equipamento), não será requerido

CMA nem será necessário registrar os voos. Entretanto, será exigida licença e habilitação somente para quem pretender operar acima de 400 ft. Na Tabela 2, pode ser observado um resumo do que será exigido, de acordo com cada classe. Essas informações estão todas contidas no Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial nº 94/2017 (RBAC-E nº 94/2017), sendo complementar as outras normas estabelecidas pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL).

Tabela 2. Tabela resumo das exigências de cada categoria de RPAs pela ANAC.

Fonte : <https://www.sonhosbr.com.br/anac-apresenta-as-regras-para-uso-de-drones-e-aeromodelos/>

	RPA Classe 1	RPA Classe 2	RPA Classe 3	Aeromodelo
Será requerido cadastro?	Não	Não	Sim	Não
Será requerido registro?	Sim	Sim	Não	Não
Será requerido aprovação de projeto?	Não	Sim	Simplificado	Não
Será requerido processo de certificação?	Sim	Não	Não	Não
Será requerida idade mínima de 18 anos?	Sim	Sim	Sim	Não
Será requerido Certificado Médico?	Sim	Sim	Não	Não
Serão requeridas licença e habilitação?	Sim	Sim	Apenas acima de 400 pés (120 m)	Não, mas limitado a 400 pés (120 m)
Será requerido registro dos voos?	Sim	Sim	Não	Não

Além de estar regulado pela ANAC também é necessário ter aprovação por parte da ANATEL, em virtude da utilização de rádio frequência nos controles remotos. Também é necessário solicitar acesso ao espaço aéreo brasileiro para o voo com o VANT, solicitando autorização de voo ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), salvo aqueles que sejam utilizados com o propósito de lazer, hobby ou competição. O DECEA já tem uma legislação para acesso do espaço aéreo para VANTs, que é o ICA 100-40, que regulamenta a utilização do espaço para aéreo para voos com RPAs.

2.5 Aplicações

As aplicações dos RPAs são as mais variadas, como por exemplo: agricultura de precisão, inspeção de estruturas, mineração, aplicações militares, aerofotografia, aerofilagem, fotogrametria, monitoramento da fauna e flora, sensoriamento remoto, entre outras. Uma das aplicações bastante faladas sobre a utilização de RPAs é na agricultura de precisão, Jorge e Inumasa (2014) relatam o uso de RPAs com diferentes sensores para a utilização na agricultura, através de câmeras no espectro visível (0,4 a 0,7 μ m) é possível obter imagens que auxiliam o produtor a visualizar falhas de plantio e acompanhamento do crescimento da planta. Para os sensores do infravermelho próximo (NIR) na agricultura podem ser verificados estresse nutricional e indicadores fisiológicos, a banda desse tipo de sensor próximo ao infravermelho fica na faixa de 0,7 a 1,3 μ m. Além disso pode se obter um índice de vegetação que é a combinação aritmética entre duas ou mais bandas que evidenciam algum componente de interesse, em que o índice mais conhecido é o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), criado a partir de operações com as bandas NIR e visível. Os sensores hiperespectrais diferentes dos sensores multiespectrais, podem registrar centenas de bandas contínuas através de diversas dimensões do espectro eletromagnético, podendo ser utilizados no estudo detalhado dos padrões espectrais das coberturas vegetais e espécies, os quais estão altamente associados a diversas propriedades fisiológicas e estruturais da planta. Sensores térmicos, podem ser utilizados para avaliar estresse hídrico e em conjunto com imagens hiperespectrais podem ser utilizados para determinar fluorescência direta no campo, ajudando no mapeamento de doenças e deficiência. Na Figura 6 podem ser observados alguns dos diferentes sensores que podem ser utilizados em mini VANTs, em virtude da miniaturização desses equipamentos estão sendo mais fáceis de serem embarcados nessa plataforma de voo.

Sensores



Figura 6. Tipos de sensores embarcados em mini VANTs

Primicerio et al (2012) seguindo os estudos na agricultura de precisão, utilizou-se de um RPA com uma câmera multiespectral para fazer estudos na reflexão da copa de vegetações em regiões de vinhedos, o estudo resultou em mapas de vigor das plantas, mostrando bons resultados de acordo com as observações realizadas em solo. Além disso Turner, Lucieer e Watson (2011) fizeram estudos parecidos em regiões de vinhedo e além de utilizarem câmeras multiespectrais para relatar estudos de vigor e saúde das plantas, utilizaram também câmeras termais para verificar a eficiência da irrigação. Rasi (2008) também utilizou-se de RPA na agricultura, em que desenvolveu e construiu um protótipo para pulverização em pequenas e médias propriedades, levando em consideração a diminuição de custos e riscos.

Outra área de grande potencialidade do uso de drones é na mineração, Rathore e Kumar (2015) discutem as várias utilidades que os RPAs podem ter na mineração, como por exemplo: segurança - em que os drones podem identificar áreas de risco dentro da área operacional da mina; produtividade – os drones podem mapear a mina, pilhas de estoque, reconciliação, detecção de fraturas; pesquisa e mapeamento geológico– eles podem mapear depósitos de minério, pontos de exploração, mapeamento do desenvolvimento da infraestrutura da mina. Além dessas aplicações, Annavarapu e Kumar (2015) também explanam a possível utilização e potencialidade do uso de drones de baixo custo em minas subterrâneas

com a finalidade de acessar áreas em condições de risco, a coleta de dados atmosféricos como concentração de gás, temperatura, umidade e níveis de poeira, coleta de dados em áreas de *stopping*, entre outras mais.

A utilização de drones na área de conservação ambiental através do monitoramento da fauna e flora é também uma aplicação crescente dos RPAs. Gallacher (2015) faz o estudo da utilização dos drones no monitoramento da população de animais, saúde dos animais, diversidade de plantas, biomassa de plantas e influências antropológicas e classificação de microhabitats em regiões de deserto. Além disso, Koh e Wich (2012) desenvolveram um RPA de asa fixa de baixo custo chamado de Drone de Conservação para mapear e monitorar florestas e a biodiversidade, realizando, por exemplo, detecção de várias espécies animais como orangotangos, elefantes, rinocerontes, provendo informações da densidade e rotina de circulação dos animais. Estudos também de contaminação de solo podem ser realizados por drones, como relata Capolupo et al (2015), em que foi realizado a combinação de fotos aéreas, modelagem de redes de micro riachos e índices de predições em pantanais para prever pontos de acumulação de cobre causadas pela agricultura na região de Campania no sul da Itália.

O uso de UAVs na fotogrametria se tornou a mais comum aplicação não militar (WHITEHEAD e HUGENHOLTZ, 2014), de acordo com Eisenbeiss (2009) os RPAs fotogramétricos podem ser entendidos como uma nova ferramenta de medida fotogramétrica. Além disso, abrindo várias novas aplicações em domínios de curto alcance, combinando a fotogrametria terrestre e aérea, mas também introduz nova aplicação em tempo real e alternativas de baixo custo em relação à clássica fotogrametria aérea tripulada. Porém, os RPAs só foram ganhar um certo destaque na área a partir de 2008, em Beijing, no congresso da Sociedade Internacional para Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ISPRS), onde foram relatados vinte e um artigos a respeito do uso de RPAs para a fotogrametria, sensoriamento remoto e mapeamento, a partir disso a frequência de artigos e sessões dedicadas a VANTs foram aumentando. Em outras comunidades e países também foram relatados artigos sobre UAVs, como por exemplo, no IEEE Sociedade de Geociência e Sensoriamento Remoto (IGARSS) desde 2005, no Congresso da Sociedade Americana para Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ASPRS), entre outros (COLOMINA e MOLINA, 2014). Trabalhos de Bendea et al (2007) e Eisenbeis (2009) utilizaram os drones para fotogrametria em estudos para

mapeamento arqueológico, em que foram desenvolvidos protótipos de RPAs de baixo custo gerando produtos com boa acuracidade e resolução, tais como o modelo digital de superfície (DSM) e ortoimagens. As ortoimagens são produzidas através da ortoretificação retirando os efeitos de perspectiva e o deslocamento de relevo das imagens, assim resultando em uma imagem corrigida com seus *pixels* uniformemente escalados, similares a um mapa.

Além dessas aplicações muitas outras possibilidades de uso de VANTs podem ser vistos, como por exemplo: uso de RPAs em ambiente de desastres com a finalidade estratégica de resgates (FERWORN et al., 2011; QUARITSCH et al., 2010); rápida resposta de imagens utilizando RPAs em simulações de acidentes de carros (HAARBRINK, 2006) e também no monitoramento do trânsito (SRINIVASAN et al., 2004; PURI, 2008); monitoramento de queimadas (BARRADO et al., 2010; CASBEER, 2006; RESTAS, 2006). Enfim, as possibilidades são vastas e a cada dia estão aparecendo mais aplicações, como pode se observar na Tabela 3 entre os períodos de 2005 a 2013, em que mostra o número de iniciativas para desenvolvimento e propósitos com os RPAs.

Tabela 3. Número de referência de RPAs, iniciativas de desenvolvimento e propósitos do ano de 2005 a 2013 (COLOMINA e MOLINA, 2014)

Itens	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
VANTs referenciados	544	603	789	974	1190	1244	1424	1581	1708
Fabricantes/Desenvolvedores	207	252	312	369	422	500	511	478	540
União de esforços internacionais	20	32	34	35	38	36	54	32	48
Países fabricantes	43	42	48	48	50	51	51	51	53
Propósitos de Desenvolvimento									
Civil/Comercial	55	47	61	115	150	171	175	217	247
Militar	397	413	491	578	683	631	674	548	564
Propósitos duplos	44	77	117	242	260	283	318	353	392
Pesquisa com VANTs	35	31	46	54	66	66	69	73	78
Desenvolvimento com VANTs	219	217	269	293	329	301	310	187	172

2.6 Desenvolvimento de RPAs

Apesar de existirem modelos comerciais no mercado já “prontos para voar”, instituições de ensino e empresas optam pela montagem ou desenvolvimento do próprio RPA. Isso devido a vantagens como custo e também possibilidade de adaptação e a customização do equipamento para aplicações específicas. Koh e Wich (2012) desenvolveram o próprio drone e relatam que tiveram desempenho similar aos modelos comerciais. No trabalho de Bendea et al. (2007) foi

desenvolvido um drone de asa fixa chamado *Pelican*, o RPA apresentava diferentes tipos de sensores fotográficos adequados para a fotogrametria digital satisfazendo a qualidade geométrica e radiométrica. Burkamshaw (2010) relata em sua tese, a construção de um quadricóptero de baixo custo com boa estabilidade e desempenho, utilizando peças de produção em larga escala.

No Brasil houve os primeiros relatos de RPAs, por volta da década de 80 com o projeto Acauã, que tinha fins militares e foi desenvolvido pelo Centro Tecnológico Aeroespacial (CTA). Já pra área civil foi realizado um projeto de um RPA de asa móvel chamado Helix, o qual foi desativado por falta do incentivo do governo (JORGE e INAMASU, 2014). Mais tarde, em 1997, o Centro de Pesquisa Renato Archer (CENPRA) iniciou um projeto chamado AURORA (*Autonomus Unmanned Remote Monitoring Robotic Airship*) (Figura 7), um dirigível com capacidade de operação autônoma com o objetivo de estabelecer um protótipo de baixo custo com desenvolvimento e domínio da tecnologia (MEDEIROS, 2007). Outras instituições que investiram no desenvolvimento de RPAs foram o Laboratório de Computação de Alto Desempenho do Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (ICMC – USP) em parceria com a EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), através do projeto ARARA (Aeronaves de Reconhecimento Assistidas por Rádio e Autônomas), sendo o primeiro RPA de asa fixa desenvolvido com tecnologia 100% brasileira, com o objetivo de fotografias aéreas para monitoramento de áreas agrícolas sujeitas a problemas ambientais (JORGE, 2001).



Figura 7. Dirigível Robótico Autônomo não tripulado para monitoração remota, CenPra.

Um outro projeto que envolveu o desenvolvimento de um RPA foi a parceria entre a UNB (Universidade de Brasília) e o DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral) com o objetivo de monitorar atividades ilegais na mineração. O projeto construiu um RPA, chamado de μ VANT, de asa fixa que possui 1,90 m de envergadura, capacidade de carga (*payload*) de 1 kg, peso total de 2,5 kg, motor elétrico *brushless*, baterias com capacidade de 5.000 mAh, câmera de vídeo para transmissão da visão frontal e câmera para registro fotográfico (Figura 8). Além disso, possui autonomia de voo de aproximadamente 90 min e o alcance de 4km a partir da base (BICHO et al., 2013). O RPA foi submetido a vários testes de campo e sofreu modificações para melhoramento da aeronave obtendo bons resultados de captura de imagens com boas resoluções.

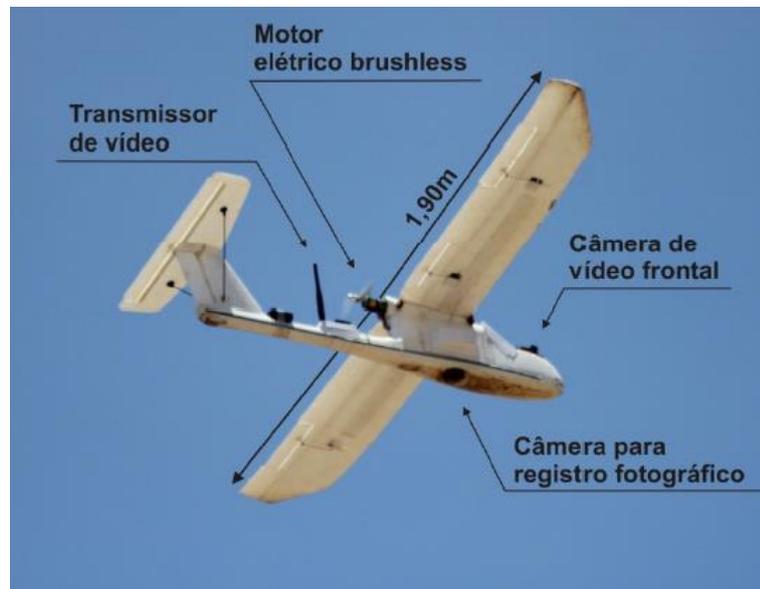


Figura 8. μ VANT desenvolvido pela UNB para o DNPM (BICHO, 2013)

O mercado brasileiro está se preparando para a crescente demanda e popularização dos RPAs, com algumas empresas que já saíram na frente produzindo seus próprios equipamentos e com diversos tipos de modelos. Os UAVs na sua maioria são produzidos para atender nichos específicos, como por exemplo, na agricultura, mapeamento, fotografia e filmagem, entre outros. A G-Drones é uma empresa especializada na geração de soluções para a coleta e análise de dados geográficos e ambientais, eles desenvolvem, montam e aplicam os drones para imageamento aéreo. Os modelos que comercializam são multirotores e asa fixa, como o G quad e o G plane, respectivamente, entre outros modelos. A XFly é outra

empresa brasileira que atua na produção de multirrotores, possuindo modelos como quadricópteros e hexacópteros, esses modelos são produzidos para atender as mais diversas áreas. Os modelos produzidos pela empresa são os: X550, Y600, X600, X700, X800, além de modelos para serem utilizados para diversão e lazer. A Xrobots é uma empresa brasileira especializada no desenvolvimento e fabricação de RPAs, ela se localiza em São Carlos, estado de São Paulo, e foi fundada em 2007. Os modelos produzidos são do tipo asa fixa e voltados mais para a área da agricultura. Os RPAs produzidos pela empresa são os: Arator 5A, Echar 20B e o Nauru 500B. Além dessas existem outras empresas como a Skydrones, Rio Drones, Horus, entre outras. A Tabela 4 mostra alguns modelos produzidos pelas empresas com algumas características dos RPAs e o preço aproximado para a aquisição do equipamento e na Figura 9 são mostrados alguns desses modelos fabricados pelas empresas no mercado nacional.

Tabela 4. Exemplos de empresas brasileiras e modelos de VANTs produzidos

VANT	Tipo	Empresa	Tempo de voo (min)	Payload (g)	Possibilidade de outros sensores	Preços (R\$)
G-quad	Multirrotores	Gdrones	14	150	Sim	14.800,00
G-octa	Multirrotores	Gdrones	18	400	Sim	21.850,00
G-plane	Asa fixa	Gdrones	60	500	Sim	23.850,00
G-surveyS	Asa fixa	Gdrones	60	500	Sim	25.850,00
G-surveyM	Asa fixa	Gdrones	~120	1300	Sim	39.850,00
X600	Multirrotores	Xfly	15	750	Sim	9.560,00
X700	Multirrotores	Xfly	20	1500	Sim	14.865,00
X800	Multirrotores	Xfly	30	2500	Sim	21.675,00
Arator 5A	Asa fixa	Xrobots	60	400	Sim	106.909,09

VANTs



Figura 9. VANTs das empresas G-drones, Xfly e Xmobots

Pode-se observar um enfoque das empresas brasileiras em produzir e desenvolver os próprios drones ou customizá-los para as diferentes demandas dos clientes. Além disso, instituições de ensino e órgãos públicos também estão desenvolvendo drones para diferentes aplicações. Dessa forma, torna-se de clara a importância do desenvolvimento de um protótipo para ser utilizado na coleta de dados de diversas naturezas, entre eles aerofotografia para estudo de casos reais, tendo em vista a diminuição de custo, robustez comparada com drones comerciais e também a aquisição de conhecimento mais aprofundado dos componentes que formam todo o conjunto do RPA (*hardware e software*).

2.7 Quadricóptero: definição e componentes eletrônicos

Um drone de asa rotativa do tipo quadricóptero é muito bem modelado com 4 rotores em uma configuração cruzada. Essa estrutura cruzada é um pouco fina e leve, entretanto é bem robusta através da ligação mecânica dos rotores. Todos os eixos de rotação das hélices são fixas e paralelas. As hélices da frente e da traseira da aeronave rotacionam em sentido anti-horário, enquanto os da esquerda e da direita giram em sentido horário. Essa configuração de pares de direção opostas retiram a necessidade de um rotor de cauda (BRESCIANI, 2008). Segundo Hoffmann et al (2007), o interesse da comunidade científica no projeto de um

quadricóptero pode estar ligado a duas principais vantagens como a decolagem e o pouso vertical, e o segundo é o uso de quatro rotores assegurando que cada rotor seja menor em diâmetro que um rotor principal equivalente a um helicóptero, em relação ao tamanho da fuselagem. Cada rotor, portanto, armazena menos energia cinética durante o voo, atenuando o risco causado pelos objetos arrastados pelos rotores. Além disso, colocando os rotores dentro do frame, eles podem ser protegidos contra danos em caso de colisões e permitindo voos dentro de locais fechados e ambientes com muitos obstáculos, com baixo risco de dano à aeronave, operador e pessoas ou objetos ao redor. A desvantagem do quadricóptero segundo Oliveira (2011), é o alto consumo relativo durante o voo.

Os quadricópteros possuem basicamente 4 tipos de manobras que podem ser alcançados através da mudança de velocidade dos 4 rotores. Mudando a velocidade relativa dos rotores direito e esquerdo, o ângulo de rolagem (ϕ) do quadricóptero é controlada. Similarmente, o ângulo de inclinação (θ) é controlado variando a velocidade relativa dos rotores dianteiros e traseiros, e ângulo de guinada (ψ) se dá variando a velocidade dos pares de rotores de sentido horário e anti-horário. Aumentando a velocidade ou diminuindo a velocidade de todos os 4 rotores, simultaneamente, é controlado o impulso coletivo (RAZA, 2010). A figura mostra o resumo desses 4 tipos de movimento do quadricóptero.

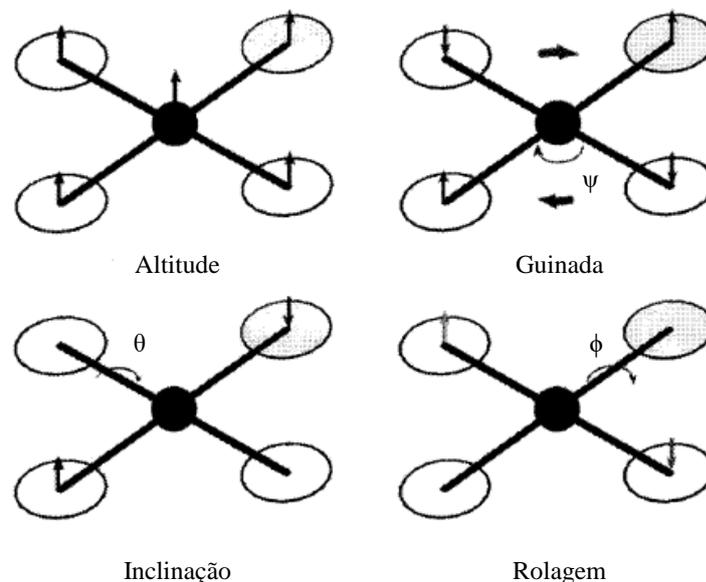


Figura 10. Movimentos básicos de um quadricóptero (RAZA,2010)

Além da dinâmica de um quadricóptero para a movimentação da aeronave, existem também os componentes eletrônicos necessários para o equipamento funcionar, que são: os rotores, o controlador de voo, os controladores eletrônicos de velocidade (ESCs) e a bateria.

O sistema de propulsão da aeronave consiste dos rotores, as hélices e os controladores eletrônicos de velocidade (ESCs). Os rotores utilizados são do tipo rotor eletrônico, eles são excitados para girar com a ajuda de acoplamentos magnéticos (NILSSON e MODRACK, 2013). A maioria dos rotores possuem três terminais conectados a um estator (também conhecido como fases) em uma configuração em Y. Ímãs permanentes são posicionados sobre o rotor com os pólos em frente ao estator alternando entre norte e sul. Os ESCs controlam a rotação dos rotores através da seletividade de energização das fases do rotor, quando a corrente atravessa o estator, a carga elétrica em movimento interage com o campo magnético do rotor e gera força sobre ele, o qual pode causar a rotação (TEFAY et al, 2011). Através dessa interação entre ESCs e rotores é possível fazer as hélices girarem produzindo a propulsão para fazer a aeronave voar.

O controlador de voo é o coração do sistema de controle. Ele controla diferentes velocidades dos motores, lê informações dos sensores como o barômetro, magnetômetro, acelerômetro, giroscópio e GPS, provê controle de altitude, entre outras funções (KO e LWIN, 2014). Alguns controladores frequentemente encontrados no mercado são: NazaM Lite, DJI A2, DJI A3, Kkmini, PixHawk, APM, entre outros. Alguns deles possuem código aberto, como por exemplo, a APM e a PixHawk, o que permite desenvolvedores implementarem códigos para essas controladoras. Atualmente, novas funcionalidades estão sendo embarcadas nas controladoras, como por exemplo, o *fail safe*, que é um modo de segurança para quando determinadas situações de falha de comunicação da aeronave com o rádio controle ocorrem, fazendo com que a aeronave volte para onde ela levantou voo, a função “siga-me” onde a aeronave segue o piloto, entre outras. Na Figura 11 pode ser observado alguns dos controladores de voo existentes no mercado.



Figura 11. Controladoras de voo

2.8 Ferramentas de ensino e treinamento

Manning et al (2004) fizeram um estudo na área militar a respeito dos acidentes de UAVs, foram identificadas as três maiores causas de acidentes, que são: humana, material e ambiental. A causa humana é relacionada aos erros cometidos pelos operadores, que são inerentes ao ser humano, funções e comportamento. Fatores do material incluem a falha dos equipamentos e danos que podem resultar de falha de projeto, componentes ou falhas de sistemas, etc. Fatores ambientais incluem ruído, iluminação e condições ambientais (ex: precipitação, temperatura, umidade, pressão, vento, raio, etc), os quais podem afetar o desempenho do equipamento. Porém os fatores humanos são citados como os maiores causadores de acidentes, devido a cansaço, falha em coordenação de grupo, alta/baixa carga de trabalho, etc. Além disso, com a popularização e a facilidade de aquisição de drones e principalmente sendo utilizados por pessoas que tem pouco ou nenhum conhecimento em operar esses tipos de veículos, a taxa de acidentes tende a aumentar. Portanto, torna-se de extrema importância o mínimo de conhecimento de operação do equipamento, através de treinamentos práticos e/ou realizados por simulação.

Um dos métodos utilizados para aprendizagem é a solução de problema, ele promove uma abordagem integral efetiva e uma aprendizagem significativa (JONASSEN, 2004). Segundo Polya (1957 apud LIU, CHENG e HUANG, 2011)

os aprendizes precisam entender o problema, inventar um plano e testá-lo, enquanto estão solucionando o problema. Em particular, os jogos de simulação em computadores permitem os estudantes experimentarem esse processo de descoberta científica como geração de hipóteses, projeto de experimentos e interpretação de dados. Além das vantagens de serem utilizados em diversas áreas, como na medicina, exploração científica, treinamento de pilotos, treinamento de motoristas, entre outros. Segundo Kim et al 2009, os jogos de computadores podem ser uma abordagem efetiva que fornecem suporte dentro de simuladores computacionais para ajudar estudantes a resolver problemas promovendo a aplicação de lógica, memória, visualização e solução de problemas em contextos autênticos promovendo o aprendizado.

Diferentemente dos jogos, os simuladores podem ser definidos como modelo simplificado, dinâmico e acurado da realidade que é um sistema usado para aprendizagem de contexto. Além disso, simuladores não necessariamente envolvem conflito ou competição, e os usuários não estão tentando vencer, como sempre estão fazendo em jogos. Um jogo de *videogame* é criado muitas vezes sem qualquer referência ou distantes da realidade, que não é o caso para os simuladores, os quais tentam reproduzir com fidelidade e similaridade a realidade que o representa. Muitos dos simuladores educacionais, diferentemente dos jogos, podem funcionar sem intervenção humana, como por exemplo, uma representação dinâmica de um movimento planetário em um sistema solar (SAUVE et al, 2007). Entretanto, Amory (2007) aponta que é possível construir jogos de *videogame* para educação, porém isso implica integrar estratégias instrutivas e atividades lúdicas em benefício de uma certa finalidade educacional. El-Nars et al. (2010) citam que os jogos apresentam grandes possibilidades para o desenvolvimento do conhecimento, do ensino e das práticas de aprendizagem em escolas, especialmente para aqueles de natureza colaborativa e cooperativas. Como o objetivo é criar uma ferramenta computacional para treinamento de voo, os simuladores se encaixam melhor para atender o escopo do trabalho, devido a necessidade de recriar com fidelidade os comandos para controlar a aeronave.

A história dos simuladores começa antes da Segunda Guerra Mundial, onde os primeiros modelos eram simuladores de voo utilizados para treinamento. A princípio foram utilizados para reduzir custos operacionais sobre o uso dos equipamentos. Na metade dos anos 60 houve um declínio nas atividades do uso dos

simuladores, devido ao insuficiente estado da arte de exibição visual e tecnologias computacionais, mas isso foi superado no final dos anos 60. Muitas das tecnologias foram desenvolvidas pela NASA para dar suporte aos programas espaciais, segundo Blana *apud* Roberts, 1980. Atualmente, os simuladores de voo são partes vitais para a pesquisa aeronáutica, sendo utilizados tanto para treinamento militar como treinamento para uso da aviação civil. A simulação permite aos pesquisadores combinarem equipamentos reais, condições ambientais e tarefas demandadas com a habilidade para controlar eventos e condições (REHMANN, 1995). Com o avanço da tecnologia, os modelos desenvolvidos para simuladores estão cada vez mais tendo alta fidelidade à realidade, como por exemplo plataformas que simulam uma cabine em escalas reais de um avião (Figura 12).

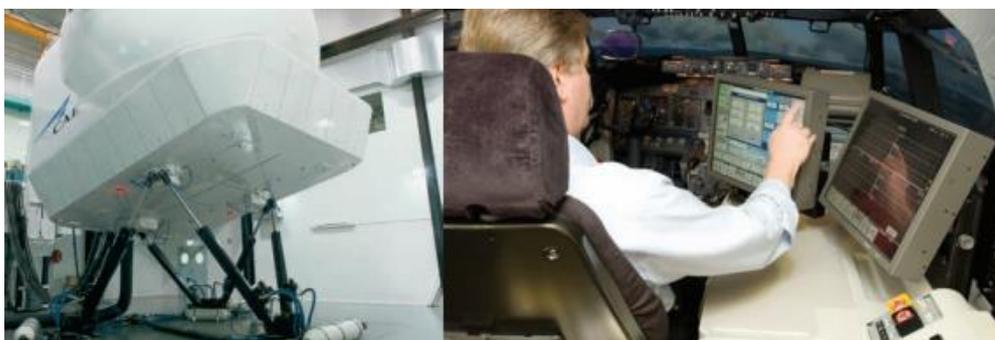


Figura 12. Simulador de voo.

Fonte: www.cae.com

Bicho (2013) relata que o aspecto crucial no projeto de desenvolvimento do protótipo do DNPM, consistiu também no treinamento dos operadores, que foi realizado em cinco etapas: 1) Treinamento teórico e instrução de uso do simulador; 2) Voo em simulador; 3) Voo em terceira pessoa; 4) Voo em primeira pessoa; 5) Operação de μ VANTs. O treinamento durou cerca de 15 meses e mais de 260 horas para cada piloto. O RPA em questão é um modelo de asa fixa o que apresenta maior dificuldade de pilotagem em comparação aos de asa rotativa. Entretanto, os modelos de asa rotativa mesmo sendo de fácil pilotagem são também passíveis de acidentes e falhas. Além disso, Kozuba e Bondaruk (2014) também relatam a importância de simuladores de voo como ferramenta de treinamento, em que o principal argumento a favor do amplo uso dos simuladores nos treinamentos de voo são os resultados de estudos relacionados com a transferência de conhecimento e

habilidades. Além disso, outros fatores importantes para o uso de simuladores, são: segurança, economia, técnicas, metodologia, entre outras. No trabalho de Harris e Harris (1998), eles examinaram o impacto dos simuladores de treinamento em treinamentos práticos utilizando o *Microsoft Flight Simulator* (um jogo de computador), separando dois grupos de estudo: um receberia o treinamento com o simulador de voo e o outro grupo que não receberia o treinamento com o simulador. Ao final foi realizado um estudo comparativo em que o mostrou que o grupo que obteve melhores resultados foi o grupo que teve a sessões com o simulador de voo antes de fazer o treinamento prático.

É possível verificar a importância do uso dos simuladores no treinamento de pilotos, tornando-se uma ferramenta de grande ajuda na capacitação dos operadores e equipe de pilotagem. Assim, pode-se pensar na utilização de simuladores para treinamento de voo com drones, devido à exigência da regulamentação por parte da ANAC e também no ensino do uso desses equipamentos por pessoas que vão ter o primeiro contato. Existem alguns simuladores comerciais de voos de drones no mercado, como por exemplo: o DroneSim Pro, RealFlight Drone Flight Simulator, Aerofly RC7 Flight Simulator, Phoenix v5.0, Heli-X6. Já se observa uma preocupação desse mercado de simuladores para a área de drones. As vantagens de utilizar esse tipo de ferramenta, seriam: evitar acidentes com o equipamento, proporcionar o primeiro contato com a utilização do drone, desenvolver sensibilidade e reatividade do equipamento aos comandos, desenvolver habilidade de pilotagem e observação por sistemas de FPV (first person view), entre outros. Assim, o desenvolvimento de uma ferramenta de ensino, que possa ser utilizado para treinamento de voo e o desenvolvimento de recursos humanos capacitados, ou minimamente expostos ao ambiente de voo, seriam de grande importância para atender pessoas com interesse de operar esse tipo de equipamento e proporcionar a utilização de maneira correta e segura.

Alguns desses simuladores foram testados para verificar as funcionalidades que eles proporcionam ao usuário. Entretanto, somente aqueles com versões de demonstração gratuitas foram utilizados para realizar alguns testes. O primeiro a ser utilizado foi o DroneSim Pro, esse simulador de voo de drone apresenta boas funcionalidades para aqueles que procuram um software para treinamento de voo. A versão de demonstração permite ao usuário utilizar um modelo de aeronave bem conhecido no mercado e acesso a um cenário para realizar o voo. Além disso, é

possível ter acesso a informações de altitude, velocidade, direção de voo e distância percorrida entre o operador virtual e o drone. É possível também ter acesso a visão da câmera do drone simulando a transmissão de vídeo através da câmera do drone. Para controlar o drone é possível utilizar um controle de videogame via usb do computador ou utilizar o teclado ou até mesmo comunicar com rádio controle. Apresenta vantagens de ser bem intuitivo para usuários inexperientes, compatibilidade com sistemas windows e mac, pode ser utilizado controles usb para pilotagem da aeronave, possibilitar visão do piloto e da aeronave, entre outros. Alguns desvantagens observados na versão gratuita seriam, não tem possibilidade de mexer na velocidade do drone, não possui outros modos de voo, entre outros. O simulador está custando \$29,99 dólares e pode ser adquirido no próprio site da empresa que o está desenvolvendo. A Figura 13 mostra um exemplo de cenário disponível na versão gratuita.

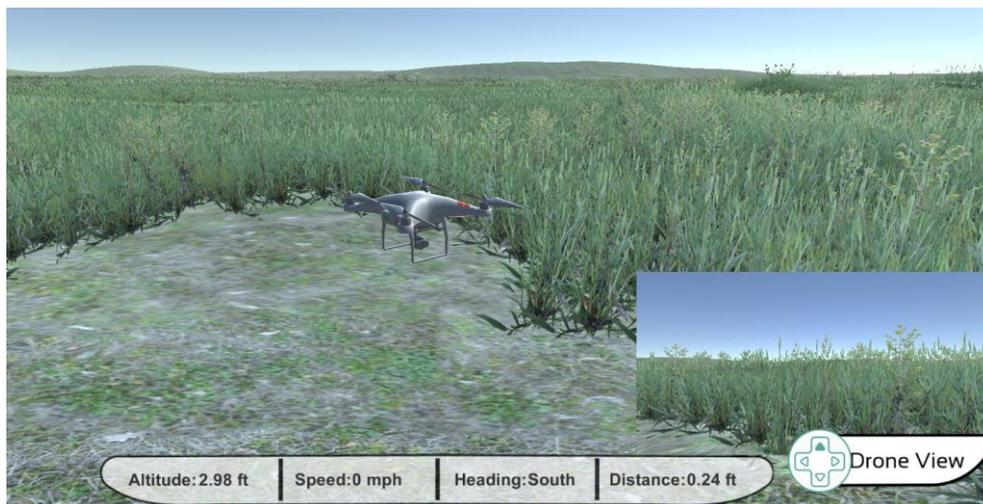


Figura 13. Interface do DroneSim Pro versão de demonstração

O RealFlight Drone Flight Simulator é um simulador que apresenta várias funcionalidades interessantes, como por exemplo: utilização de vários tipos de modelos de drones, cada um com suas características; além do voo em si, é possível treinar a utilização da câmera do drone; é possível utilizar modos de voo; pode ser utilizado um rádio controle para controlar o drone. Além disso, é possível simular a direção do vento e o ambiente. O simulador apresenta requerimentos baixos para ser utilizado em computadores, porém só é executável em sistemas Windows. O simulador apresenta um custo elevado, cerca de \$119,97 dólares e não possui

versão de demonstração. Entretanto, aparenta ser um dos simuladores mais completos existentes no mercado.



Figura 14. RealFlight Drone Flight Simulator.

Fonte: <http://www.realflight.com/drone/images/drone-inset-skills-lg.jpg>

O Heli-X6 é um simulador de voo de modelos de aeronaves desenvolvido usando Java, possuindo bastante funcionalidades, modelos diferentes de helicópteros e multirrotores. Além disso, o software possui várias funcionalidades interessantes, como por exemplo: mudança de cenários, modos de treinamento, faz a gravação do voo para futuras consultas do voo, utilização de vários modelos de aeronaves, informações de voo da aeronave, entre outros. O simulador possui também versão de demonstração, em que é possível utilizar alguns modelos de aeronaves, dois cenários para voo, alguns modos de treinamento, entre outras funções. A interface do simulador é bem limpa, mas ao se colocar várias informações na tela, pode tornar um pouco incômoda a navegação, mas isso pode ser configurado nas opções, deixando somente o cenário e o modelo que se deseja controlar. A figura abaixo pode-se ver a interface do Heli-X6.



Figura 15. Interface Heli-X6

Alguns simuladores para dispositivos móveis também foram testados, como o RC Drone Quadcopter, Drone simulator e o Free Flight Drone Simulator. Os simuladores para celular apresentam interfaces e gráficos bem simples, e o controle se dá através da tela touchscreen do celular. É possível escolher outros modelos de drone, porém em um desses softwares é necessário fazer compra dentro do aplicativo para liberar outros drones. O simulador Free Flight Drone Simulator, apresenta informações interessantes a respeito da altura, direção, velocidade e rotações de cada rotor do drone. Na figura abaixo é possível observar as interfaces de cada simulador.

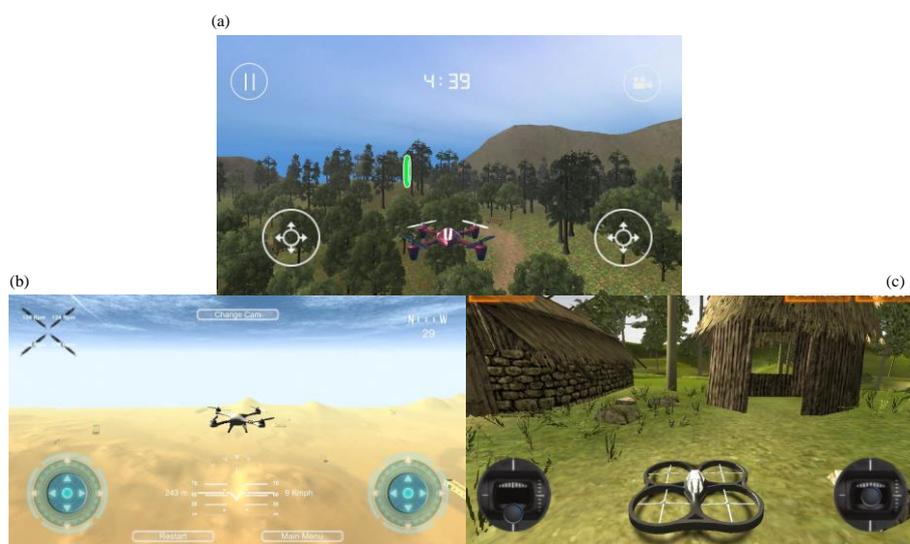


Figura 16. Interfaces do Drone Simulator (a), Free Flight Drone Simulator (b) e RC Drone Quadcopter (c)

Após testar algum desses simuladores, pode-se observar o potencial desses tipos de softwares para o treinamento de voo e aliar com treinamentos práticos. Pôde-se verificar alguns aspectos, como: as interfaces gráficas de todos os softwares são bem simples, o que apresenta a vantagem de não precisar de computadores de alto desempenho na hora de utilizá-los; poucos apresentam possibilidade de utilização para adaptar rádios controles; não foi encontrado simulador que é possível a utilização de realidade virtual; utilização de vários modelos de aeronaves; para ter acesso a todas as funcionalidades dos simuladores é necessário realizar a compra dos mesmos. Com o objetivo de desenvolver uma ferramenta de treinamento, procurou-se observar os simuladores existentes no mercado para se ter como base do que pode ser construído e promover avanços. Por fim, a utilização da ferramenta deverá proporcionar a experiência de controle da aeronave e a imersão do usuário através da utilização da realidade virtual, e assim promover o primeiro contato de treinamento para depois se ter contato com um equipamento real.

2.9 Ambientes de desenvolvimento

Para o desenvolvimento da ferramenta optou-se pela utilização de plataformas gráficas (*Game Engines*), que são o coração de qualquer jogo de computador. Muitas vezes o ambiente gráfico é acoplado unicamente para um determinado jogo. Já um motor gráfico robusto é modular, reutilizável e flexível o bastante para ser utilizado em diversos jogos que são similares. Ele é geralmente feito e otimizado para um tipo particular de jogo. Esses tipos são: jogos de tiro em primeira pessoa, estratégia em tempo real, simuladores de veículos, entre outros (HARRISON, 2003). As vantagens de utilizar esses tipos de softwares são de aproveitar todos os recursos de desenvolvimento existentes neles, como por exemplo, recursos de iluminação, criação de cenários, física de ação e reação, renderização de imagens, entre outros (NAVARRO, PRADILLA e RIOS, 2012).

Existem diversos motores gráficos, alguns são específicos para determinados tipos de jogos e outros podem ser utilizados para o desenvolvimento de diversos tipos de aplicações. Os motores gráficos mais famosos que são utilizados para diversos tipos de jogos, são: Unreal Development Kit (UDK), Unity e CryEngine. Esses motores gráficos possuem licenças de uso gratuito, porém para

propósitos não comerciais e possuem grande apelo para desenvolvimento de aplicações científicas (LV et al., 2013). Além desses motores gráficos comerciais, existem também os de código aberto, como: Blender Game Engine, OGRE, JMonkey.

A plataforma UDK foi lançada pela Epic Games Inc. e hoje está na sua versão Unreal Engine 4. É utilizada por estúdios profissionais e também por desenvolvedores independentes. Sendo uma plataforma bastante avançada, possui diversas ferramentas para fácil criação de grandes jogos, que podem funcionar em videogames, computadores e dispositivos móveis, faz o uso da linguagem C++ para codificação dos jogos (MAT et al., 2014). Além disso, a plataforma vem se aprimorando e adicionando novas funcionalidades com as atualizações recorrentes.

Outro motor gráfico bastante utilizado é o Unity, esse software é desenvolvido pela Unity Technologies na Dinamarca. A plataforma possui uma comunidade de desenvolvedores bem ativa, pode ser utilizado com várias linguagens de programação (C#, Javascript ou o Boo), os jogos podem ser desenvolvidos para várias plataformas, além de possuir bastante documentação e tutoriais para ajudar os desenvolvedores (LV et al, 2002; CRAIGHEAD, et al., 2008; MAT et al., 2014).

A plataforma CryEngine é propriedade da Crytek Inc. e é um dos motores gráficos mais completos e premiados. A CryEngine provê um ambiente rico para a criação de jogos, possui uma gama de ferramentas para criação de terreno e vegetação que proporciona alto grau de realismo e qualidade, a animação de personagens é baseado em um simples esquema de esqueleto, que permite a criação de movimentos realistas (NAVARRO, PRADILLA e RIOS, 2012; MAT et al, 2014). Além disso possui um poderoso editor em tempo real chamado WYSIWYP (What You See Is What You Play), que quer dizer em tradução literal “o que você vê é o que você joga”. O motor gráfico está atualmente na sua versão CryEngine 3.

Pode-se encontrar motores gráficos de código aberto como o Blender Game Engine, que é um sistema 3D de modelagem, animação, composição, renderização e desenvolvimento de jogos e simulações em tempo real. Ele utiliza blocos lógicos como um caminho visual para a criar interações dentro do jogo e além disso é composto por diversas bibliotecas externas. Além do Blender existe o jMonkey Engine que é uma API (Application Programming Interface) gráfica escrita em Java

que provê uma arquitetura gráfica de cenário. Pode ser usado para criar jogos que rodam em qualquer plataforma com a Máquina Virtual Java, além de ser baseado na plataforma Netbeans, um ambiente de desenvolvimento integrado, em que possui criação de terreno, manipulação de modelos 3D, criação de sombras e codificação de jogo em Java. Outra plataforma também de código aberto é OGRE3D (*Object-Oriented Graphics Rendering Engine*), esse motor gráfico foi desenvolvido por Steve Streeting e é mantida pelo time Ogre. O motor gráfico é codificado em C++ e possui suporte para animações, controle de cena, diferentes técnicas de renderização, sistema de partículas, entre outras mais (NAVARRO, PRADILLA e RIOS, 2012; ROCHA, ROCHA, ARAÚJO, 2010). Pode-se observar também uma grande variedade de motores gráficos de código aberto sendo utilizados para a criação de jogos, cada uma possuindo suas particularidades e funcionalidades.

Por fim, há uma gama de motores gráficos que podem ser utilizados, possuindo boas funcionalidades e proporcionando ao usuário rapidez e qualidade no desenvolvimento de jogos ou ambientes de interatividade. Sendo assim, o ambiente de desenvolvimento que vai ser escolhido para criar a ferramenta educacional terá que proporcionar a implementação de interfaces de simuladores, além de permitir funcionalidades de desenvolvimento de jogos. A escolha de um bom motor gráfico se faz necessário para se aproveitar dos ótimos recursos de desenvolvimento para a implementação da ferramenta educacional. Além disso, a implementação do *software* vai seguir a metodologia dos autores Santos, Góes e Almeida (2012), que destacam 3 fases na metodologia de criação de jogos, que são:

- Design e Projeto, em que são analisados os requisitos da aplicação e definidas as características desejadas;
- Produção, pautada na criação dos recursos necessários e aprimoramento estético;
- Implementação, que consiste em unir o que foi produzido, codificado e testar o aplicativo.

CAPÍTULO 3

3. Metodologia

O estudo consiste no desenvolvimento de um protótipo de RPA de asa rotativa que possa ser utilizado na aquisição de imagens aéreas para futuros processamentos de imagens, gerando produtos com precisão adequada para aplicações de inspeção e mapeamento local. Além disso, uma ferramenta computacional imersiva será desenvolvida para ajudar pilotos iniciantes a utilizar o equipamento da melhor maneira, com o intuito de produzir pessoas capacitadas e treinadas.

3.1. Projeto e configuração da aeronave protótipo

A primeira fase da construção do protótipo foi a aquisição de peças, em que serão levantados os componentes principais para a montagem de um RPA. Para cada componente será verificado o custo e seu benefício para compor o drone, com o objetivo também de maximizar o funcionamento do RPA e de minimizar o custo de construção da aeronave. Isso foi realizado, por exemplo, comparando controladoras de voo, em que foram verificadas as funções presentes em cada uma, suas vantagens e desvantagens. A escolha também da potência dos rotores e tamanho de hélices, será também muito importante para definir o peso que o drone poderá levantar. Além disso a escolha da bateria para definir o tempo de voo da aeronave, sabendo que o peso da aeronave também influencia no consumo da bateria e conseqüentemente no tempo de voo. A escolha do *frame* da aeronave foi definida de acordo com a configuração de número de rotores que a aeronave deveria possuir, caso a configuração escolhida fosse um hexacóptero, por exemplo, deverá ser adquirido um *frame* que comporte essa configuração.

Para a estrutura do RPA optou-se um *frame* que fosse possível a montagem de um quadricóptero. Além disso, que pudesse comportar toda a estrutura eletrônica. Foi escolhido então um kit da empresa DJI chamado *Flamewheel 450* (F450) (Figura 17), a estrutura (ou *frame*) atende os requisitos de montagem de um quadricóptero, possuindo uma armação com um distribuição de energia, em que são soldados os conectores dos controladores eletrônicos de velocidade (ESCs) (Figura

18). O kit ainda permite acoplar trens de pouso de diferentes tamanhos e gimbal para colocar câmeras, sendo uma plataforma bem versátil para customização de drones para FPV (*First Person View*), aerofotografia, hobby, entre outros usos. De acordo, com os dados do fabricante a plataforma tem capacidade de peso de decolagem até 1,6 kg, sendo capaz de carregar câmeras de pequeno a médio porte. Os rotores, ESCs e hélices adequados para o *frame* acompanhando o kit.

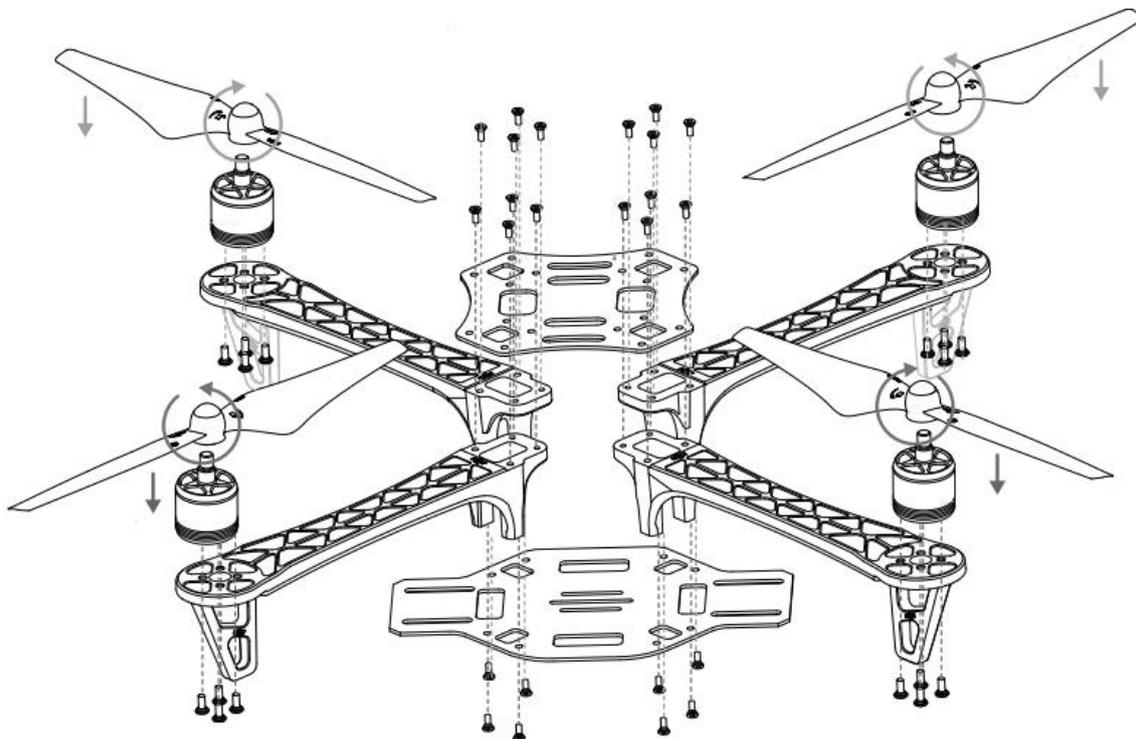


Figura 17. *Frame* F450.

Fonte: http://dl.djicdn.com/downloads/flamewheel/en/F450_User_Manual_v2.2_en.pdf

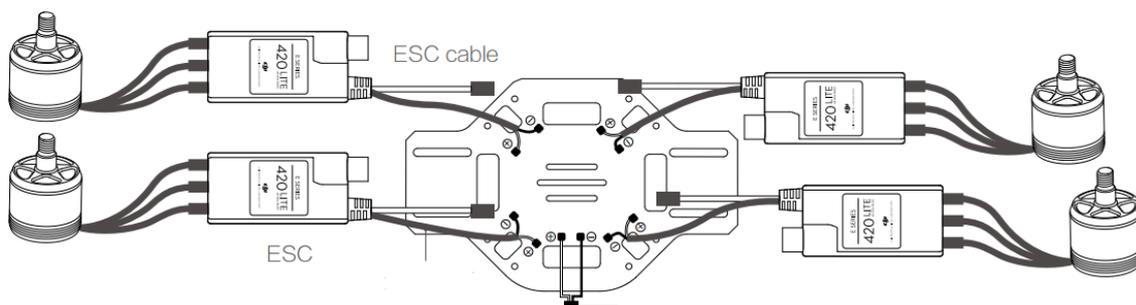


Figura 18. Ligação dos ESCs e rotores ao frame.

Fonte: http://dl.djicdn.com/downloads/flamewheel/en/F450_User_Manual_v2.2_en.pdf

As hélices presentes no Kit são as 9450 da DJI 2 hélices com sentido horário e 2 hélices com sentido anti-horário de tamanho 24 cm de diâmetro e de

peso 13 g, cada hélice. O conjunto vem com total de 4 pares, sendo desse total duas sobressalentes. Além disso, é composto por 4 rotores de 920 Kv (Kilovolts) e controles eletrônicos de velocidade de 30 A. Assim, formando toda a parte do sistema de propulsão da aeronave, pode-se observar a representação das hélices e dos rotores na figura 17 e os ESCs na figura 18.

Na escolha da controladora de voo, procurou-se verificar modelos que já tivessem bastante aceitação e utilização no mercado, tivessem bom desempenho relatado pelos usuários, robustez em termos de funcionalidade, possibilidade de desenvolvimento de interface, qualidade das peças, entre outras características. Assim, depois de verificar as opções disponíveis no mercado, optou-se pelo modelo Pixhawk (Figura 19) da 3D Robotics, fabricante norte-americano, a despeito do amplo domínio chinês no mercado de Drones. Além dos aspectos mencionados anteriormente, a escolha desse modelo ainda considerou o aspecto de ser uma controladora robusta que já integra sensores de giroscópio, acelerômetro, magnetômetro e barômetro embutidas na controladora, que são utilizados para orientação e posição do veículo (KO and Lwin, 2014). Além disso, trata-se de uma controladora *open hardware*, ou seja, pode ser modificada, estudada e distribuída, e também apresentando uma comunidade de desenvolvedores e usuários grande e ativa. Um esquema é apresentado na Figura 20 mostrando um resumo dos componentes ligados à controladora de voo.



Figura 19. Controladora de voo Pixhawk.

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

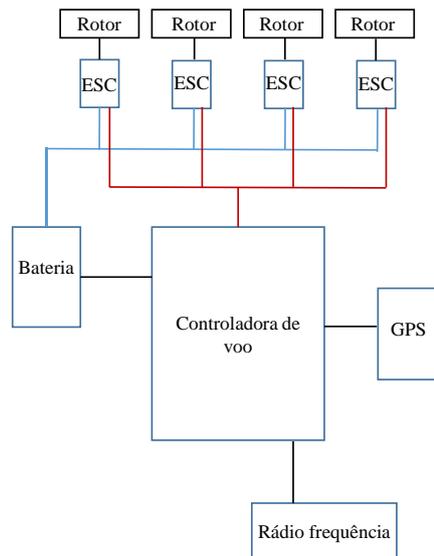


Figura 20. Esquema resumo da parte eletrônica do drone.

Fonte: adaptado de BURKAMSHAW, 2010.

A segunda fase do desenvolvimento do protótipo foi a fase de testes, em que realizou-se testes de voo para observar se o drone atingiu requisitos como: estabilidade de voo, respostas boas de manobras, realização de planos de voos automáticos com *softwares* específicos, aquisição de dados com o sensor embarcado. Nesta fase será necessário fazer visitas em campo para testar o protótipo, observando o comportamento em condições reais de aquisição de dados e também fazer comparativos entre o protótipo e modelos comerciais. Portanto, é uma fase muito importante, pois através da coleta desses tipos de informações será definido as possíveis alterações para melhoramento e também chegar a um modelo final de protótipo.

Os primeiros testes a serem realizados serão os testes de funcionamento do equipamento, em que após a configuração, será feito um teste de decolagem e pouso. Nesse teste será observado se os comandos e parâmetros configurados estão respondendo adequadamente. Além disso, será observado se a aeronave está com movimentos suaves de voo e não apresenta nenhuma instabilidade ou dificuldade de voo. Outro ponto importante é observar o tempo de voo da aeronave com as baterias utilizadas na aeronave. Os testes devem ser realizados em campo aberto ou em um local fechado que tenha um certo espaço para proporcionar o voo do equipamento. Os resultados desses testes permitirão determinar um desempenho em termos de autonomia de voo do equipamento considerando ainda carregamentos

variáveis com a inclusão dos demais componentes a serem embarcados (Gimbal, sensores, a própria bateria, outros acessórios)

Os testes utilizando planos de voos para aquisição de dados terão que ser realizados em campo, pois será necessário um espaço maior para que o equipamento possa fazer voos sem encontrar obstáculos. Serão utilizados softwares específicos para esses planos de voo, como por exemplo, o *mission planner*. Os softwares de planejamento de voo facilitam a tomada de fotos e deixam o voo de forma automática, porém em casos de emergência em que há, por exemplo, rajadas de ventos inesperadas, terrenos irregulares para pouso e decolagem, problemas no equipamento, entre outros fatores, faz-se necessário a presença de um piloto experiente para assumir e promover a melhor forma de solucionar aquela situação. Abaixo é mostrado na figura 21 um fluxograma resumo de atividades envolvidas na montagem do protótipo.

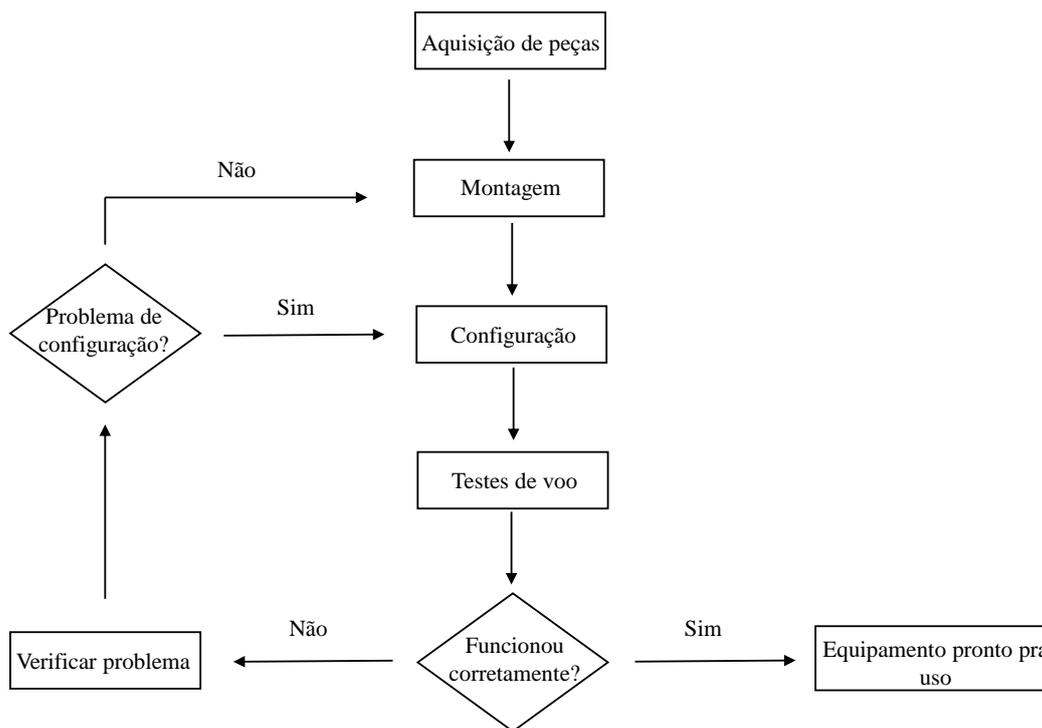


Figura 21. Fluxograma resumo da montagem do protótipo

3.2 Desenvolvimento da plataforma de treinamento

Para o desenvolvimento da ferramenta de treinamento de voo, será necessário o estudo de plataformas gráficas, como por exemplo, Unreal Engine, Unity e a CryEngine. Levou-se em consideração as seguintes características: grande

quantidade de comunidade ativa, disponibilidade gratuitas de ferramentas para desenvolvimento, facilidade de desenvolvimento, entre outras. Além de verificar trabalhos utilizando essas plataformas, tutoriais e guias também foram verificados para analisar características de cada plataforma. Assim, a plataforma escolhida para o desenvolvimento foi o Unity, devido a grande quantidade de material disponível, comunidade bem ativa, tutoriais presentes na internet e pode se implementar em diversas linguagens, como o javascript e o C#.

Na fase de design e projeto, é proposto um simulador de voo de drone, em que o usuário poderá controlar um drone do tipo asa rotativa, simulando um equipamento real. Além disso, o usuário receberá informações a respeito dos comandos necessários para controlar a aeronave através de funções básicas de voo, como por exemplo: decolar a aeronave, pousar, navegar sobre o cenário, entre outros. Na medida em que o usuário for ganhando conhecimento sobre o controle da aeronave, ele poderá escolher cenários em que serão proporcionados obstáculos para ultrapassar e aprimorar o controle sobre a aeronave. Além disso, sendo um simulador 3D será modelado objetos dinâmicos, como a aeronave por exemplo, e a de elementos estáticos como o cenário aberto para o voo ou cenários abertos com vários obstáculos. Haverá também testes constantes para verificação de erros de implementação e falhas de projeto, após a ferramenta ganhar corpo e estabilidade, versões teste serão disponibilizadas para teste de usuários e apresentação de *feedback* sobre o simulador.

Para o treinamento dos usuários que irão utilizar o equipamento ou aqueles que irão ter o primeiro contato com voos utilizando drones, será feito um primeiro contato através do uso da ferramenta de treino para voos com drones, assim o usuário poderá ganhar conhecimento dos comandos e controles necessários para o voo com um equipamento real. Após alguns minutos ou horas, dependendo da progressão do piloto, utilizando a ferramenta de ensino, o usuário poderá utilizar um equipamento real para verificar os resultados obtidos de um treinamento simulado e um prático. Assim, com o resultado desses dois treinamentos, espera-se que o piloto possa ter um ganho nas habilidades de pilotagem, conhecimento dos comandos sobre o drone e segurança na hora de utilizar um equipamento real.

3.3 RPA

O RPA foi montado seguindo a metodologia proposta, que seria a especificação e aquisição das peças necessárias para a montagem do equipamento e configuração. Logo após essas etapas foram então realizado os testes necessários à utilização da aeronave.

3.3.1 Fases de desenvolvimento

No projeto foram estabelecidos 3 fases para a construção do RPA: a aquisição de peças, em que foi analisado e adquirido cada peça do RPA; a montagem, que consistiu em montar todo o drone; configuração, após a montagem foi necessário configurar o drone; testes, foram realizados testes com o drone para verificar se ele está pronto para voar, sendo obtido esses dados através da controladora da aeronave.

3.3.2 Especificação dos componentes

Foi realizada uma seleção de peças e componentes para atender ao projeto conceitual do protótipo e ficar dentro de um orçamento compatível com o propósito do projeto. As peças adquiridas foram através da compra em lojas brasileiras específicas de equipamentos de drones. A escolha da controladora Pixhawk foi devido a robustez e também por proporcionar a aquisição e acesso a vários dados obtidos por seus sensores, o que não é possível em controladoras de determinados fabricantes que não permitem o mesmo nível de interação através das interfaces de programação, como o caso das controladoras da empresa DJI. A bateria selecionada foi a de 5000 mah de 3 células, o que supriu a demanda da aeronave com folga e também por ser um pouco mais leve, em relação a algumas outras encontradas no mercado. O rádio controle escolhido foi da marca Futaba, devido a qualidade do produto e também possibilidade de utilizar em diferentes modelos de aeronaves. Por fim, foi adquirido o GPS da 3DR para a utilização de voos automáticos para a tomada de dados.

3.3.3 Montagem

O conjunto DJI F450 é constituído das seguintes peças: o frame, os rotores e os ESCs (*Eletronic Speed Control*). Através dos componentes adquiridos foi possível começar a montagem do frame com os conjuntos dos rotores e escs. Primeiramente, foi montado o frame e soldados os conectores dos escs com a placa distribuidora de energia como é mostrado na Figura 18, após as conexões serem feitas foi então realizado a conexão com os rotores ao escs. Logo após isso, foi fixado os rotores ao frame como foi mostrado anteriormente na Figura 17.

A controladora foi fixada na parte superior da aeronave e realizado então as conexões com os canais, em que será controlado cada ESC (Figura 22). Na porta RC foi conectado o receptor do rádio para a placa receber os comandos através de rádio frequência. Assim, com essa primeira parte da montagem foi possível deixar o RPA (Figura 23) quase pronto para fazer as primeiras configurações da controladora.

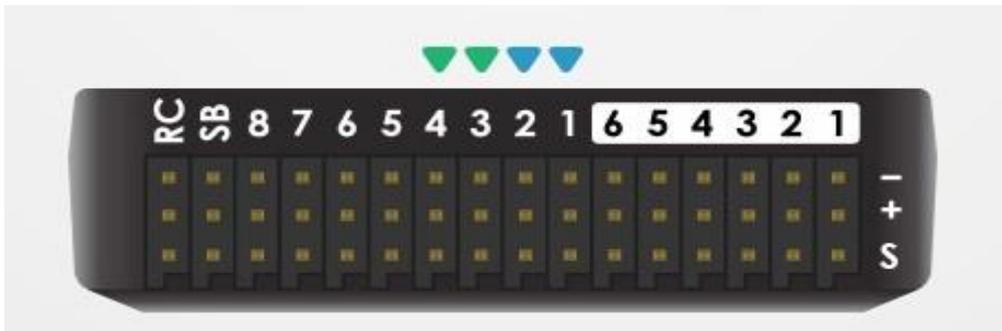


Figura 22. Portas de conexão da controladora para os ESCs.

Fonte: http://ardupilot.org/copter/_images/Pixhawk_outputs.jpg

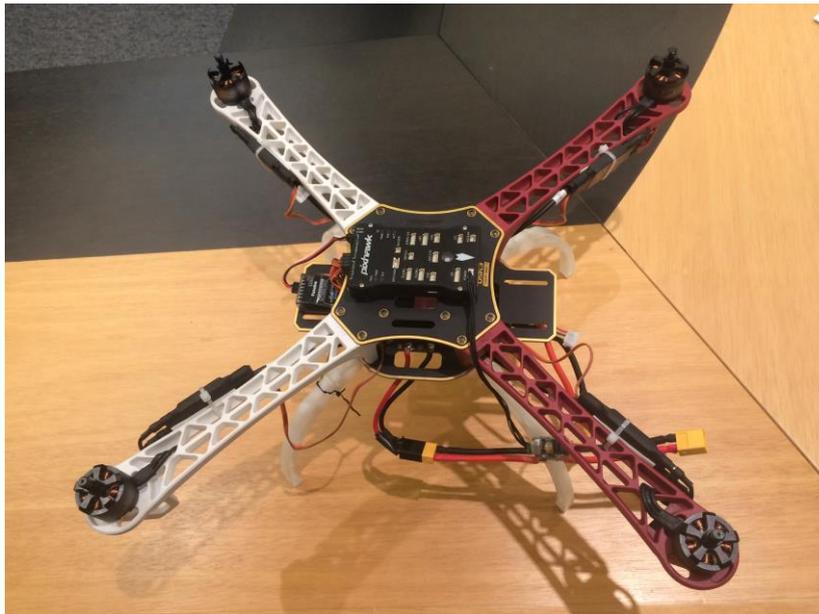


Figura 23. RPA logo após a primeira parte da montagem

Após a primeira parte da montagem foram realizadas as conexões dos componentes que vieram junto à placa controladora, que são: *buzzer*, switch de segurança e o módulo de energia. As conexões foram realizadas conforme as figuras 24 e 25. Após isso, a aeronave ficou montada conforme a figura 26.

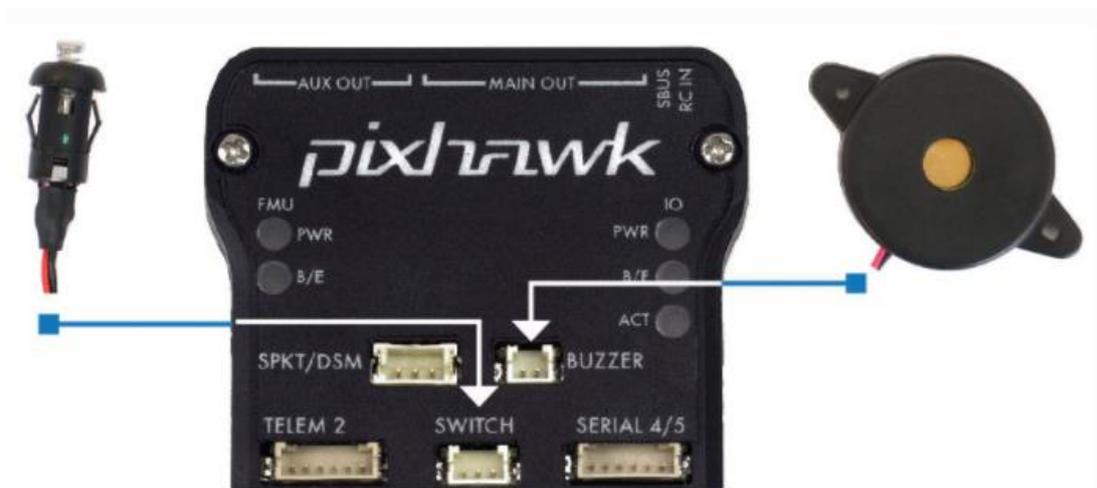


Figura 24. Conexão do buzzer e do switch de segurança.

Fonte: <http://ardupilot.org/copter/docs/common-pixhawk-wiring-and-quick-start.html#pixhawk-wiring-chart>.

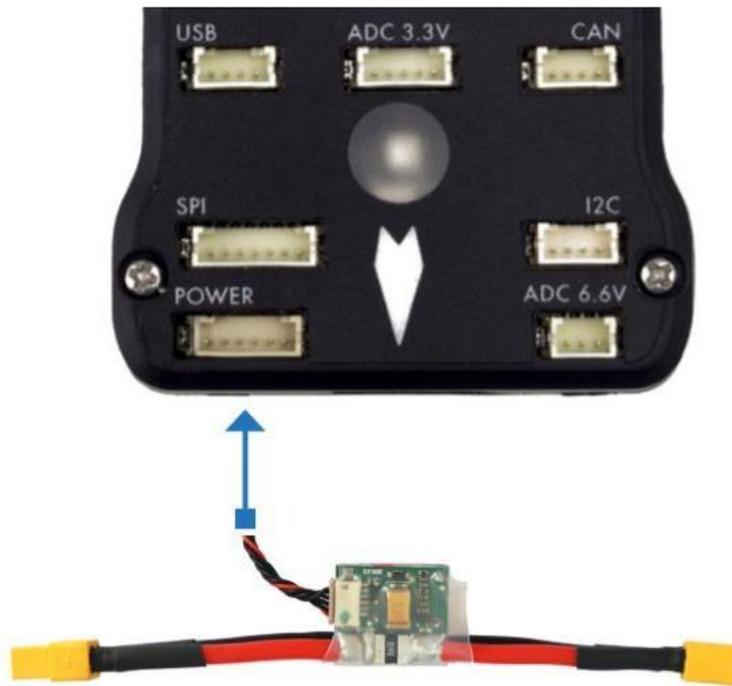


Figura 25. Conexão do power module com a placa controladora.

Fonte: https://docs.px4.io/en/assembly/quick_start_pixhawk.html.



Figura 26. RPA após ser realizada a adição do *switch*, *buzzer* e *power module*.

Para a configuração das hélices e rotores foi seguido o esquema de configuração de um quadricóptero conforme o esquema da ardupilot sugere. Assim,

o esquema da montagem pode ser observado na Figura 27, em que em azul representam os rotores que giram em sentido anti-horário (*Counter-ClockWise*) utilizando hélices normais e em verde os rotores que giram em sentido horário (*ClockWise*) utilizando hélices de impulsão.

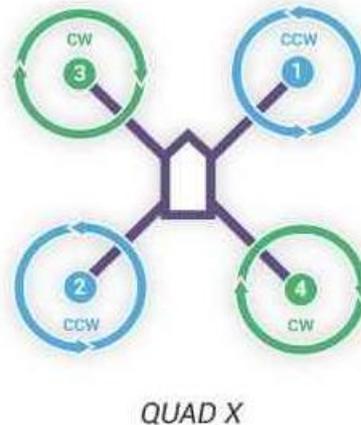


Figura 27. Esquema de um quadricóptero.

Fonte:<http://ardupilot.org/copter/docs/connect-escs-and-motors.html#connect-escs-and-motors>

Após a chegada do GPS, foi feita a instalação em frente à aeronave conforme indicado na Figura 28. Porém, após alguns testes foram observadas uma taxa alta de interferência magnética e também de vibração do GPS, o que estava interferindo na precisão do receptor, no tópico de testes isso vai ser abordado novamente. Para evitar tais efeitos, foi instalado um suporte improvisado (Figura 29) para tentar diminuir essas taxas de interferências e mais tarde um suporte de maior resistência (Figura 30) foi fixado para garantir que o GPS não sofresse interferência dos equipamentos eletrônicos. Além da instalação do GPS, foi colocado um equipamento para acoplar a câmera, que também tem acessórios para diminuir a vibração da câmera causada pela aeronave durante o voo. O equipamento foi colocado na parte frontal da aeronave no lugar em que o GPS tinha sido previamente instalado.



Figura 28. GPS instalado na frente da aeronave.



Figura 29. Suporte improvisado para o GPS.



Figura 30. Nova posição e suporte do GPS.

Supopрте de GPS produzido por pturcotte (<https://www.thingiverse.com/thing:733324>)

3.3.4 Configuração da aeronave

O próximo passo então foi configurar a aeronave através do *software Mission Planner*. Através dele é possível configurar cada parâmetro da aeronave, como por exemplo, velocidade máxima da aeronave, calibração dos sensores, *fail safe*, canais de comando de rádio controle, entre outras configurações. O programa também permite visualizar dados da aeronave (ex: velocidade da aeronave, ângulo de inclinação), funcionando como uma base de controle terrestre, permitindo também o planejamento de voo automático.

Mission planner é um *software* de código aberto desenvolvido por Michael Osborne utilizado para projetos de código aberto Ardupilot, que apresenta diversas funcionalidades para aplicações de estação terrestre. Ele pode ser utilizado por aeromodelos, drones e veículos remotamente controlados. O Mission planner apresenta diversas funcionalidades, que são:

- Carregamento do firmware em placas autopilot (Pixhawk e APM) que controla o veículo;
- Configura, instala e ajusta os veículos para ótima performance;
- Planeja, salva e carrega missões automáticas de forma simples, através do *Google Maps* ou através de outros mapas;
- Faz *download* e análise de logs criados pelas controladoras autopilots;
- Através da utilização da telemetria, pode-se realizar: monitoramento do veículo enquanto se está operando; gravar logs de telemetria que contem muito mais informação que os logs das placas controladoras; analisar logs de telemetria; operar o veículo através da visão em primeira pessoa.

Para começar a configuração da aeronave é necessário conectar a aeronave através de um cabo via usb (Figura 31). Após isso é necessário definir a porta e clicar no botão conectar no Mission Planner. Através da conexão realizada com sucesso com a aeronave, é possível visualizar diversos dados como por exemplo: altitude da aeronave, velocidade, nível de bateria, entre outros. Assim que essa conexão é estabelecida é possível fazer a configuração da aeronave.



Figura 31. Entrada de conexão com computador via usb.

Fonte: <http://ardupilot.org/copter/docs/common-connect-mission-planner-autopilot.html>

A primeira parte da configuração é definir qual tipo de aeronave, ou seja, definir o tipo de frame da aeronave, por exemplo, se o drone possuir um frame de um hexacóptero, será escolhido a opção para configuração de um hexacóptero. A configuração de aeronave Quad X foi escolhida, pois a aeronave é um quadricóptero e apresenta a estrutura de localização de hélices em X. Após essa etapa, é necessário fazer a calibração da bússola, em que é feito a Live Calibration. Nessa etapa, uma janela é aberta mostrando um rastro colorido, na qual é necessário atingir todos os pontos brancos através da movimentação da aeronave em diferentes ângulos para completar a configuração (Figura 32).

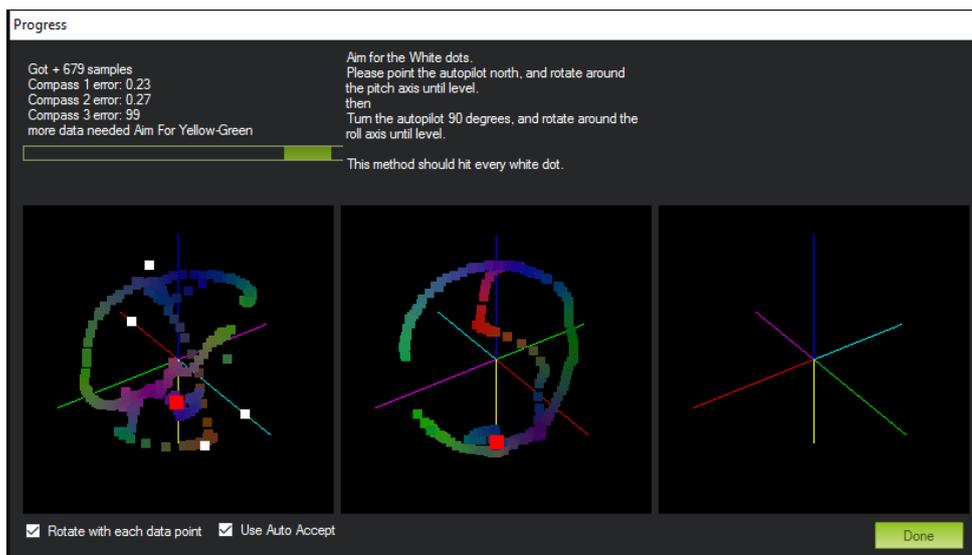


Figura 32. Configuração do GPS.

Fonte: http://ardupilot.org/copter/_images/MissionPlanner_CompassCalibration_LiveCalibrationScreen.png

A próxima etapa foi a configuração do acelerômetro, em que é necessário manter a aeronave em posições diferentes para a calibração da aeronave, sendo necessário colocá-la em uma superfície plana para poder melhorar esse processo. Logo em seguida, foi realizado também a calibração do rádio (Figura 33), em que é necessário movimentar todos os botões do rádio para que atinja os valores máximos e mínimos, representados por barras verdes. Ao final, é necessário clicar no botão de término da calibração (retângulo azul na figura 33) e o Mission Planner vai informar os valores de cada canal, o que pode servir para configurar diferentes funções para cada canal. Para definir as funções é necessário ir na opção *Flight Modes* (Figura 34), em que vão ser mostradas as opções de modos de voos para utilizar no RPA. Os modos de voos escolhidos foram:

- Loiter - modo de voo que utiliza o GPS para estabilização da aeronave mantendo o local atual, direção da aeronave e altitude;
- Auto - modo de voo em que é utilizado para fazer voos automáticos;
- RTL (*Return To Launch*) - modo de voo em que a aeronave volta de modo automático para onde ela decolou. Após essas calibrações já possível fazer os testes de voo.



Figura 33. Calibração do rádio controle.

Fonte: http://ardupilot.org/copter/_images/mp_radio_calibration_click_when_done.jpg

3.3.5 Planejamento de voo

O *Mission Planner* além de realizar todas essas calibrações e configurações, ele também faz planejamento de missões, em que para se realizar a coleta de dados eficiente é necessário fazer um bom planejamento de missão. O *software* permite diversas opções para se fazer o planejamento de missões, desde a escolha manual de caminhos pré-determinados por onde a aeronave vai seguir (*waypoints*), como o preenchimento automático de *waypoints* na área da coleta de dados. Além disso, é possível configurar altura de voo, velocidade da aeronave, recobrimento horizontal e lateral.

No *Mission Planner* é necessário acessar a opção *Flight Plan* (Figura 34), ao acessar é possível visualizar um mapa, onde vai ser definido o local da coleta de dados pela aeronave. No mapa, também é mostrado onde está a aeronave, caso a aeronave esteja ligada via USB ou via telemetria com a estação terrestre, que pode ser um computador (*notebook* ou um *desktop*) ou um aparelho *mobile* (*tablet* ou *smartphone*). Como primeiro passo para planejar o voo é necessário localizar a área de interesse e adicionar os *waypoints*, existem diversas maneiras de se fazer isso. Pode-se adicionar os pontos manualmente um por um (Figura 35) e ir alterando as diferentes opções para cada ponto, como por exemplo, um dos pontos adicionados pode servir para indicar onde vai começar a coleta de dados pelo sensor, aumentar ou diminuir a velocidade do drone, entre outros.

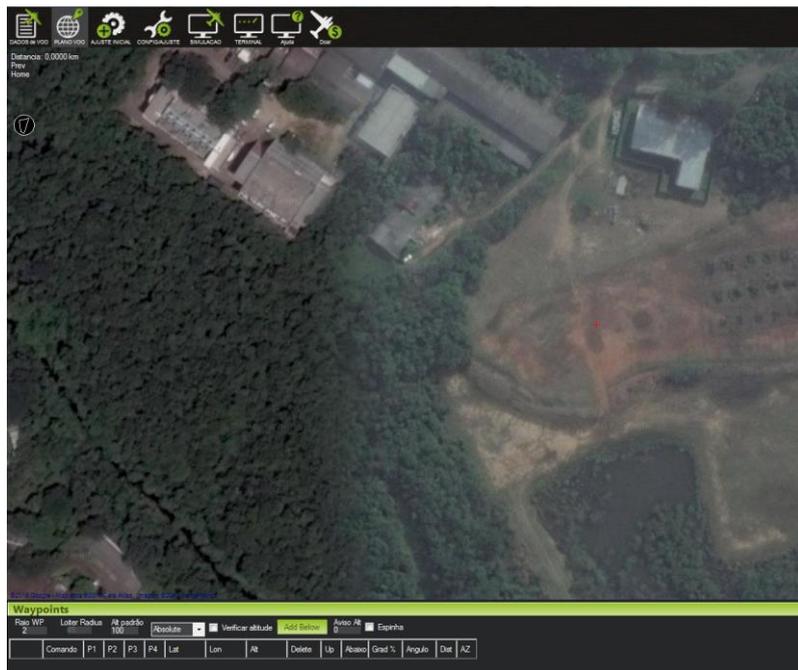


Figura 34. Tela de planejamento de voo no Mission Planner



Figura 35. Adicionando pontos de controle manualmente.

Outro método de realizar um planejamento de voo sem colocar ponto por ponto é utilizar o modo de demarcar o local com polígonos. Os polígonos são colocados utilizando o botão direito do mouse e depois inserindo o restante dos pontos através de “cliques” no mapa. Logo após marcar a área desejada, é necessário acessar a opção Auto WP e selecionar Survey (Grid), assim os pontos

são incluídos dentro da área que foi demarcada e uma janela é aberta para selecionar outras opções. Nessa janela, além de obter informações de tamanho da área, número de fotos, elevação do terreno, também é possível alterar configurações do sensor e do grid de mapeamento, entre outras configurações. Na Figura 36, é possível observar melhor a criação do polígono, a inclusão dos pontos e as opções de configuração. Por fim, ao gerar o planejamento de voo é necessário carregar na aeronave através de um cabo USB ou via telemetria.



Figura 36.(A) Criação de polígono para demarcar a área alvo; (B) Acesso ao Survey (Grid) para incluir os waypoints no polígono;(C) Janela de informações e opções após criar os waypoints.

Além do Mission Planner, existem outros softwares de planejamento de voo, um exemplo de aplicativo que é bem conhecido por usar as plataformas de empresa DJI é o *Pix4D Capture*. Esse planejador de voo também possui diversos modos de planejamento de voo, configurações de altura de voo, taxa de recobrimento, definição de velocidade da aeronave, entre outras funções. Um modo de planejar o voo pelo *Pix4D Capture* é utilizar um grid fixo e ajustá-lo na área de interesse, chamado de Grid (Figura 37). O segundo modo de planejar é ajustar um polígono e fazer um Grid irregular, chamado de Polygon (Figura 38). Há também a opção de Free Flight em que o piloto comanda a aeronave e ela vai coletando dados a uma certa distância percorrida (vertical e/ou horizontal) configurável. O *Pix4D Capture* está disponível somente para dispositivos *mobile*, como *tablets* e *smartphones*, com versões para sistemas operacionais Android e IOS.



Figura 37. Planejamento de missão no modo Grid do Pix4D Capture.

Fonte: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/203873435--Android-Pix4Dcapture-Manual>



Figura 38. Planejamento de missão pelo modo Polygon do Pix4D Capture.

Fonte: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/115001482703--iOS-How-to-plan-a-polygon-mission>

Os dois softwares são eficientes para o planejamento de missões e apresentam ótimos recursos para realização de missão, como informações de área, tempo de voo para realizar as missões, localização da aeronave, entre outros recursos. A vantagem na utilização do Mission Planner é na customização de plano de voo, como os ajustes em cada ponto de controle, várias opções para customizar o tipo de sensor, diversas opções de mapas. Trata-se de um software bem completo, porém bem complexo o que se torna uma desvantagem para aqueles usuários que queiram uma ferramenta bem mais simples e direta. É nisso que o Pix4D Capture ganha em vantagem em relação ao Mission Planner, pois é um software mais amigável em sua utilização e que não demanda muito tempo de aprendizado para poder utilizá-lo. Existem também outros aplicativos para diferentes plataformas que estão no mercado, como o DroneDeploy, DJI Ground Station Pro, MapPilot, entre outros.

3.3.6 Custo Total do RPA

Um dos pontos principais do trabalho é que o equipamento montado tivesse um preço reduzido em comparação com os existentes no mercado de empresas que montam RPAs. Foram feitas várias pesquisas de peças de RPA em diferentes lojas brasileiras, com o objetivo de evitar longas esperas de fretes internacionais. Entretanto, isso acabou encarecendo um pouco o equipamento, mas mesmo assim o RPA acabou ficando com um dos menores preços do mercado. A Tabela 5 apresenta um sumário de peças e preços utilizados no protótipo especificado para esse projeto:

Tabela 5. Listagem de Peças e Preços do RPA

Peça	Preço (R\$)
Rádio Futaba 8J	2.420,00
Bateria LiPo Venom 5000mAh	637,00
F450 (<i>frame</i>)	1.097,00
Trem de pouso	91,00

Kit completo 3DR PixHawk	2.749,00
Cabo para Telemetria 3DR	99,00
Sistema telemetria 3DR 915	1.099
GPS 3DR	795,00
Camera Mapir Survei 2 NDVI (Red + NIR)	2.600,00
Total	11.587,00

Fazendo comparação entre os preços da Tabela 4, com os valores apresentados na Tabela 5, pode-se observar que o custo de projeto do RPA especificado e montado ficou entre um dos menores preços encontrados entre as empresas brasileiras. Vale ressaltar que a maioria dos preços presentes na Tabela 4 é somente do equipamento e se for adicionar o sensor, acaba elevando um pouco mais o valor.

Outro ponto a ser abordado, são as plataformas fechadas, como por exemplo, os equipamentos da linha Phantom da DJI. Eles têm preço menor, custando em média de R\$6.000,00 a R\$10.000,00, dependendo do modelo do equipamento. Entretanto, são plataformas fechadas, ou seja, não permite customização, as configurações são limitadas e os sensores são de grande maioria RGB, sendo que algumas linhas nem permitem outros tipos de sensores.

3.4 SIMULADOR DE VOO E PILOTAGEM

Nesse tópico vai ser abordado a concepção e o desenvolvimento do simulador de treinamento de pilotagem de RPA, passando desde o conceito inicial de criação até a construção final do *software*.

3.4.1 Descrição geral do simulador

O simulador é baseado no controle e aplicação de um RPA, com controles de voo semelhantes aos utilizados durante a pilotagem real. Além disso, procurou-se simular algumas funções disponíveis nos controles remotos, como por exemplo, tirar foto utilizando o drone e utilização da câmera de um drone na transmissão de

vídeos, dando um aspecto de realismo ainda maior ao simulador. A proposta de simular um cenário de mina a céu aberto e também a utilização do RPA nesse tipo de ambiente é ajudar na imersão do treinamento de voo para pilotos iniciantes, tanto para pilotos que queiram utilizar em áreas de mineração como também em outros tipos de aplicação. Procurou-se fazer um cenário simples e de tamanho reduzido para não demandar muita capacidade gráfica dos computadores podendo assim ser utilizado por qualquer configuração mais simples de computador.

Os objetivos pelo cenário fazem com que o usuário possa treinar os comandos básicos de pilotagem de um drone. Assim, ao final do treinamento, o usuário possa ter maior afinidade com os comandos de voo do RPA. Além disso, com a utilização da realidade virtual (RV), é possível proporcionar uma imersão do usuário no cenário e na proposta do simulador. Fazendo assim, que o usuário possa ter uma idéia de como é pilotar um equipamento real, tanto em aspectos de controle da aeronave, como também em dificuldades que ele deverá lidar ao se deparar com um equipamento dessa categoria (multirotor).

Os tópicos seguintes vão ser descritos mais detalhadamente a respeito do processo de construção do simulador, como por exemplo, o cenário, os objetivos, a utilização da RV, entre outros.

3.4.2 Cenário

A construção do cenário (Figura 39) do simulador foi baseado em cenários reais de mineração, mas em menor escala. O cenário contém algumas edificações, bancadas e também regiões com vegetação. Além disso, nele foram implementados objetivos para o usuário realizar.



Figura 39. Cenário concebido para o simulador.

Em um cenário de mineração algumas características são bastante comuns, como por exemplo, as bancadas de lavra e rampas para a locomoção de caminhões e demais equipamentos, estruturas para acomodação de funcionários ou para guardar equipamentos, plantas de britagem, etc.. Essas características são importantes para dar essa sensação de estar em um ambiente real. Conforme a Figura 40, é possível visualizar essas características a partir de uma imagem real de uma pedreira e a partir dela que foi concebido o cenário para o simulador.



Figura 40. Típico cenário de mineração em unidades de produção de agregados (pedreiras).

Com base nessas características o cenário foi construído desde o princípio com a utilização de elementos e objetos disponíveis na biblioteca Asset Store do Unity. Pode-se observar a presença de bancadas e algumas estruturas representando edificações utilizadas para guardar equipamentos ou como abrigo para os funcionários da mina assim como alguns equipamentos. As regiões de vegetação também fazem parte em mineradoras, então procurou-se também incorporar ao cenário. A proposta é que através dessas características mantidas, o usuário tenha a sensação de estar em um cenário típico de mineração para manter a temática do simulador.

3.4.3 Objetivos

Para que o simulador atingisse o objetivo de entregar ao usuário um treinamento básico de pilotagem, foram concebidos alguns desafios ao usuário para que ele pudesse treinar os comandos de voo. O treinamento é composto por quatro principais desafios, sendo eles:

- i. pilotagem manual com decolagem e deslocamento de um lugar a outro;
- ii. coleta de objetos pelo cenário;
- iii. tomada de fotos pelo cenário;
- iv. simular um cenário de utilização do drone incorporando os desafios dos 3 desafios anteriores.

Na primeira parte do treino, o usuário vai se familiarizar com o controle e os comandos de voo, comparado ao que acontece quando se tem o primeiro contato com um equipamento real, os pilotos vão reconhecer os comandos de subida, descida e entre outros para se acostumar com a pilotagem. Portanto, o primeiro nível foi chamado de Drone Treino. Através desse cenário o usuário vai testar os comandos de voo, sem nenhum desafio, e tentar se acostumar com a sensibilidade dos comandos e a resposta do drone aos comandos do usuário. Assim, ao se sentir pronto o usuário poderá teclar o comando para passar pelo primeiro desafio.

A partir do Nível 1 em diante, o usuário vai se deparar com um contador regressivo, em que ao chegar a zero, ele terá que repetir o Nível que está. O objetivo desse cenário é simular que o piloto vai levar o drone de um ponto A para um ponto B e ao chegar a esse local, ele deverá pousar e terminar o voo. Portanto, o usuário dentro do simulador vai estar em uma posição onde vai visualizar uma

estação terrestre, que vai ter o apoio da visualização da câmera do drone, podendo-se orientar por ela. O ponto de chegada está simbolizado por uma bandeira verde que está girando (Figura 41) no cenário do simulador. Assim que chegar ao local e permanecer nele o usuário terá terminado o Level 1 e poderá passar para o próximo desafio.

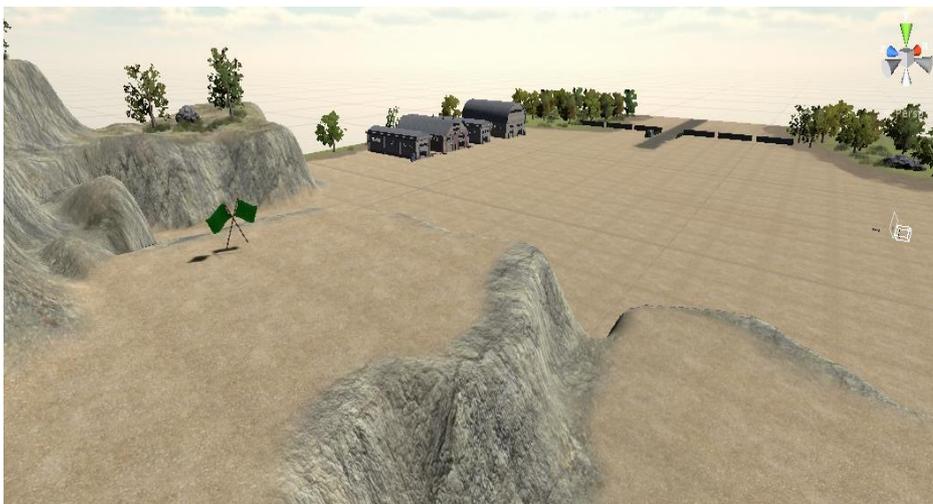


Figura 41. Localização do objetivo do primeiro leve.

O segundo desafio trata-se mais uma vez de treinar os comandos de voo e se acostumar a eles, além disso simula quando o piloto quer chegar a determinados lugares e perde a noção de espaço. Ou seja, muitas vezes ao pilotar, perde-se a noção de localização e profundidade à distância. tendo-se que recorrer a outros mecanismos de referência, como a própria câmera do drone para se ter melhor noção de se estar aproximando ou afastando de um objeto. Portanto, o usuário terá que localizar e coletar objetos pelo cenário (cubos destacados em vermelho - conforme Figura 42) exigindo as habilidades de pilotagem e também de localização desses objetos pelo cenário. Além disso, terá que fazê-lo no tempo determinado, pois se o contador chegar a zero, terá que refazer o Nível 2 novamente, até que conclua o desafio. Ao concluir o objetivo o contador irá parar e o usuário poderá passar para o próximo nível (*Level*).



Figura 42. Localização dos cubos no Level 2

O *Nível 3* tem como principal objetivo a tomada de fotos de objetos indicados pelo cenário, mas também de treinar o usuário com os comandos de voo. Os objetos estão espalhados pelo cenário e indicados por setas verdes (Figura 43), assim que o piloto tirar a foto um contador irá indicar e registrar quantos objetos ele tirou foto e quantos ainda faltam. Esse Level simula a função de tomada de fotos através do drone e é umas das principais funções utilizadas tanto para lazer como para fiscalização e inspeção de estruturas em situações reais, sendo assim muito importante ter um desafio desse tipo para o treinamento do piloto, já que essa função é bastante utilizada em situações de campo. Assim, depois de realizado o desafio com sucesso, o usuário será direcionado para último desafio.



Figura 43. Localização dos pontos do objetivo do Level 3.

O último desafio (Figura 44) trata-se de uma simulação de uma utilização do drone, que seria a tomada de fotos da área de mineração para a inspeção daqueles locais. Trata-se de um desafio que engloba os desafios dos três *Levels* anteriores e também simulando uma possível utilização real do equipamento. Assim, o usuário terá que completar os desafios na ordem que quiser, com exceção do pouso, pois só será permitido o pouso quando o piloto terminar de realizar os outros dois desafios, sendo assim um *Level* de maior complexidade para o usuário, pois serão exigidas as habilidades dos 3 últimos desafios para poder concluir com êxito esse *Level*. Assim, que terminar os desafios, o usuário terá completado todos os desafios do simulador, considerando-se que o usuário está apto e pode ser iniciado no treinamento de pilotagem com aeronave real.

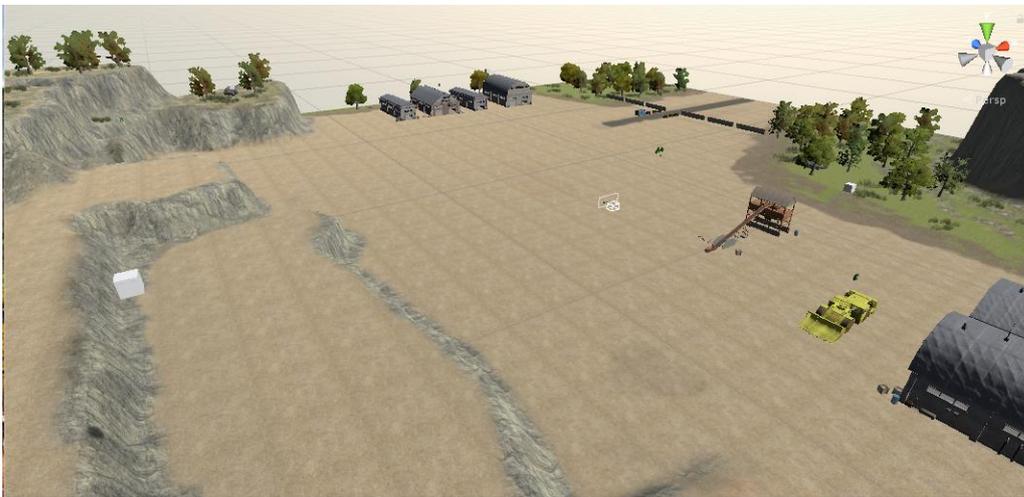


Figura 44. Level 4 com vários objetivos.

Através desses desafios implementados o usuário estará em busca da melhora da pilotagem para completar o objetivo com êxito e assim demonstrar a aptidão para operação do equipamento em situações reais de campo.

3.4.4 Realidade virtual e interface do simulador

Hoje em dia existem vários equipamentos para a utilização da realidade virtual, porém para esse trabalho foi utilizado o equipamento da HTC Vive (Figura 45), através dele foi possível colocar o usuário em uma maior imersão dentro do simulador, agregando ainda mais para o contexto da ferramenta de treinamento.



Figura 45. Equipamento HTC Vive.

Fonte: <http://g1.globo.com/tecnologia/games/noticia/2016/02/vive-oculos-de-realidade-virtual-da-htc-entra-em-pre-venda-por-us-800.html>

O sistema é composto por um conjunto de acessórios, que são: os óculos, os sticks ou controles, os sensores de posição, fontes de energia, cabos de conexão entre outros equipamentos. Através do Unity, mais especificamente, da plataforma Steam VR, foi possível fazer a integração do equipamento com o simulador e assim fazer as adaptações necessárias para a integração entre a interface entre o aplicativo desenvolvido (software de treinamento) e o hardware (sistema de VR). O preço total do produto da HTC Vive foi de US\$900 (aquisição em outubro de 2016), o que convertendo fica aproximadamente R\$3.250,00 (conversão feita com o valor do dólar na época da compra). A utilização do óculos exige uma configuração mínima de computador para poder rodar aplicações sem travamentos, sendo a configuração recomendada a seguinte:

- CPU: Intel Core i5-4590 ou AMD equivalente;
- Placa de vídeo: GeForce GTX 1060 ou AMD Radeon RX 480;
- Memória RAM: 4GB ou mais.

A câmera de primeira pessoa foi utilizada para dar a sensação para o usuário de estar dentro do simulador. Portanto, foram realizadas algumas adaptações para dar ao usuário informações e também simular uma estação terrestre utilizando o FPV (*First Person View*) de um drone (Figura 46) informando dados de telemetria, tais como a velocidade e a altura da aeronave durante o voo. As informações do

tempo para completar o objetivo, informações de objetivos, tela de boas vindas e telas de saída do jogo foram construídas de forma que o usuário pudesse consultá-las e se informar a respeito da sequencia de objetivos dentro do simulador.



Figura 46. Visão do usuário das interfaces dentro do simulador.

Pode-se observar na Figura 46 o texto Timer e Finish, no lugar do texto Timer é onde a contagem regressiva irá aparecer para o usuário informando o tempo que ele tem para realizar o objetivo, já o texto Finish será onde vai aparecer o texto informando que o usuário conseguiu completar o objetivo do cenário. Na figura 47 é possível observar a contagem regressiva e o texto informando a conclusão do objetivo.



Figura 47. Interface de conclusão do Level e informações mostradas na estação terrestre.

Ao observar a estação terrestre, é possível visualizar na tela os textos Velocidade e Altura, nesses locais vão ser informados a velocidade do drone e a altura que o drone está, respectivamente. As informações vão ser mostradas a todo instante para o usuário. Além disso, acima da estação terrestre está localizado o texto informando o objetivo do Level e também um relatório de acompanhamento dos objetivos, conforme a Figura 48.



Figura 48. Estação terrestre mostrando informações de voo e o texto informando o objetivo.

Através dessas adaptações de interface foi possível incorporar a realidade virtual através do equipamento HTC Vive no simulador proporcionando uma maior imersão ao usuário.

3.4.5 Controle

O controle de uma aeronave real é realizada, normalmente, através de rádio controles, porém alguns modelos utilizam o smartphone para controlar via WiFi. Entretanto, para fins de adaptabilidade foi implementado um controle de joystick.

O controle de joystick se assemelha a um equipamento de rádio controle, em relação aos sticks de comando da aeronave. Como exemplo, pode-se observar a semelhança de um joystick com um controle do Mavic da empresa DJI na Figura 49. Assim, optou-se por realizar os comandos dentro do simulador através de um controle de vídeo game.



Figura 49. Semelhança entre o joystick e um rádio controle do Mavic.

Fonte: http://www.gpj.com.br/joystick_usb_kolke_p_pcps2_c_vibracao_kjg101_preto_open e https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-859717351-controle-remoto-mavic-pro-_JM

Com essa escolha para interação com equipamento de realidade virtual foram então implementados os comandos de voo. Portanto, no stick do lado esquerdo foi implementado os comandos de subida, descida, giro em torno do próprio eixo para esquerda e para direita. No stick do lado direito foram colocados os comandos de deslocamento longitudinal para frente, para trás, para direita e para esquerda. Além disso, em um dos botões existentes foi implementada a função de

bater foto. No esquema da figura abaixo é possível observar a relação de comandos. Assim, pessoas que já estiverem acostumadas com esse padrão de controle em equipamentos reais não vão estranhar e para as pessoas que vão utilizar pela primeira vez já vão se acostumando com os comandos.



Figura 50. Esquema de comandos do controle.

3.4.5 Áudio

A utilização de áudio implementada para o simulador não é complexa, somente foi colocado o áudio para os rotores do drone. Demais sons podem ser incorporados, mas nessa versão apenas o som da aeronave pode ser escutado.

3.4.6 Elementos gráficos

Para a criação do simulador foram utilizados elementos gráficos 3D obtidos na biblioteca Asset Store do Unity. Assim, muitos dos elementos foram utilizados das bibliotecas padrões disponíveis do Unity, diminuindo o tempo de criação do jogo.

O elemento principal que é a aeronave (Figura 51) foi utilizado um modelo conhecido no mercado, que é o modelo Parrot Ar.Drone. Assim, sendo o objeto que o usuário vai mais interagir no simulador, possuindo funções de voos parecidos com um modelo real.



Figura 51. Foto real do equipamento (esquerda) e modelo 3D de drone implementado no simulador (direita).

Além do drone, o simulador possui objetos 3D com função contextual e de estética, como é o caso das construções, árvores, pedras, veículos e entre outros, em que pode ser observado na Figura 52. Tais elementos vão fazer parte do cenário para dar ao usuário a sensação de estar um cenário real de mineração.



Figura 52. Elementos com funções estéticas (círculo vermelho) como prédios e árvores.

Outros elementos possuem função de interação com o usuário, como é o caso dos elementos utilizados nos objetivos do cenário. A bandeira verde (Figura 53) é utilizada para dar informação se o usuário precisará para completar o objetivo do cenário 1. Já os cubos (Figura 53) têm função de coleta, ou seja, o usuário terá que passar exatamente onde eles se localizam para conseguir contabilizar e completar o Level 2. As setas verdes (Figura 53) servem como indicativo de onde o usuário precisará tirar a foto para completar o Level 3. Assim, tais elementos foram utilizados com finalidades específicas para cada Level do jogo.

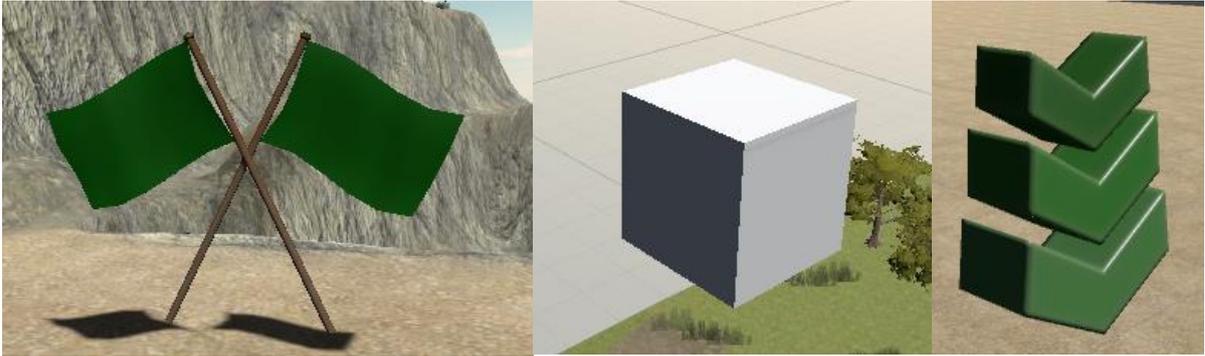


Figura 53. Elementos utilizados para os objetivos nos Levels (bandeira verde, cubo cinza e seta verde).

Outro elemento utilizado pelo usuário é a estação terrestre (Figura 48), que serve como elemento de ajuda ao usuário tendo acesso a câmera do drone e servindo de ajuda para localização do drone, caso o usuário perca ele de vista, e também obter informações de velocidade e altura do drone. A estação é constituída por dois elementos, que são: um modelo 3D de um tablet e um modelo 3D de um tripé de câmera fotográfica que suporta o próprio tablet.

3.4.7 Versão alfa

Após as fases de design e produção, foram realizadas as implementações iniciais do simulador juntando o cenário, os scripts e modelos 3D para fazer parte do cenário e outros modelos para utilização nos objetivos propostos em cada Level.

Como primeiros testes foram construídos um cenário inicial (Figura 54) com alguns modelos 3D e um modelo 3D de um drone bem simples para verificar as possíveis interatividades dos Levels. Assim, procurou-se testar os scripts implementados para os objetivos e também refinar o voo do drone.

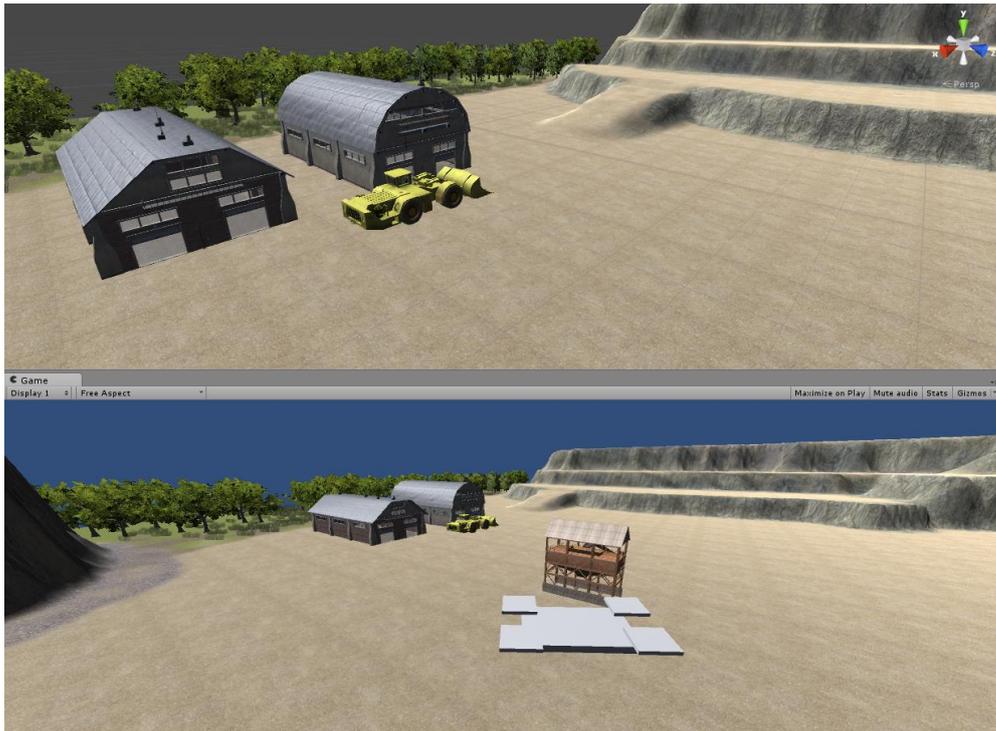


Figura 54. Cenário inicial de testes do simulador.

Com a implementação dos objetivos, foram realizados os ajustes com o tempo para a conclusão dos objetivos, em que verificou-se através de alguns testes internos a demanda de mais tempo para realização, devido ao usuário precisar de um certo tempo para localizar os objetivos, ler e compreender o objetivo, e também o tempo de deslocamento do drone aos objetivos.

Logo depois, foi adicionado um modelo 3D de drone com mais detalhes, em que foi feito através da aquisição do modelo na Asset Store do Unity e também ajustado o script de voo para ser utilizado com um joystick. Além disso, foram testados os scripts dos objetivos para verificar, por exemplo: se ao concluir o cenário, o usuário consegue passar para o próximo Level; registro de log dos objetivos e entre outros.

Com a aquisição do equipamento de realidade virtual, foi realizado a adaptação para utilizá-lo no simulador, sendo necessário algumas modificações dentro do simulador. Entretanto, as mudanças foram em relação a câmera do jogo, já que nas primeiras fases da ferramenta foram utilizados a câmera de primeira pessoa em frente ao drone e terceira pessoa que seria um pouco acima do drone. Atualmente a câmera de primeira pessoa é a visão do usuário ao utilizar o óculos HTC Vive e de primeira pessoa em relação ao drone simulando a câmera do drone.

Além disso, foi pensado em uma nova interface de Menu Inicial (Figura 55) no começo do jogo e também um guia rápido dos comandos do drone.



Figura 55. Menu Inicial do simulador

3.4.8 Versão beta

Após a implementação do cenário, objetivos e funcionalidades, foi dado o próximo passo do projeto que é a fase Beta de desenvolvimento, em que foram realizados mais alguns testes e também foi aplicado a ferramenta com alunos da UFRGS.

Com a incorporação do RV foi verificado que a taxa de frames do jogo teve uma queda, porém não influenciou tanto na jogabilidade e realismo pretendidos. Além disso, não houve alteração na realização dos objetivos, mas percebeu-se um certo aumento na dificuldade na realização dos objetivos, caso o usuário não utilizasse a câmera do drone. Entretanto, isso era esperado, pois ao utilizar somente a visão do usuário, alguns locais do cenário não podem ser vistos, por exemplo objetos ou morros encobrindo a visão do piloto, o que assemelha-se com situações reais. Quando o usuário começa a utilizar a estação terrestre, ele começa a superar essas limitações e assim se beneficiando dos instrumentos disponibilizados.

Durante um curso realizado na UFRGS para alunos de graduação foi realizado o primeiro teste da ferramenta com os alunos. O nível de experiência de voo dos alunos era um pouco variada, alguns já tinham utilizado um equipamento real e outros nunca tinham pilotado um drone. Mesmo com essa diferença seria uma

boa oportunidade de aplicação, pois seriam bons feedbacks para ver se a ferramenta seria de grande utilidade para aqueles que já tinham pilotado um RPA e para aqueles que nunca tinham pilotado. Cada aluno ficou em média no simulador por 10 minutos, esse tempo foi utilizado tanto para se acostumar com os comandos, quanto para executar os objetivos dos cenários.

Após todos utilizarem o simulador, foi observado que não houve nenhum bug na ferramenta, como por exemplo, o software fechar por algum comportamento anormal ou travar durante a utilização do mesmo. Os objetivos estavam funcionando de maneira correta, porém foi observado algumas dificuldades, em relação ao tempo para realização dos mesmos, algumas áreas do Level 3 não estavam bem posicionadas para a tomada de fotos e alguns objetos eram difíceis de serem vistos. Assim, após verificar esses problemas, foram feitas as devidas correções.

3.4.9 Testes de usuários

Após o amadurecimento do software de treinamento foi realizado os testes com usuários para verificar como eles iriam interagir com a ferramenta e como poderia ajudar eles no treinamento de voo.

Com a instalação do equipamento de realidade virtual e a inicialização da ferramenta, os usuários começavam a interagir com o software passando pelas informações dadas no menu inicial e após isso começando a praticar os comandos de voo dentro do simulador. Então após passar essa primeira parte, eles começavam a completar os objetivos.

Uma nova série de testes foram realizados com os alunos em uma disciplina de pós-graduação, sendo que a maioria deles nunca tinham pilotado um RPA real. Entretanto, alguns deles já tinham pilotado uma aeronave, o que serviu como dado também para verificar a opinião se o software serviria para melhoramento das habilidades de pilotagem e a semelhança das características de pilotagem de um equipamento virtual com um equipamento real. Assim, cada um teria um tempo de 10 minutos para a realização de ambientação com os comandos e os objetivos que teriam que realizar.

CAPÍTULO 4

4.1 Análise de Resultados

Nesse capítulo, serão apresentados os resultados da montagem e do funcionamento da aeronave, juntamente com alguns resultados obtidos da utilização do simulador por usuários. Através dos logs de voos obtidos pela controladora de voo e analisados pelo Mission Planner, alguns parâmetros foram verificados para identificar se a aeronave apresentava problemas de montagem e/ou de configuração, tais análises foram de fundamental importância para o funcionamento correto do RPA. Além disso, a aplicação do simulador de voo com usuários serviu para saber se a ferramenta conseguiu contribuir ou não para auxiliar no aprendizado do primeiro contato de voo com o RPA, sendo aplicado um questionário para coleta das opiniões dos usuários, que utilizaram a ferramenta.

4.2 Testes com o RPA

Através dos voos para testar o RPA é possível registrar informações de dados de GPS, nível de bateria, ângulos do equipamento e entre outras informações. Para isso, é necessário algum meio para armazenar esses dados, o que é chamado de *log* de voo. Através dele é possível obter informações valiosas para determinar a estabilidade de voo e do funcionamento geral dos dispositivos de controle do RPA. O usuário final normalmente não verifica e não tem acesso a esse tipo de registros, mas na fase de desenvolvimento e análise de desempenho esses dados são indispensáveis para determinar a funcionalidade correta do equipamento.

Os logs de voo são bem importantes para observar o comportamento da aeronave e podem indicar se há problemas ou não. Utilizando o Mission Planner foi possível ter acesso a esses logs de voo para verificar o comportamento da aeronave. Os logs são exportados da controladora para o computador e depois lidos pelo software. Além disso, é possível ter uma análise mais completa de cada parâmetro da aeronave, porém para uma análise mais rápida foi utilizado um modo de análise automática feita pelo Mission Planner (Figura 56).

```

LogAnalyzer
Log File C:\Users\LPM106\AppData\Local\Temp\tmpFBE.tmp.log
Size (kb) 7030.4072265625
No of lines 85235
Duration 0:06:05
Vehicletype ArduCopter
Firmware Version V3.4.2
Firmware Hash 6076bdfc
Hardware Type
Free Mem 0
Skipped Lines 0
Test: Autotune = UNKNOWN - No ATUN log data
Test: Brownout = GOOD -
Test: Compass = FAIL - Large change in mag_field (225.21%)Max mag field length (775.03) > recommended (550.00)
Test: Dupé Log Data = GOOD -
Test: Empty = GOOD -
Test: Event/Failsafe = FAIL - ERR found: CRASH
Test: GPS = GOOD -
Test: IMU Mismatch = GOOD - (Mismatch: 0.56, WARN: 0.75, FAIL: 1.50)
Test: Motor Balance = GOOD - Motor channel averages = [1209, 1209, 1224, 1213]Average motor output = 1213Difference between min and max motor averages = 15
Test: NaNs = GOOD -
Test: OpticalFlow = FAIL - FAIL: no optical flow data
Test: Parameters = FAIL - 'THR_MIN' not found
Test: PM = GOOD -
Test: Pitch/Roll = UNKNOWN - 'BarAlt'
Test: Thrust = GOOD -
Test: VCC = GOOD -

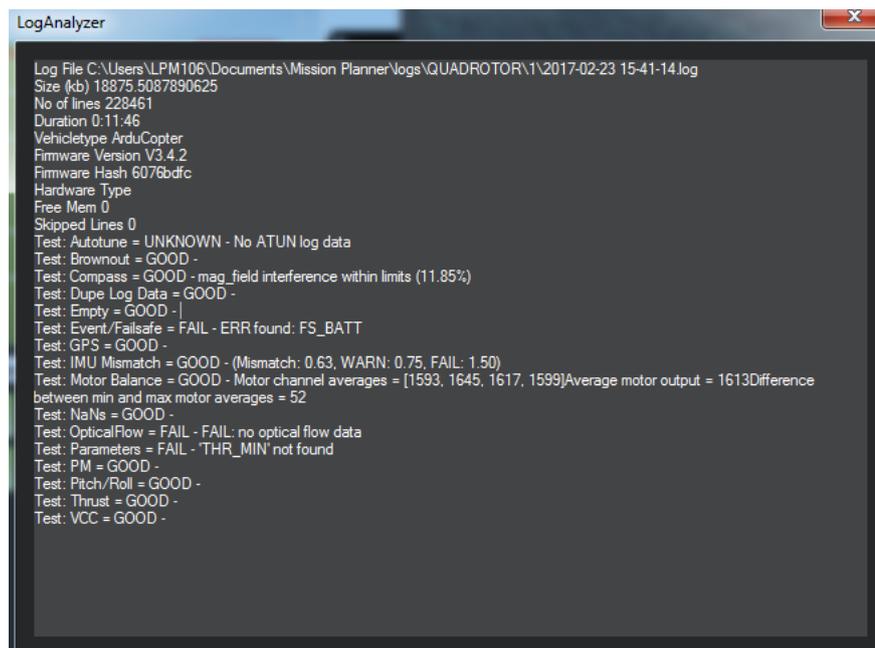
```

Figura 56. Exemplo de um log de voo com alta interferência magnética.

Através do log mostrado na Figura 56 é possível observar os vários testes de leitura que a controladora de voo realiza para verificar problemas na aeronave, sendo possível observar também vários outros parâmetros para uma análise mais detalhada dos dados coletados pela placa. Vale ressaltar alguns dos testes, por exemplo, os testes de *Motor Balance* que indicam se os ESCs e rotores foram calibrados corretamente e também se um ou mais dos rotores pode estar girando em rotação maior que os outros para compensar alguma assimetria de distribuição de peso da aeronave ou se estiver com valor baixo pode indicar um gasto mais elevado rotor e podendo ocasionar uma possível falha. Outro teste importante é verificado pelo teste de *IMU mismatch*, que verifica se a calibração do acelerômetro foi realizada corretamente e também verifica se os níveis de vibração lidos pelos sensores estão dentro dos limites estabelecidos para voo. O teste de *Event/Failsafe* indica se algum evento de *failsafe* foi acionado no caso desse log ocorreu a queda da aeronave, devido a configuração do GPS e o teste acusou esse evento. O teste *Compass* apresentou maior erro, devido a alta interferência magnética sofrida pelo GPS, assim procurou-se mudar ele de posição e após isso obteve-se uma redução considerável de interferência e inclusive na rapidez na busca de satélites. Alguns outros testes de angulação da aeronave estavam de acordo com o recomendado.

Após fazer algumas modificações na configuração do GPS e também a mudança de posição na aeronave, foram realizados novos testes de voo para

verificar se ainda existia uma alta interferência magnética. Segundo observado no log (Figura 57), todos os dispositivos estavam funcionando e os resultados dos testes estavam todos dentro dos padrões recomendados para a realização do voo, com a interferência magnética dentro dos limites. Além disso, com a mudança da localização do GPS, a controladora não demorava muito para obter o número mínimo de satélites necessários para o voo através do modo Loiter (voo utilizando o GPS). Além disso, os outros testes continuaram dentro do recomendado, como por exemplo, os testes de balanço de rotor, os ângulos da aeronave, entre outros. Portanto, decidiu-se voar por mais tempo até a aeronave utilizar o recurso de retorno automático (*failsafe*) por falta de bateria, ou seja, quando a aeronave está para atingir o limite estabelecido para indicar que a bateria está acabando, o *failsafe* é ativado e fazendo com que a aeronave volte automaticamente para o local que decolou. Assim, a aeronave voltou de modo seguro pousando na área que decolou, concluindo o teste de voo.



```

LogAnalyzer
Log File C:\Users\LPM106\Documents\Mission Planner\logs\QUADROTOR\1\2017-02-23 15-41-14.log
Size (kb) 18875.5087890625
No of lines 228461
Duration 0:11:46
Vehicletype ArduCopter
Firmware Version V3.4.2
Firmware Hash 6076bdfc
Hardware Type
Free Mem 0
Skipped Lines 0
Test: Autotune = UNKNOWN - No ATUN log data
Test: Brownout = GOOD -
Test: Compass = GOOD - mag_field interference within limits (11.85%)
Test: Dupe Log Data = GOOD -
Test: Empty = GOOD -
Test: Event/Failsafe = FAIL - ERR found: FS_BATT
Test: GPS = GOOD -
Test: IMU Mismatch = GOOD - (Mismatch: 0.63, WARN: 0.75, FAIL: 1.50)
Test: Motor Balance = GOOD - Motor channel averages = [1593, 1645, 1617, 1599]Average motor output = 1613Difference
between min and max motor averages = 52
Test: NaNs = GOOD -
Test: OpticalFlow = FAIL - FAIL: no optical flow data
Test: Parameters = FAIL - THR_MIN' not found
Test: PM = GOOD -
Test: Pitch/Roll = GOOD -
Test: Thrust = GOOD -
Test: VCC = GOOD -

```

Figura 57. Log de voo do segundo teste de voo.

Como já foi mencionado, existem diversos parâmetros para a análise de voo da aeronave obtidos pelo *log* de voo. Alguns parâmetros recomendados pela própria Ardupilot foram analisados para verificar o voo do RPA. Um dos parâmetros analisados com mais detalhe foram os ângulos de *roll*, *pitch* e *yaw* (Figura 58), nele é possível observar se houve falhas mecânicas causados por falha dos ESCs, das

hélices, rotores entre outras falhas. O primeiro gráfico construído foi o roll (roll para esquerda é negativo, direita é positivo) e o Desroll, o Desroll é o ângulo desejado para se ter uma boa angulação e o roll é o ângulo real obtido pela aeronave, o gráfico compara se a aeronave está perto do ângulo desejado contra o ângulo real da aeronave, em que o eixo Y é o valor em graus e o eixo X é o tempo de uso da aeronave representado pelos retângulos brancos em minutos. É importante observar nesses gráficos se as linhas dos ângulos desejados estão sendo seguidas pelos ângulos reais da aeronave, caso não, isso pode indicar uma falha mecânica. Portanto, é observado no gráfico da Figura 59, que o ângulo de roll (linha vermelha) está seguindo bem o ângulo desejado (linha verde). Além disso, os ângulos de pitch (pitch para frente é negativo, para trás é positivo) e yaw (valor 0 é igual a Norte) também seguiram essa tendência e se mantiveram aderentes aos ângulos desejados (DesPitch e DesYaw), como é mostrado no gráfico de pitch vs Despitch e yaw vs Desyaw nas figuras 60 e 61, respectivamente. Assim, pode-se observar que todas as linhas de dos ângulos de roll, pitch e yaw estão seguindo a tendência dos ângulos desejados para aquela posição em que foi registrado, o que significa nenhuma falha mecânica foi encontrada.

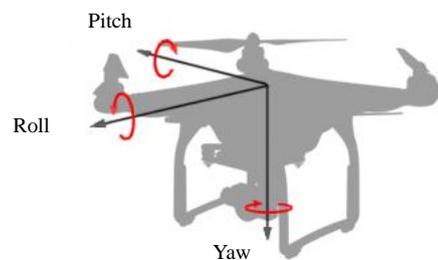


Figura 58. Ângulos de roll, pitch and yaw demonstrados em um RPA.

Fonte: https://developer.dji.com/mobile-sdk/documentation/introduction/flightController_concepts.html

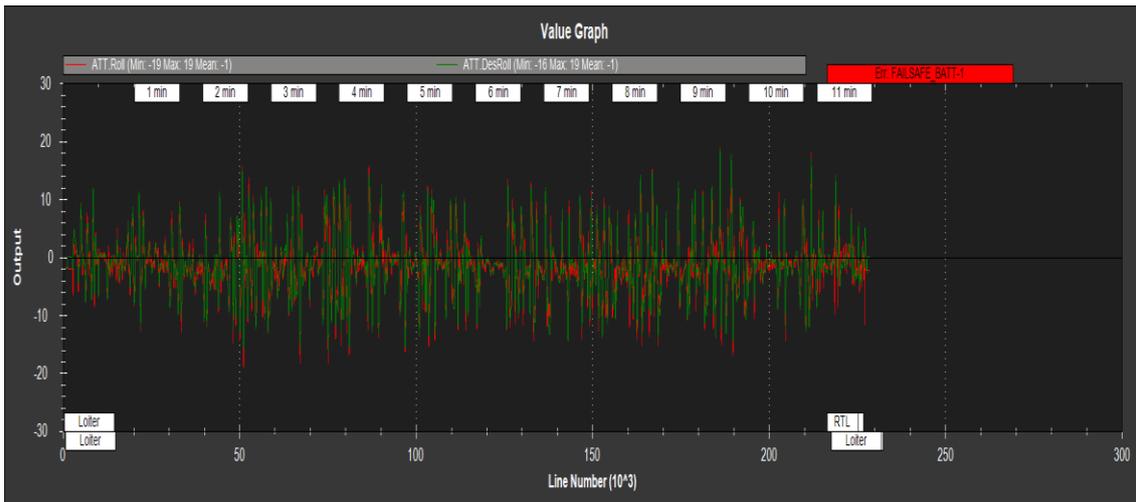


Figura 59. Gráfico Roll (linha vermelha) vs DesRoll (linha verde)

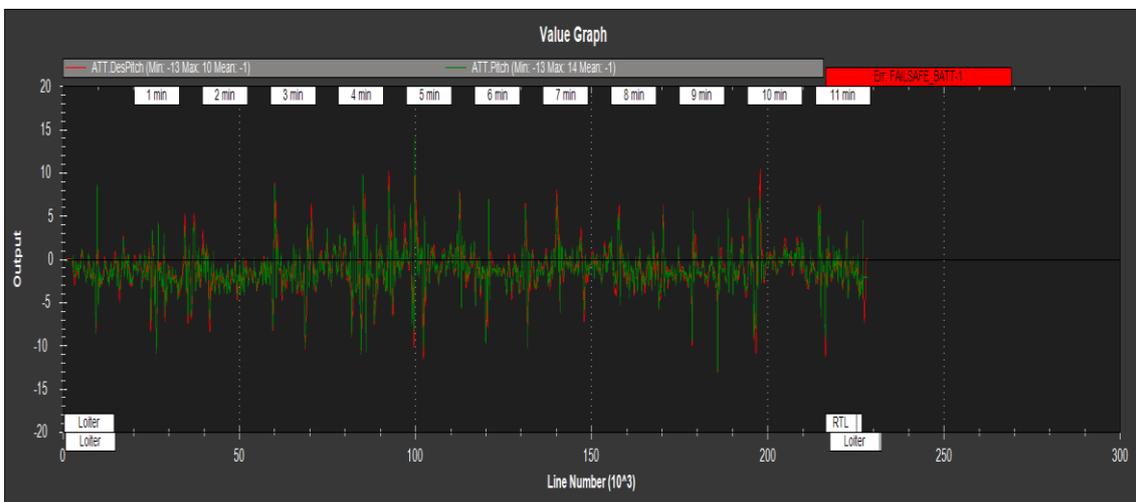


Figura 60. Gráfico Pitch (linha verde) vs DesPitch (linha vermelha)

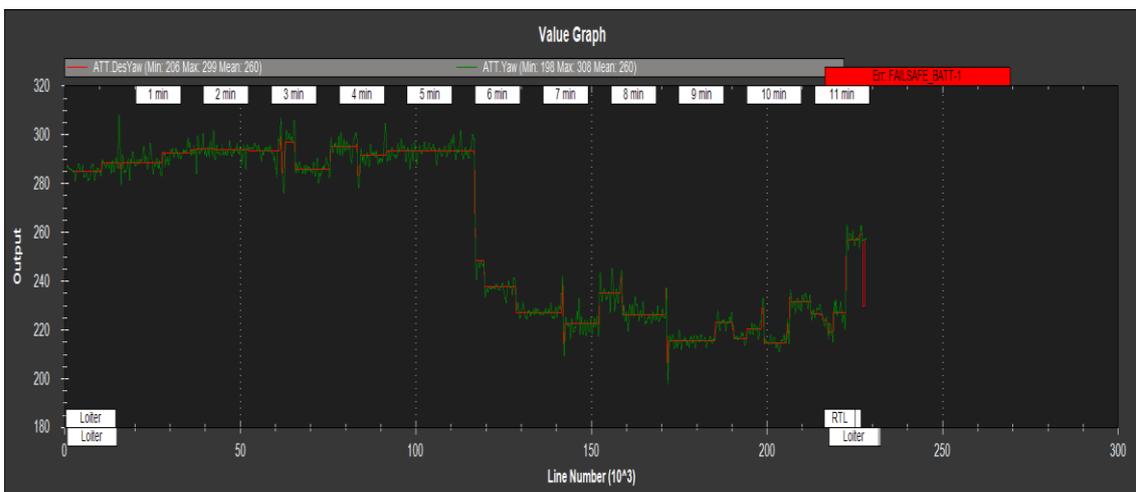


Figura 61. Gráfico Yaw (linha verde) vs DesYaw (linha vermelha)

Outro problema que pode acontecer é a intensidade de vibração do RPA, a existência de vibração é constatada em todos os veículos, porém existem limites aceitáveis. Caso esses níveis sejam ultrapassados podem causar problemas de leituras pelos sensores de medida inercial e do GPS, fazendo com que modos que necessitam medidas mais precisas sejam afetados, influenciando de forma negativa na performance da aeronave. De acordo com a ardupilot os valores normais de vibração estão entre 15 m/s² e 30 m/s², valores acima dessa faixa já podem afetar na leitura dos sensores. Portanto, foi verificado no primeiro teste os níveis de vibração da aeronave através da leitura dos logs iniciais mostrada pela Figura 62, em que vibrações nos eixos X, Y e Z captadas pelos sensores e registradas no log nos primeiros testes de voo e mostram valores acima do recomendado. Os eixos X representa o tempo de registro e Y representa os valores de vibração em m/s². Assim, quando foi realizada a mudança do local do GPS, as leituras ficaram dentro do recomendado, o que pode ser observado na Figura 63.

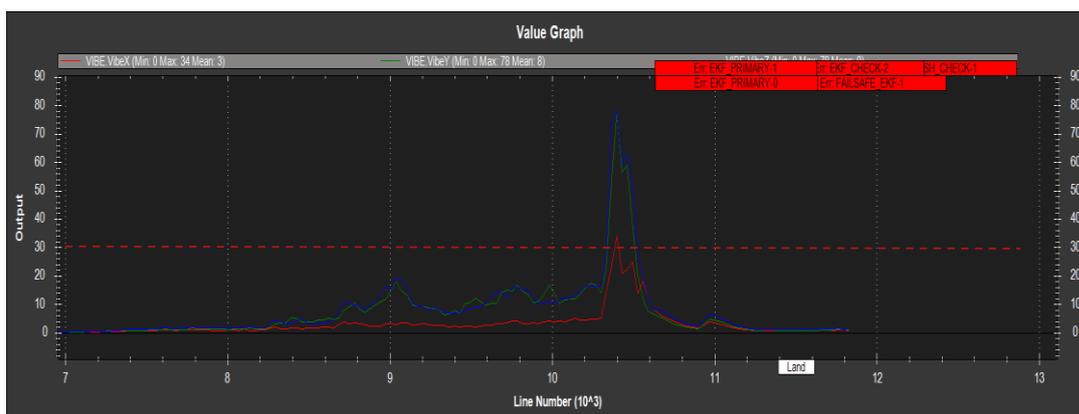


Figura 62. Dados de vibração acima do recomendado.

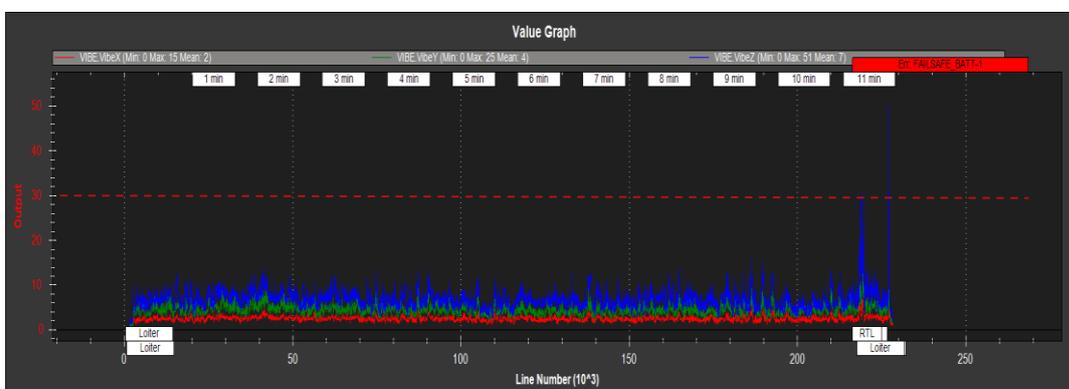


Figura 63. Dados de vibração dentro dos limites.

Além desses parâmetros também foi analisado o parâmetro de número de satélites captados pelo GPS, o NSATS, e o parâmetro que mede a diluição horizontal de precisão do GPS, o HDOP. Portanto, quanto mais satélites forem encontrados, mais precisos vão ser os dados de posição, já para o HDOP, quanto menor for o valor, menor será o nível de diluição de precisão. Através da verificação desses parâmetros é possível analisar se o nível de precisão está baixa ou não, assim os valores recomendados para o número de satélites é acima de 8 e para os valores de HDOP são abaixo de 1,5. Antes da mudança da localização do GPS, os valores obtidos eram abaixo de 9 satélites (Figura 64) e valores acima de 1,5 no HDOP (Figura 65), o que mostra um sério problema de precisão dos dados de posicionamento. Porém após a mudança de localização do GPS, houve uma melhora tanto no número de satélites obtidos e também no nível de diluição de precisão horizontal, como mostram as Figuras 66 e 67. Os valores obtidos para o número de satélites ficaram acima de 9, atingindo o máximo de 10 satélites, para os valores de HDOP se mantiveram dentro do nível recomendado, ou seja, abaixo de 1,5. Então, através dessa melhora é possível realizar voos com uma boa performance utilizando modos de voo em que é necessário uma demanda posicional mais precisa, como o modo automático de voo para coleta de dados.

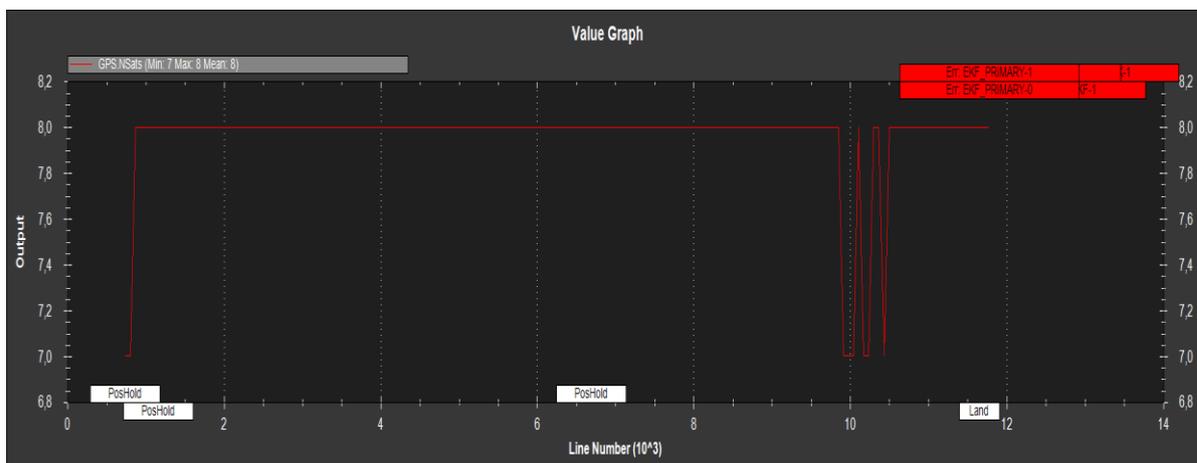


Figura 64. Número de satélites abaixo do recomendado.

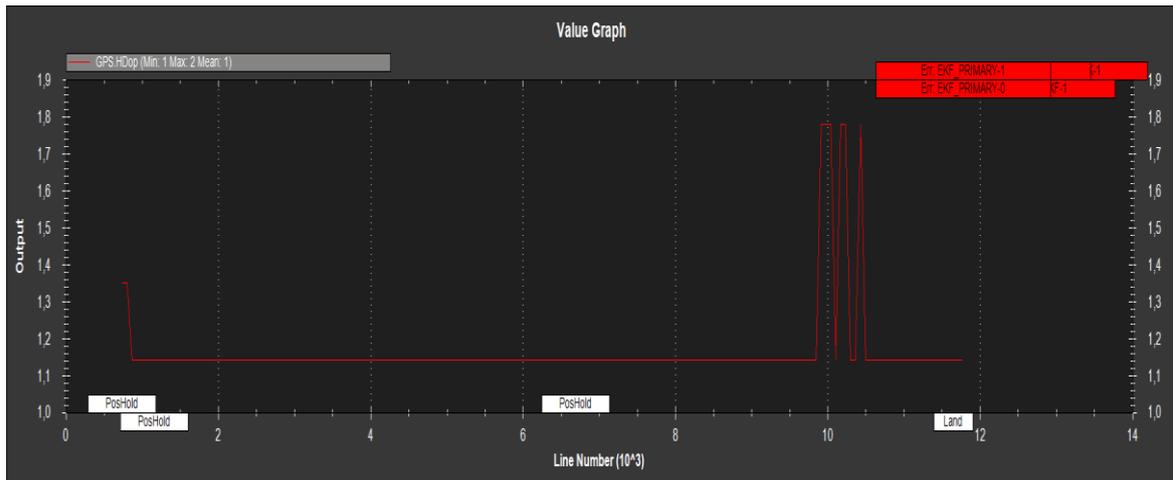


Figura 65. Valor de HDOP acima do valor recomendado.

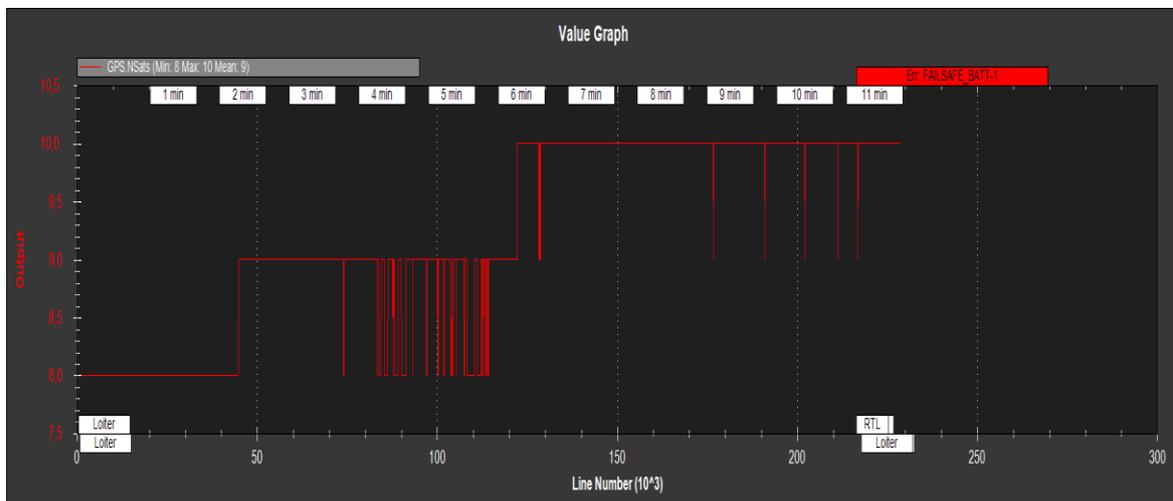


Figura 66. Número de satélites acima do recomendado.

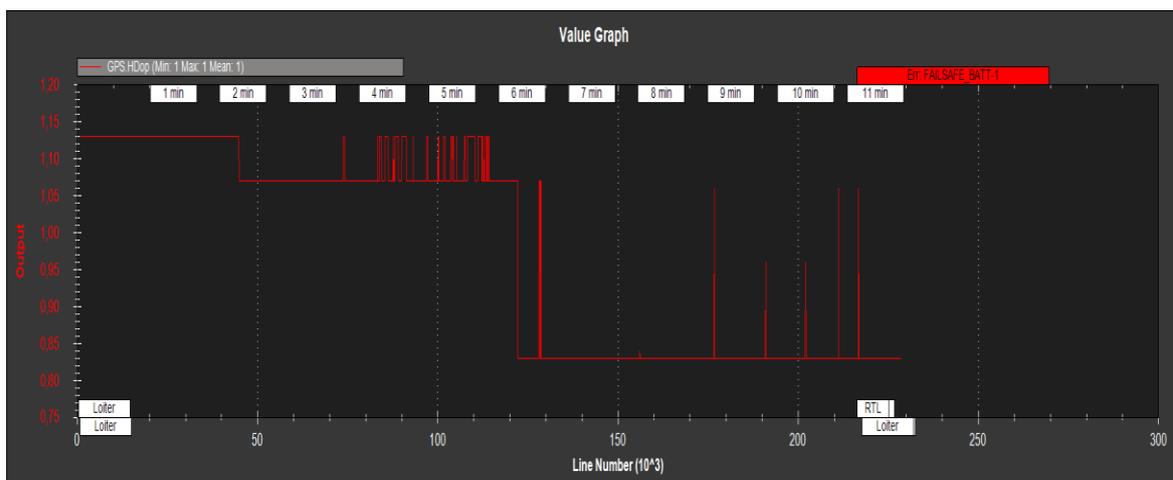


Figura 67. Valores de HDOP no nível recomendado.

Através desses testes realizados pode-se observar que RPA está em condições para utilização de voo com vibrações dentro dos limites para evitar a interferência nos sensores e no GPS e também com pouca diluição de precisão durante o voo, melhorando a precisão posicional. As leituras mecânicas, no caso dos rotores, apresentaram poucas diferenças entre si, mostrando que nenhum está trabalhando mais para compensar o peso da aeronave, ou seja, o RPA está com uma boa distribuição de peso. O número de satélites está dentro do recomendado, melhorando também a precisão posicional.

Conforme os dados analisados, a aeronave mostra-se com um bom desempenho de voo e com capacidade para realizar voos automatizados coletando dados em campo. Em comparação com aeronaves comerciais, por exemplo o Phantom 4 da DJI, a aeronave possui peso de 1388g, sendo o do RPA montado com bateria, hélices e câmera, cerca de 1450g. O tempo de voo entre as aeronaves é maior no phantom 4, sendo que o phantom possui quase 20 minutos de voo até a primeira mensagem de alerta de bateria fraca, já o RPA possui autonomia de aproximadamente 14 minutos até a ativação do *return to launch*. O tempo maior de voo do Phantom 4 é devido a sua bateria de 5870 mAh de 4 células, que fez aumentar a duração de voo, já a bateria utilizada pela a aeronave montada é de 5000 mAh de 3 células. Além disso, foi configurado para que o RPA reservasse 20% do restante da bateria para voltar de modo seguro e fazendo com que o tempo de autonomia de voo diminuísse. Apesar da aeronave apresentar certas características abaixo de uma aeronave comercial, ela ganha em customização e reutilização. Na parte da customização, pode-se utilizar outros sensores, como sensores multi ou hiperespectrais, o que não é possível em plataformas fechadas. Além disso, pode-se fazer troca de peças para melhorar o tempo de voo e o *payload* da aeronave, como por exemplo troca de hélices, rotores e bateria. Na reutilização é possível transformar, caso seja demandado, o quadricóptero em um hexa ou octacóptero, sendo feito as devidas aquisições de peças para cada configuração e também realizadas os devidos ajustes de configuração e montagem do equipamento, o que não possível ser realizado em plataformas fechadas, o que acaba demandando a aquisição de um outro equipamento.

Em relação ao preço da aeronave, os modelos comerciais (R\$6.000,00 – R\$10.000,00) possuem preços mais baixos que o do RPA montado (R\$11.587,00), porém vale ressaltar que essas plataformas comerciais não dão muitas opções de

customização e possibilidade de transportar outros tipos de sensores. O equipamento montado já utiliza um sensor específico (Mapir Survey 2) para análise de mudança e qualidade da vegetação em áreas de mineração, que pode contribuir para a perícia ambiental nesse tipo de área. Sensores RGB presentes na grande maioria dos equipamentos comerciais e montados por empresas acabam não conseguindo fazer esse tipo de análise, devido a não detectarem esse faixa de frequência da luz não visível do espectro eletromagnético. Entre os modelos montados por empresas brasileiras, a X600 da Xfly possui valor menor que a aeronave montada no projeto, porém a X600 não vem com nenhum sensor embarcado, o que facilmente pode ficar mais caro se colocar um sensor Mapir. Como contrapartida, é um modelo do tipo hexacóptero, que possui capacidade de embarcar sensores mais pesados, porém torna-se de difícil transporte, devido ao tamanho e peso do equipamento. Vale ressaltar, que o modelo montado para esse trabalho possui diversas vantagens, tais como: fácil transporte; preço menor que equipamentos montados no mercado; possibilidade de customização e reutilização de peças; sensor para aplicação ambiental. Entretanto, também possui algumas desvantagens, tais como: não suporta sensores de maior peso; tempo de voo abaixo de alguns modelos; custo maior que alguns equipamentos comerciais. Assim, o RPA acaba sendo uma plataforma viável em custo/benefício para ser utilizada em mapeamentos e em treinamentos de voo.

4.3 Análise do simulador

Após a utilização do simulador pelos alunos, foi então realizado uma pesquisa de opinião através de um questionário de 8 perguntas para verificar e discutir a eficácia do simulador no treinamento de pilotos iniciantes.

A primeira pergunta (P1) realizada foi: avalie o desempenho do simulador. Através dela foi questionado o desempenho do simulador (travamentos, bugs), ou seja, se o simulador estava com uma qualidade de boa para ser utilizado. Foram então disponibilizados cinco alternativas de respostas, que são: muito bom, bom, mediano, ruim e muito ruim. As respostas podem ser observadas no gráfico da Figura 68.

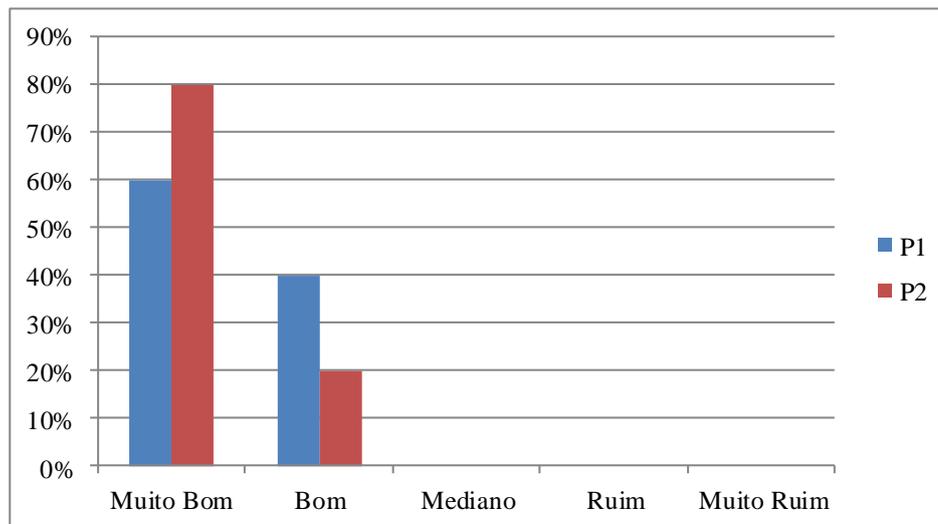


Figura 68. Gráfico das resposta das perguntas: P1 e P2.

Atravé desse resultado pode ser observado que os usuários acharam bastante satisfatório o desempenho do simulador, ou seja, não apresentando bugs ou erros que atrapalhassem a experiência deles na hora da utilização.

A segunda pergunta (P2) no questionário foi: avalie a jogabilidade utilizando um joystick para controlar a aeronave. Através desse questionamento é possível verificar se o controle adaptado para controlar o RPA virtualmente, proporcionava uma boa jogabilidade e conseguindo responder aos comandos do usuário. Assim foram disponibilizados as mesmas alternativas da pergunta 1. Pode-se observar as resposta dessa pergunta na Figura 68.

O gráfico acima mostra a boa aceitação da utilização de um joystick para o controle dos comandos do drone, o que proporcionou também a possibilidade dos participantes receberem as primeiras instruções de comando de um RPA antes de pegar um equipamento real. Assim, na hora que eles foram ter o primeiro contato com a aeronave real, eles já tinham conhecimento dos mesmos comandos da aeronave. Vale ressaltar que existem simuladores que proporcionam o controle através de um rádio controle com conexão no computador, porém um joystick conseguiu também suprir essa experiência, conforme demonstrado no gráfico acima.

A terceira pergunta (P3) foi relacionado ao nível de dificuldade dos desafios propostos no simulador, sendo a pergunta: Avalie os desafios realizados dentro do

simulador. Todos os desafios tem como propósito estimular o usuário a treinar e se habituar com os comandos da aeronave, sendo colocado um tempo regressivo para estimular o usuário a realizar o objetivo proposto. Então foi proposto cinco alternativas de respostas: muito fácil, fácil, mediano, difícil e muito difícil. Conforme o gráfico abaixo foi analisado os dados obtidos.

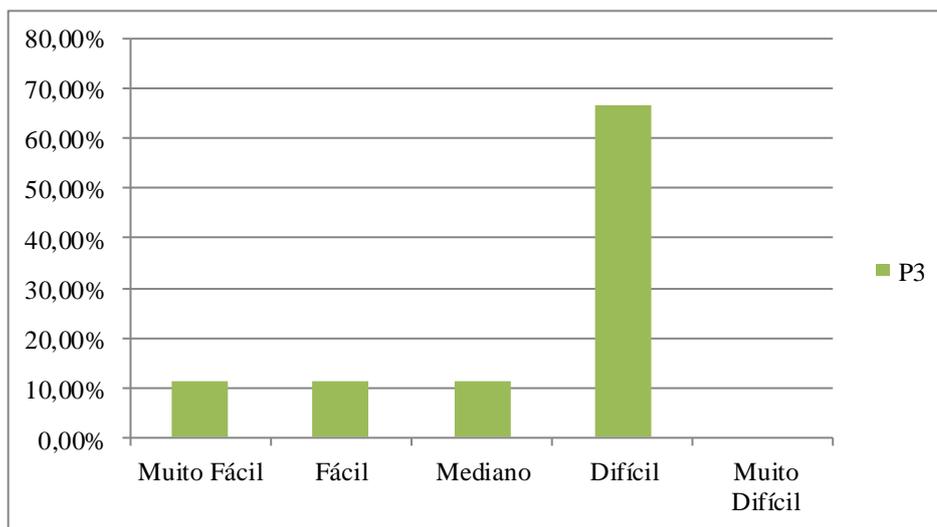


Figura 69. Figura do gráfico da pergunta P3

Através do gráfico foi possível perceber a dificuldade que os usuários estavam tendo na hora de realizar os objetivos. O motivo principal foi justamente o tempo que eles tinham para realizar a tarefa, pois além de se acostumarem com os comandos, eles teriam que localizar os objetivos espalhados pelo cenário. Através disso foi realizado o ajuste dos tempos de cada tarefa e assim os usuários poderiam ter o tempo de se acostumar com o controle, localizar e realizar o objetivo proposto em cada cenário.

A quarta pergunta (P4) serviu para analisar o nível de imersão dada pela realidade virtual dentro do simulador, sendo a pergunta: analise a imersão dada pela realidade virtual dentro do jogo. Através do equipamento HTC Vive foi possível integrar a realidade virtual dentro do simulador, colaborando para melhorar a imersão dos usuários no treinamento. Os resultados foram dados pelo gráfico da Figura 70.

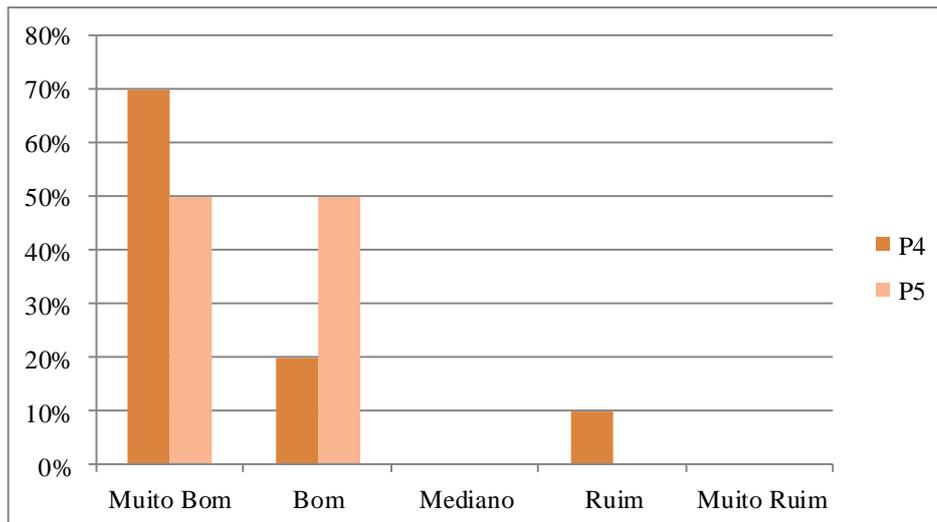


Figura 70. Resultados das perguntas P4 e P5.

O resultado mostra uma boa aceitação da realidade virtual no simulador, sendo o motivo disso a boa imersão que a realidade virtual pode proporcionar ao usuário. Porém, alguns podem sentir um certo desconforto na utilização dos óculos de realidade virtual, tontura ou terem dificuldade em enxergar dentro do ambiente, o que aponta 10% dos que utilizaram o óculos.

A quinta pergunta (P5) foi utilizada para saber se o cenário construído apresentava uma boa estética e também se servia para dar uma boa imersão de ambientalização do simulador, sendo a pergunta feita: avalie o cenário construído para o treinamento virtual. Conforme a figura 70, pode ser constatado uma boa aceitação do cenário construído para o treinamento virtual com os usuários.

A sexta pergunta (P6) teve como objetivo verificar se as pessoas que utilizaram o simulador já tinham utilizado um equipamento real, o que serviu como dado quantitativo daqueles que já tiveram contato ou não com RPAs. Além disso, constatou-se que alguns tinham mais confiança e facilidade com os comandos que outros na hora do treinamento, porém isso não se pode levar muito em consideração, devido a algumas pessoas serem habituados com jogos utilizando joystick. Através da figura 71, pode ser observado que a maioria nunca teve contato com voos de RPAs, sendo 60% do universo pesquisado. Assim, proporcionando para a maioria o primeiro contato com voos com drones.

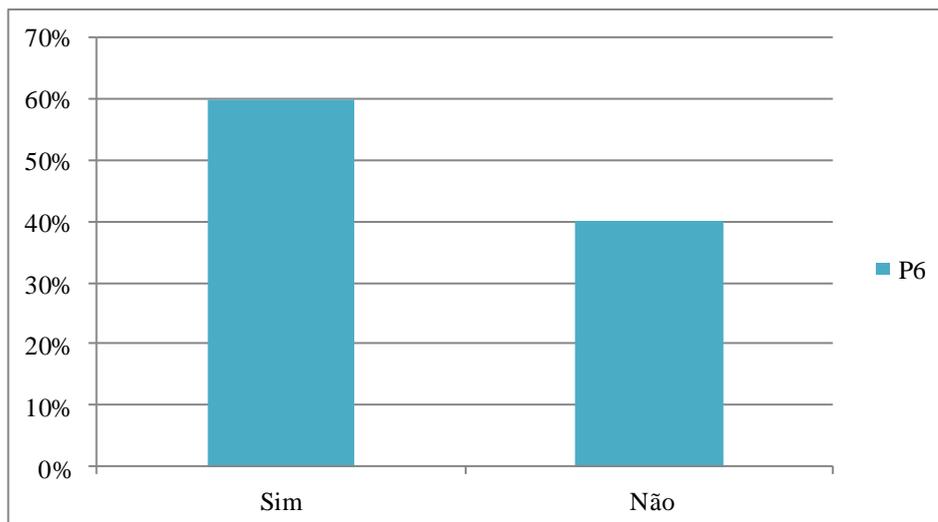


Figura 71. Resultado da pergunta P6.

A pergunta P7 ajudou a coletar os dados para saber se o simulador contribuiu para a experiência de voo com um equipamento real, sendo a pergunta: avalie se o simulador ajudou na experiência de voo ao utilizar um equipamento real. Através das respostas dadas, o gráfico (Figura 72) mostra que o simulador ajudou no primeiro contato com um equipamento real, sendo bem positivas as opiniões coletadas. Além disso, no dia do treinamento com o equipamento real foi observado que as pessoas tinham mais confiança ao pilotar e também preservaram o conhecimento dos comandos de voo com o RPA aplicados no treinamento virtual.

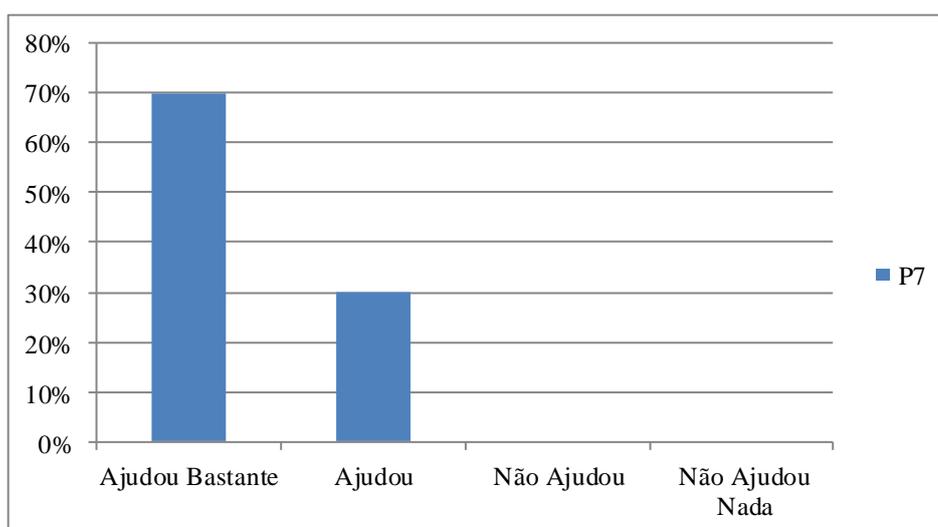


Figura 72. Resultado da pergunta P7.

A última pergunta (P8) serviu para verificar se os comandos realizados em um *joystick* se assemelhava a um controle real e assim dar uma impressão de estar controlando um equipamento real, sendo a pergunta: avalie se o controle da aeronave virtual apresenta as mesmas funcionalidades de um controle de um equipamento real. O gráfico (Figura 73) das repostas foram bem positivas, o que pode se considerar o uso do *joystick* para o treinamento virtual, pois os *sticks* de controle se assemelham ao controle analógico dos *joysticks* atuais de *video games*. Porém, vale ressaltar que um rádio controle apresenta as mais diversas funcionalidades e diferenças, dependendo de como for configurado, como por exemplo controle de guimbal, mudança de modo de voo e entre outras funções. Então futuramente essas funções possam ser adicionadas nos botões de *joystick* para dar uma semelhança maior ao usuário, quando for utilizar o simulador.

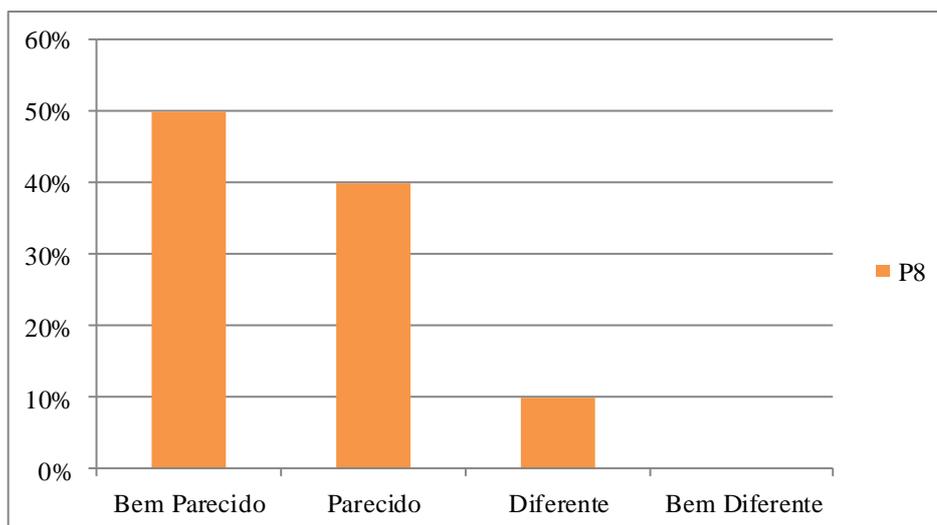


Figura 73. Resultado das resposta da pergunta P8.

Ao analisar todas as respostas dos questionários, foi possível verificar respostas positivas na utilização do simulador o que ajudou a fazer ajustes no simulador e também se a utilização contribuiu para um primeiro contato de treinamento de voo com um RPA. Além disso, sugestões foram conversadas com os que utilizaram o simulador para poder serem implementadas futuramente e melhorar ainda mais a experiência do usuário. Vale ressaltar, que o propósito do simulador é melhorar a experiência do primeiro contato do piloto com um equipamento real e também proporcionar um conhecimento básico dos comandos

de voos de um RPA, o que pode servir como aliado na fase de treinamento de voo, mas não dispensando o treinamento com um equipamento real. Assim, a ferramenta de treinamento proporcionou uma boa experiência aos pilotos iniciantes e maior imersão na utilização da realidade virtual.

CAPÍTULO 5

5.1 Conclusão

Para a construção do RPA foram necessários estudos específicos de cada parte dos componentes para entender o funcionamento e também como cada peça influencia no voo da aeronave. Além disso, toda a configuração da aeronave também é de fundamental importância para um bom funcionamento e evitar acidentes. A aeronave mostrou ser uma alternativa aos produtos comerciais disponíveis, mas sem dúvida requer maior conhecimento para toda a questão de montagem e configuração da aeronave. O grande ponto positivo foi a possibilidade de interagir com uma placa controladora de voo que possui alternativas para receber outros tipos de dispositivos. Apesar de não ser possível embarcar nessa aeronave especificamente dispositivos maiores e de maior peso, em função da capacidade de carga, o mesmo poderia ser feito usando a mesma controladora e uma estrutura e rotores mais robustos. Em função da popularização e da crescente e rápida evolução dos RPAs (principalmente os comerciais) o protótipo que foi montado inicialmente com um propósito de “baixo custo” tornou-se de valor equivalente ou até superior a equipamentos semelhantes inclusive com outra tecnologia embarcada, porém em comparação com RPAs montados por empresas, ele acabou se tornando uma plataforma viável, estando entre um dos menores valores presentes na tabela de preços.

O equipamento após a montagem ficou com 1,45 Kg e com tempo de voo de 14 min, o que atende a demanda do projeto, mas o tempo de voo é pequeno, se comparado aos modelos comerciais atuais, sendo assim um ponto negativo. Entretanto, como a média dos tempos de voo para a coleta de dados era de, aproximadamente, 10 min, ele acaba se tornando viável para o projeto. Vale ressaltar que combinações de ESCs e hélices, além do uso de materiais mais leves do *frame* da aeronave, podem aumentar o tempo de voo, mas isso demandaria mais tempo para testar as configurações e também mais recurso para a compra dos equipamentos. Além de atender o projeto, o equipamento também se aplica para o treinamento de pilotos iniciantes, pois além de um treinamento virtual, o contato com um equipamento real é de fundamental importância para o piloto adquirir experiência de pilotagem.

A fase de testes com aeronave foi de fundamental importância, pois ajudou na melhoria e no ótimo funcionamento da aeronave. Através da interação com a placa controladora e o *software* Mission Planner, foi possível coletar os dados brutos gerados pelos *Logs* de voo e transformar em informações relevantes pelo Mission Planner, podendo assim gerar análises de desempenho da aeronave. Todos os testes realizados serviram de parâmetro de desempenho, o que refletiu na hora de realizar os voos, como por exemplo, a detecção da alta interferência magnética gerada pelos componentes eletrônicos no GPS, o que ajudou na mudança de local do GPS e após isso houve a diminuição do erro de leitura posicional da aeronave, o que ajudou diretamente na utilização de voo automático. Portanto, cada teste realizado e também a análise dos dados foram positivos para o entendimento ainda maior do funcionamento da aeronave e do Mission Planner.

A plataforma Unity teve um papel muito importante na construção da ferramenta de treinamento de voo, através da vasta biblioteca de objetos 3D, material de estudo, scripts para adicionar funcionalidades e fácil integração com o equipamento HTC Vive, o que proporcionou avanços na implementação. O grande ponto positivo do simulador é a imersão com a realidade virtual, o que foi de ótima aceitação pelos usuários que testaram o simulador. Porém, a utilização de modos de voo da aeronave e utilização de outras aeronaves ficou de fora, o que acaba sendo uma desvantagem em relação aos outros *softwares* utilizados. Além disso, outras implementações podem ser refinadas para melhorar o controle da aeronave e as interações do usuário com o cenário podem deixar o ambiente mais “vivo” e imersivo.

Durante o desenvolvimento foram realizados diversos testes para verificar erros de programação e ajustes para tornar a ferramenta mais estável possível. Além disso, testes com usuários também foram aplicados para ter um *feedback* do que o *software* ainda precisava ser ajustado. A primeira aplicação em usuários foi realizada na fase Beta de desenvolvimento, em que após testes anteriores verificou-se que o *software* estava estável e funcionando de modo correto. O treinamento foi realizado com diversas pessoas, em que cada um teria 10 minutos para completar os objetivos propostos pelo simulador, após isso foi aplicado também um treinamento com equipamento real e ao final um questionário foi enviado para colher as opiniões de como foi a experiência deles através do treinamento virtual.

O questionário constituído de 8 perguntas comprovou a eficácia do uso da plataforma de treinamento para pessoas que nunca haviam tido contato com pilotagem. Também foi de importante para saber a experiência deles com o treinamento virtual e serviu para direcionar alguns ajustes e melhorias do próprio simulador. Através das análises das respostas dos usuários, pode-se verificar *feedbacks* positivos da ferramenta na utilização de um treinamento virtual como suporte no treinamento de pilotos iniciantes antes do treinamento com um equipamento real.

Através de vários testes realizados com o RPA desenvolvido e análise dos dados coletados através de *logs* de voo, o equipamento mostra-se pronto para voo e ser utilizado em diversas aplicações, como por exemplo, coleta de dados em campo, aplicações ambientais através da câmera Mapir, treinamento de voo e entre outras. Vale ressaltar a vantagem de customização de equipamento e a utilização de outros tipos de sensores. Além disso, o simulador proporcionou o treinamento virtual para pilotos iniciantes, o que pode ser utilizado em aulas para pilotos iniciantes servindo de suporte para o treinamento com um equipamento real. Então com o desenvolvimento do equipamento vai servir para diversas aplicações no projeto alocado e através do simulador de voo vai ser possível produzir pilotos capacitados para atender ao projeto e também para as outras áreas de aplicações com RPAs.

5.2 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros algumas modificações no RPA podem melhorar o desempenho do mesmo e também a coleta de dados . Além disso novas implementações no simulador podem ajudar na experiência do usuário no treinamento virtual.

Alguns equipamentos da aeronave podem ser trocados e melhorar ainda o tempo de voo e *payload*. O *frame* da aeronave é feito de material resistente, porém pode ser trocada para um material mais leve como fibra de carbono, que também possui uma boa resistência contra batidas ou quedas. O conjunto de hélices e rotores podem ser trocados também o que pode melhorar no aumento de *payload* da aeronave, através dessa mudança pode ocorrer da aeronave se tornar menos ágil e mais “pesada” no sentido de pilotagem, mas deve-se observar se isso não irá demandar outros ESCs e conseqüentemente a demanda de uma bateria de maior

capacidade, o que poderia aumentar o peso da aeronave e diminuindo o tempo de voo. Além disso, um gimbal de estabilização de imagem pode substituir um kit de antivibração do sensor instalada no RPA, mas vale ressaltar que isso demandará configuração do gimbal e também pode aumentar o peso da aeronave. Além dessas mudanças, a aeronave também pode mudar de configuração de quadricóptero para um hexa ou octacóptero sendo reaproveitado as peças que já tem e adquirindo as que faltam, porém deve-se observar se essas mudanças vão ser realmente necessárias.

Algumas mudanças podem ser realizadas no simulador para poder melhorar a experiência do usuário, tais mudanças podem ser:

- Pilotagem de diferentes aeronaves;
- Escolha dos níveis no menu principal;
- Implementação de cenários reais, para dar mais realismo no simulador;
- Implementar diferentes funções no controle da aeronave, como controle da angulação da câmera do RPA;
- Adição de bússola para indicar em qual sentido a aeronave está se deslocando;
- Adição de mais elementos “vivos” ao cenário para simular operações de mineração, por exemplo, movimentação de caminhões;
- Implementação de diferentes modos de voo, como por exemplo, voo de RPA sem utilizar o modo de GPS.
- Implementação de mais objetivos para treinamento de voo virtual;

Através dessas modificações pode melhorar ainda mais o treinamento de voo e proporcionar maior realismo ao simulador, proporcionando uma melhor aprendizagem de pilotagem para os pilotos iniciantes.

6. BIBLIOGRAFIA

Andrade, R. O. O voo do Falcão. Pesquisa Fapesp, n. 11, 2013.

Annavarapu, S. & Kumar, P. G. Development of Drones to Collect Geotechnical Data in Large Underground Mines. **APCOM 2015: Proceedings 37th International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry**, Faibanks, AK, USA, 2015.

Amory, A. Game object model version II: a theoretical framework for education game development. **Educational Technology Research and Development**, v. 55, n. 1, p. 51-77, 2007.

Barrado, C.; Meseguer, R.; López, J.; Pastor, E.; Santamaria, E.; Royo, P. Wildfire monitoring using a mixed air-ground mobile network. **IEEE Pervasive Computing**, v. 9, n. 4, p. 24–32, 2010.

Bendea, H.; Chabrando, F.; Tonolo, G. F.; Marenchino, D. Mapping archaeological aereas using a low-cost uav the augusta bagienorum test site. **XXI International CIPA Symposium**, 2007, Atenas, Grécia.

Bento, F. M. Unmanned Aerial vehicles: An Overview. **Inside GNSS Magazine**, v. 3, n.1, 2008.

Bicho, P. C.; Silva, S. L.; Medeiros, C. W.; Silva, A. C.; Junior, K. E. F.; Gondim, O. R.; Junior, S. C. J.; Christakou, D. E.; Fonteles, N. R. H.; Almeida, L. B. A. Projeto μ VANT - uma parceria DNPM/UNB para desenvolvimento e uso de μ VANTs na fiscalização de atividades minerais não tituladas. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Foz do Iguaçu, Paraná, 2013.

Blana, E. A survey of driving research simulators around the world. Leeds: Institute of Transport Studies, 1996, p. 76.

Blyenburgh, V. P. UAVs: and Overview. **Air & space Europe**, v. 1, n. 5-6, p. 43-47, 1999.

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro. **ICA 100-40**. Rio de Janeiro, 2015.

Bresciani, T. Modelling, Identification and Control of a Quadrotor Helicopter. 2008, p. 170. Dissertação (Department of Automatic Control) - Lund University, Lund, 2008.

Burkamshaw, L. K. Towards a Low-Cost Quadrotor Research Platform. 2010, p. 67. Dissertação (Master of Science in Software Engineering) - Naval PostGraduate School, Monterey, California, 2010.

Capolupo, A.; Pindozi, S.; Okello, C.; Fiorentino, N.; Boccia, L. Photogrammetry for environmental monitoring: The use of drones and hydrological models for detection of soil contaminated by copper. **Sci. Total Environ**, v. 514, p. 298-306, 2015.

Casbeer, W. D.; Kingston, B. D.; Beard, W. R.; McLain, W. T. Cooperative Forest Fire Surveillance Using a Team of Small Unmanned Air Vehicles. **International Journal of Systems Science**, v. 00, n. 00, p. 1-18, 2005.

Clarke, R. & Moses, B. L. The regulation of civilian drones' impacts on public safety. **Computer Law & Security Review**, v. 30, n. 3, p. 263-285, 2014.

Clarke, R. Understanding the drone epidemic. **Computer Law & Security Review**, v. 30, n. 3, p. 230-246, 2014.

Colomina, I. & Molina, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 92, p. 79-97, 2014.

Craighead, J.; Burke, J.; Murphy, R. Using the Unity Game Engine to Develop SARGE: A Case Study. **Computer**, v. 4552, p. 233-372, 2007. Eisenbeiss, H. (2004) A mini unmanned aerial vehicle (UAV): System overview and image acquisition. International workshop on processing and visualization using high resolution imagery, Pitsanulok, Thailand.

Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). Disponível em: <https://www.decea.gov.br/drone/>. Acessado em: 11/10/2018.

Eisenbeiss, H., 2009. UAV Photogrammetry. 2009, p. 203. Tese de Doutorado - Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH-Zurich. Zurich, Switzerland, 2009.

El-Nasr, M. S.; Aghabeigi, B.; Milam, D.; Erfani, M.; Lameman, B.; Maygoli, H.; Mah, S. Understanding and evaluating cooperative games. **Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems**, Atlanta, Georgia, USA, 2010.

Federal Aviation Administration (FAA). Integration of Civil Unmanned Aircraft system (UAS) in the National Airspace System (NAS) Roadmap. Primeira Edição. 2013. Disponível em: < https://www.faa.gov/uas/media/uas_roadmap_2013.pdf >. Acessado em: 20/05/2016.

Ferworn, A.; Herman, S.; Tran, J.; Ufkes, A.; McDonald, R. Disaster Scene Reconstruction: Modeling and Simulating Urban Build Collapse Rubble within a Game Engine. **Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics**, Kyoto, Japan, 2011.

Gallacher, D. Applications of micro-USV (drones) for desert monitoring: current capabilities and requirements. **Kubuqi International Desert Forum**, Mongolia, China, p. 1-11, 2015.

Haarbrink, R. B. & Koers, E. Helicopter UAV for Photogrammetry and Rapid Response. **The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS&SIS)**, v. 36, n. 1, Antwerp, Belgium, 2006.

Harris, K.A. & Harris, D. Computer-based simulation as an adjunct to ab initio flight training. **International Journal of Aviation Psychology**, n. 8, p. 261–276, 1998.

Harrison, T. L. Introduction to 3D Game Engine Design Using DirectX 9 and C#. Berkley: Apress, 2003, p. 424.

Hoffmann, M. G.; Huang, H.; Waslander, L. S.; Tomlin, J. C. Quadrotor Helicopter Flight Dynamics and Control Theory and Experiment. **Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference**, 2007.

International Civil Aviation Organization (ICAO). Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS). Primeira Edição. 2015. Disponível em: < <http://www.wyvernlimited.com/wp-content/uploads/2015/05/ICAO-10019-RPAS.pdf> >. Acessado em: 18/05/2016.

Jonassen, H. D. Learning to Solve Problems An Instructional Design Guide. Edição 1. San Francisco: Pfeifer, 2004, p. 256.

Jorge, C. A. L. & Inamasu, Y. R. (2014) Uso de vaículos aéreos não tripulados (VANT) em Agricultura de Precisão. Embrapa Instrumentação, São Carlos, São Paulo.

Jorge, L. A. C. Determinação da cobertura de solo em fotografias aéreas do Projeto Arara. 2001. P. 97. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

Kim, B.; Park, H.; Baek, Y. Not just fun, but serious strategies: Using met-cognitive strategies in game-based learning. **Computers & Education**, v. 52, p. 800-810, 2009.

Ko, H. W. K. S. & Lwin, S. K. Basic Multicopter Control with Inertial Sensors. **International Journal of Scientific and Research Publications**, v. 4, n. 9, 2014.

Koh, P. L. & Wich, A. S. (2012) Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles of conservation. **Tropical Conservation Science**, v. 5, n. 2, p. 121-132.

Korchenko, G. A. & Illyash, S. O. The Generalized Classification of Unmanned Air Vehicles. **IEEE 2nd International Conference “Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments” Proceedings**, p. 28-34, 2013.

Kozuba, J. & Bondaruk, A. Flight simulator as an essential device supporting the process of shaping pilot’s situational awareness. *Proceedings of the International Conference of Scientific Afases*, v. 1, p. 695-714, 2014.

Liu, C. C.; Cheng, B. Y.; Huang, W. C. The effect of simulation games on the learning of computational problem solving. **Computers & Education**, v. 57, p. 1907-1918, 2011.

Lv, Z.; Tek, A.; Da Silva, F.; Empereur-mot, C.; Chavent, M.; Baaden, M. Game On, Science - How Video Game Technology May Help Biologists Tackle Visualization Challenges. **PLoS ONE**, v. 8, n. 3, p. 1-13, 2013.

Maddalon, M. J.; Hayhurst, J. K.; Koppen, M. D.; Upchurch, M. J.; Morris, T. A. Perspectives on Unmanned Aircraft Classification for Civil Airworthiness Standards. **Nasa, Tech. Rep.**, 2013.

Manning, D. S.; Rash, E. C.; LeDuc, A. P.; Noback, K. R.; McKeon, J. The Role of Human Causal Factors in U.S. Army Unmanned Aerial Vehicle Accidents. **U.S. Army Aeromedical Research Laboratory**, Fort Rucker, Alabama, 2004.

Mat, C. R.; Shariff, M. R. A.; Zulkifli, N. A.; Rahim, M. S. M.; Mahayudin, H. M. Using game engine for 3D terrain visualization of GIS data: A review. **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**, v. 20, n. 1, p. 1-11, 2014.

Medeiros, A. F. Desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado para aplicação em agricultura de precisão. 2007, p. 100, Dissertação de Mestrado - Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

Navarro, A.; Pradilha, V. J.; Rios, O. Open Source 3D game Engines for Serious Games Modeling. ISBN:978-953-51-0012-6, DOI: 10.5772/29744.. Disponível em: < <http://www.intechopen.com/books/modeling-and-simulation-in-engineering/open-source-3d-game-engines-for-serious-games-modeling> >. Acessado em: 30/05/2016.

Neris, L. O. um piloto automático para as aeronaves do projeto ARARA. 2001, p. 2001, Dissertação (Mestrado em Ciência Matemática e Computação) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

Newhall, B. Airborne camera: The world from the air and outer space. Primeira Edição. Hasting House, Trowbridge, London, 1969, p. 144.

- Nilsson, C. & Modrack, D. Universal Embedded Motor Control. 2013, p. 47. Dissertação (Embedded Electronic System Design) – University of Gothenburg, Gothenburg, 2013.
- Oliveira, C. L. M. Modeling, Identification and Control of a Quadrotor Aircraft. 2011, p. 57. Dissertação (Cybernetics and Robotics) - Czech Technical University, Praga, República Tcheca, 2011.
- Primicerio, J.; di Gennaro, F. S.; Fiorillo, E.; Genesio, L.; Lugato, E.; Matese, A.; Vaccari, P. F. A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture. **Precision Agric**, v. 13, p. 517-523, 2012.
- Puri, A. Statistical profile generation of real-time UAV-based traffic data. 2008, p. 107. Tese de Doutorado - Department of Computer Science and Engineering, University of South Florida, Florida, 2008.
- Quaritsch, M.; Kruggl, K.; Wischounig-Strucl, D.; Bhattacharya, S.; Shah, M.; Rinner, B. Networked UAVs as aerial sensor network for disaster management applications. **Elektrotechnik & Informationstechnik**, v. 127, n. 3, p. 56-63, 2010.
- Rathore, I. & Kumar, P. N. Unlocking the potentiality of UAV in Mining Industry and its Implication. **International Journal of Innovation Research in Science, Engineering and Technology**, v. 4, n. 3, p. 852-855, 2015.
- Rasi R.J. Desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado para aplicação em pulverização agrícola. 2008, p. 70, Monografia de Especialização (Gerenciamento e utilização de Máquinas Agrícolas) - Pós-graduação em Engenharia Rural, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2008.
- Raza, A. S. Design and Control of a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle. 2010, p. 104. Tese (Electrical and Computer Engineering) - University of Ottawa, Ottawa, 2010.
- Restas, A. Wildfire Management Supported by UAV Based Air Reconnaissance: Experiments and Results at the Szendro Fire Department, Hungary. **First International Workshop on Fire Management**, 2006.
- Rehmann, A.; Mitman, R.; Reynolds, M. A handbook of flight simulation fidelity requirements for human factors research. **Crew Systems Ergonomics Information Analysis Center**, p. 25, 1995.
- Roberts, K. M. The FHWA highway driving simulator. **Public Roads**, v. 44, n. 3, p. 97-102, 1980.
- Rocha, V. R.; Rocha, V. R.; Araújo, B. R. Selecting the Best Open Source 3D Games Engines. **Proceedings of SBGames**, p.333-336, 2010.

Santos, A. R.; Góes, A. V.; Almeida, F. L. Metodologia OriGame; um processo de desenvolvimento de jogos. **Proceedings of SBGames**, p. 125-131, 2012.

Sauvé, L.; Renaud, L.; Kaufman, D.; Marquis, S. J. Distinguishing between games and simulations: A systematic review. **Education Technology & Society**, v. 10, n. 3, p. 247-256, 2007.

Simpson, D. A. Development of an unmanned aerial vehicle for low-cost remote sensing and aerial photography. 2003, p. 191, Dissertação de Mestrado (Engenharia de Biosistemas e Agricultura), Universidade de Kentucky, Kentucky, 2003.

Srinivasan, S.; Latchman, H.; Shea, J.; Wong, T.; McNair, J. Airborne traffic surveillance systems: video surveillance of highway traffic. **Proceedings of the ACM 2nd international workshop on Video surveillance & sensor networks**, New York, USA, 2004.

Tefay, B.; Eizad, B.; Crosthwaite, P.; Singh, S.; Postula, A. Design of an integrated electronic speed controller for agile robotic vehicles. **Proceedings Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA 2011)**, Melbourne, Australia, p.1-8, 2011.

Turner, D.; Lucieer, A.; Watson, C. Development of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for hyper resolution vineyard mapping based on visible, multispectral, and thermal imagery. **Proceedings of the 34th International Symposium on Remote Sensing of Environment**, Sydney, Australia, 2011.

Villasenor, J. What is a drone anyway? Scientific American. Disponível em: <<http://blogs.scientificamerican.com/guest-blog/what-is-a-drone-anyway/>>. Acessado em: 10/05/2016.

Whitehead, K. & Hugenholtz, C. H. Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 1: a review of progress and challenges. **Journal of Unmanned Vehicle Systems**, v. 2, n.3, p. 69-85, 2014.

Whittlesley, J. H. Tethered Balloon for Archaeological Photos. **Photogrammetric Engineering**, v. 36, n. 2, p. 181-186, 1970.