

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

*PEDRO LEÃO DA CRUZ*

**DESENVOLVIMENTO DE UM VANT E ALGORITMOS DE  
AEROFOTOGRAMETRIA NO CONTEXTO DE UMA STARTUP DE  
CONSULTORIA EM SENSORIAMENTO REMOTO**

PORTO ALEGRE

2016

**PEDRO LEÃO DA CRUZ**

**DESENVOLVIMENTO DE UM VANT E ALGORITMOS DE  
AEROFOTOGRAMETRIA NO CONTEXTO DE UMA STARTUP DE  
CONSULTORIA EM SENSORIAMENTO REMOTO**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Professor Dr. Hamilton Klimach

**Porto Alegre  
2016**

### CIP - Catalogação na Publicação

Leão da Cruz, Pedro  
DESENVOLVIMENTO DE UM VANT E ALGORITMOS DE  
AEROFOTOGRAMETRIA NO CONTEXTO DE UMA STARTUP DE  
CONSULTORIA EM SENSORIAMENTO REMOTO / Pedro Leão da  
Cruz. -- 2016.  
113 f.

Orientador: Hamilton Klimach.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Elétrica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2016.

1. VANT. 2. sensoriamento remoto. 3.  
ortorretificação. 4. processamento de imagens. I.  
Klimach, Hamilton, orient. II. Título.

PEDRO LEÃO DA CRUZ

**DESENVOLVIMENTO DE UM VANT E ALGORITMOS DE  
AEROFOTOGRAMETRIA NO CONTEXTO DE UMA STARTUP DE  
CONSULTORIA EM SENSORIAMENTO REMOTO**

Este Projeto de Diplomação foi analisado e julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora.

---

Professor orientador, Prof. Dr. Hamilton Klimach, UFRGS.

---

Regente da disciplina, Prof. Dra. Léia Bernardi Bagesteiro, UFRGS.

Aprovado em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Hamilton Klimach, UFRGS

---

Prof. Dr. Luiz Fernando Ferreira, UFRGS

---

Prof. Dr. Edison Pignaton de Freitas, UFRGS

---

Prof. Esp. Márcio Faccin, ULBRA

*Pracę tę dedykuję mojej małej Żonie.*

## AGRADECIMENTOS

I thank my wife, for being nothing but supportive during this journey.

Agradeço aos meus pais e família, que, com muito amor, me obrigaram a concluir esse estimado curso.

Agradeço ao professor Hamilton, cujo nome meus netos vão ouvir falar como parâmetro superior de excelência docente.

Agradeço aos meus colegas da *PixForce* – *one heck of a ride!*

Agradeço aos meus colegas de curso – *another heck of a ride!*

Agradeço ao DAELE, que me ensinou *crowdsourcing*. E pelo sofá. E café.

Agradeço a todos os autores dos excelentes livros e materiais utilizados durante a minha graduação – *you the real MVP!*

Agradeço ao Departamento de Engenharia Elétrica por me ensinar a trabalhar de forma criativa e inteligente, inclusive sob intensa pressão.

Agradeço ao contribuinte brasileiro pelo investimento de R\$ 88.578,00 na minha graduação<sup>2</sup> e R\$ 121.930,00 no meu ano estudando na Escócia.

Agradeço aos leitores desse texto pela leitura – prêmio máximo pelo meu esforço.

---

<sup>1</sup> Expressão utilizada para designar *players* que se sacrificam pelo time. MVP (Most Valuable Player).

<sup>2</sup><http://www.brasil.gov.br/educacao/2010/03/aluno-universitario-custa-cinco-vezes-mais-que-um-estudante-da-educacao-basica>

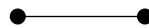
## engenharia

*substantivo feminino*

1. **aplicação de métodos científicos ou empíricos à utilização dos recursos da natureza em benefício do ser humano.**

2. eng formação, ciência e ofício de engenheiro.  
"e. civil, naval"

*Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa, 5ª Edição.*



- *Well I manage my department, and I've been doing that for several years now, and God I've learned a lot of life lessons along the way.*

- *Your department is just you right?*

- ***Yes Jim, but I am not easy to manage.***

*Kelly Kapoor.*

## RESUMO

A redução de custos do ferramental para construção de VANTS (Veículos Aéreos Não Tripulados) permitiu que empresas de diversas áreas pudessem desenvolver soluções específicas. Contudo, ainda existe espaço no mercado brasileiro para empresas de tecnologia desenvolverem produtos. O presente trabalho visa projetar e construir uma plataforma completa para levantamentos aerofotogramétricos comerciais, incluindo um VANT e *softwares* para operação. Além disso, foram implementados algoritmos de ortorretificação e pós-processamento nas áreas florestal e de mineração. É adotado um viés científico-comercial para especificação dos componentes, isto é, utiliza-se o método científico, inclusive no estudo de implementação de ferramentas já disponíveis no mercado. A pesquisa se dá no ambiente de uma *startup* fundada pelo autor, a *PixForce*, cujo foco de atuação principal é sensoriamento remoto e teve duração de 12 meses.

Palavras-chave: VANT, sensoriamento remoto, ortorretificação, PixForce.



## **ABSTRACT**

The lowering costs of tools for construction of UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) allowed companies from different areas to develop specific solutions. However, at the Brazilian market there is still room for technology companies to develop products. This dissertation aims to design and build a complete platform for commercial aerial photogrammetric surveys, including a UAV and operational software. Furthermore, orthorectification and post-processing algorithms were implemented in the forest and mining industries. A scientific-commercial approach was adopted to specify the components of the project, that is, the scientific method is used also in the study of the implementation of tools already available in the market. The research takes place in the environment of a startup founded by the author, PixForce, whose main focus is remote sensing. The research lasted for 12 months.

Keywords: UAV, remote sensing, orthorectification, PixForce.

## **ABSTRAKT**

Obniżenie kosztów narzędzi potrzebnych do konstrukcji dronów sprawiło, iż firmy z różnych dziedzin mogą opracowywać rozwiązania odpowiadające swoim potrzebom - jednak na brazylijskim rynku wciąż istnieje miejsce dla firm technologicznych pracujących nad udoskonalaniem tego typu produktów. Niniejsza praca ma na celu zaprojektowanie i zbudowanie kompletnego zaplecza technicznego służącego komercyjnym pomiarom aerofotogrametrycznym, w tym drona i oprogramowania nim sterującego. Ponadto w ramach badań wdrożono w przemyśle leśnym i górniczym algorytmy ortorektyfikacji i postprocessingu obrazu. Przy wyborze komponentów potrzebnych do realizacji projektu kierowano się podejściem naukowo-komercyjnym, co oznacza, że metoda naukowa została zastosowana także w studium dotyczącym wykorzystania narzędzi dostępnych już na rynku. Obserwacje przeprowadzono w środowisku założonego przez autora pracy startupu, PixForce, którego działalność koncentruje się głównie na teledetekcji. Badanie trwało 12 miesięcy.

Słowa kluczowe: dron (UAV), teledetekcja, ortorektyfikacja, PixForce.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Descrição das etapas do método científico.....	18
Figura 2 – “View from the Window at Le Gras”, a primeira fotografia.....	19
Figura 3 – Fotografia das ruas de Paris feita por Nadar.....	20
Figura 4 – Avião de reconhecimento francês (E) e trincheiras inimigas mapeadas durante a Primeira Guerra Mundial (D). ....	21
Figura 5 – Câmera Hycon 73B.....	21
Figura 6 – eBee, da empresa SenseFly.....	23
Figura 7 – Logotipo da PixForce .....	28
Figura 8 – Sistema de estabilização RX35.....	31
Figura 9 – Avião após queda causada por falha no sistema de GPS. ....	32
Figura 10 – Hardware do sistema PixHawk,.....	34
Figura 11 – Sistema de rádio Turnigy 9X. ....	36
Figura 12 – Encoder PPM-PWM. ....	37
Figura 13 – Telemetria 3DR. ....	38
Figura 14 – Sistemas de rádio.....	39
Figura 15 – Skywalker X8.....	40
Figura 16 – Frequências dos componentes B, G, R e NIR da luz. ....	41
Figura 17 – Detalhe da asa do PixForce One. ....	42
Figura 18 – Modelo do sistema de atuadores. ....	43
Figura 19 – PixForce One sendo lançado pelo operador.. ....	45
Figura 20 – Opções de firmwares disponíveis para upload no PixHawk. ....	61
Figura 21 – Roll, Pitch e Yaw. ....	62
Figura 22 – Funcionamento do sistema de mixagem.....	63
Figura 23 – Exemplo de fluxo de atuação. ....	63
Figura 24 – Efeito do rolling shutter.....	67
Figura 25 – Aeronave do tipo asa voadora (acima) e asa fixa (abaixo). ....	68
Figura 26 – Câmera Sony Alpha 6000 (acima) e Sony QX1 (abaixo). ....	70
Figura 27 – Lente Sony embarca no sistema de fotografia RGB. ....	71
Figura 28 – Circuito do disparador. ....	72
Figura 29 – Velocidade do VANT e o footprint. ....	73
Figura 30 – Mapa NDVI.....	75

Figura 31 – Sensor Sequoia.....	76
Figura 32 – Motor utilizado no PixForce One. ....	79
Figura 33 – Bateria utilizada no PixForce One. ....	81
Figura 34 – Suporte com extensômetros para análise de empuxo. ....	83
Figura 35 – ESC fabricado pela empresa Turnigy.....	84
Figura 36 – BEC utilizado no PixForce One. ....	84
Figura 37 – Monitor de bateria modelo HS100HV.....	87
Figura 38 – Hélices dobráveis. ....	88
Figura 39 – Deslocamento do ar em hélices ....	88
Figura 40 – Adaptador contra o fechamento da hélice. ....	89
Figura 41 – A linha representa o footprint. ....	92
Figura 42 – Sidelap e overlap.....	93
Figura 43 – Tela de acompanhamento da missão. ....	94
Figura 44 – Tela de planejamento da missão.....	94
Figura 45 – Situação ideal de captura. ....	95
Figura 46 – Foto do horizonte. ....	96
Figura 47 – Rampa em uma mina.....	97
Figura 48 – GPS RTK. ....	98
Figura 49 – Ortofoto (E) e imagem distorcida (D). ....	99
Figura 50 – Imagem gerada por VANT (E) e ortofoto (D).....	100
Figura 51 – Ortofotos (E) e ortomosaico (D). ....	101
Figura 52 – A linha vermelha representa a cota Z de uma DSM.....	102
Figura 53 – A linha vermelha representa a cota Z de uma DTM.....	103
Figura 54 – Nuvem de pontos de uma montanha. ....	104
Figura 55 – Região de talhão de floresta. ....	105
Figura 56 – DSM (E) e DTM (D).....	106
Figura 57 – Extrato de um talhão de eucaliptos com 3 meses.....	107
Figura 58 – Índices RGB da cor marrom.....	110
Figura 59 – Resultado discretizado.....	111

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre VANTs. ....	26
Tabela 2 – Fluxo de processos dos serviços da PixForce. ....	29
Tabela 3 – Especificações do Skywalker X8. ....	40
Tabela 4 – Dados levantados e sensor necessário. ....	41
Tabela 5 – Dimensões do compartimento de carga. ....	65
Tabela 6 – Comparação dos diferentes airframes e peso dos motores. ....	65
Tabela 7 – Peso de diferentes payloads ....	66
Tabela 8 – Teste de autonomia baseado no número de baterias. ....	81
Tabela 9 – Modos de voo pré-programados. ....	90
Tabela 10 – Máquina virtual para criação de ortomosaicos. ....	101
Tabela 11 – Índice de sobrevivência no talhão da Figura 59. ....	112

## **LISTA DE SIGLAS**

ANAC agência nacional de aviação civil

DELET departamento de engenharia elétrica

ESC electronic speed controller

FAA federal aviation administration

GIS geographic information system

GPS global positioning system

LiPo polímero de lítio

MOSFET metal oxide semiconductor field effect transistor

P&D projeto e desenvolvimento

PID proportional integrative derivative

PPM pulse position

PWM pulse width modulation

RTL return to launch

RTOS real time operating system

STC standard test conditions

UAV unmanned aerial vehicle

UFRGS Universidade Federal do Rio Grande do Sul

VANT veículo aéreo não tripulado

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 SENSORIAMENTO REMOTO ATUALMENTE E SEU USO COMO FERRAMENTA DE OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS GEOESTATÍSTICOS.....	16
1.2 ABORDAGEM SEGUNDO O MÉTODO CIENTÍFICO.....	17
1.3 APRESENTAÇÃO DO TEXTO .....	18
<b>2 SENSORIAMENTO REMOTO .....</b>	<b>19</b>
2.1 UM BREVE HISTÓRICO DO SENSORIAMENTO REMOTO E SUA DEFINIÇÃO.....	19
2.2 MERCADO ATUAL .....	22
<b>3 PRIMEIRAS TENTATIVAS DE TRABALHO COM VANTS.....</b>	<b>24</b>
<b>4 A CRIAÇÃO DA PIXFORCE.....</b>	<b>28</b>
4.1 ESCOLHA DA ÁREA DE ATUAÇÃO.....	28
4.2 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO.....	29
4.3 SISTEMA DE CONTROLE E SISTEMA AUTÔNOMO.....	30
4.4 SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO.....	35
4.5 FUSELAGEM DO AVIÃO.....	39
4.6 SENSORES PARA FOTOGRAMETRIA.....	40
4.7 ATUADORES.....	42
4.8 RECURSOS EM SOLO.....	44
4.9 PRIMEIRO PROTÓTIPO DO PIXFORCE ONE.....	44
<b>5 TRATAMENTO DAS IMAGENS E PÓS PROCESSAMENTO .....</b>	<b>46</b>
<b>6 EXTRAÇÃO DE DADOS .....</b>	<b>47</b>
<b>7 CONCLUSÕES .....</b>	<b>48</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>50</b>

<b>APÊNDICE A - ESPECIFICAÇÕES E APLICAÇÕES DO HARDWARE DO PIXHAWK.....</b>	<b>58</b>
<b>APÊNDICE B - ESPECIFICAÇÕES E APLICAÇÕES DO SOFTWARE DO PIXHAWK.....</b>	<b>61</b>
<b>APÊNDICE C - ESPECIFICAÇÕES E ESTUDO DA FUSELAGEM DO AVIÃO....</b>	<b>64</b>
<b>APÊNDICE D - ESPECIFICAÇÕES E ESTUDO OS SENSORES PARA AEROFOGRAMETRIA .....</b>	<b>69</b>
<b>APÊNDICE E - ESPECIFICAÇÕES E ESTUDO DOS ATUADORES E DRIVERS</b>	<b>77</b>
<b>APÊNDICE F - RECURSOS DE SOLO .....</b>	<b>90</b>
<b>APÊNDICE G - CRIAÇÃO DE ORTOMOSAICOS .....</b>	<b>95</b>
<b>APÊNDICE H - CRIAÇÃO DE DTMS.....</b>	<b>102</b>
<b>APÊNDICE I - ÍNDICES DE SOBREVIVÊNCIA EM FLORESTAS .....</b>	<b>107</b>



## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 SENSORIAMENTO REMOTO ATUALMENTE E SEU USO COMO FERRAMENTA DE OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS GEOESTATÍSTICOS.

A capacidade de adquirir-se dados remotamente, somada à necessidade de se extrair resultados otimizados de processos comerciais, criam um ótimo ambiente para o desenvolvimento de novas tecnologias de aquisição e processamento de dados, em especial, neste trabalho, os oriundos do campo. Em paralelo, a obtenção de informações em tempo real e o controle de processos comerciais modernos dependem fundamentalmente da precisão, constância e robustez das ferramentas de levantamento. Ainda que seu início em larga escala tenha sido na área bélica e de pesquisa científica, como coloca Stichelbaut (2008), o mercado utiliza-se de ferramentas de sensoriamento remoto, especialmente os satélites, como forma de atender às características descritas, desde os primeiros lançamentos, na década de 50 (AVERY e BERLIN, 1992).

Contudo, nos últimos dez anos, as tecnologias de miniaturização de motores e aviônica<sup>3</sup> permitiram a rápida expansão dos VANTs, Veículos Aéreos Não Tripulados. Somado a isso, começou-se a desenvolver instrumentos e sensores embarcados a essas aeronaves (EVERAERTS, 2008). Entretanto, o mercado brasileiro, ainda bastante conservador em relação ao uso de novas tecnologias, não conta com empresas que ofereçam serviços especializados no desenvolvimento de tecnologia em sensoriamento remoto, especialmente com o uso de VANTs. Imediatamente, surge o contexto do problema abordado por esse projeto de pesquisa: um reduzido mercado nacional de desenvolvimento comercial de tecnologias em sensoriamento remoto.

Tendo reconhecido o apelo comercial, essa pesquisa objetiva definir estratégias de projeto e desenvolvimento de ferramentas e um modelo de negócios que permita a inserção no mercado, de forma competitiva, de um startup<sup>4</sup> criada pelo autor desse texto, em conjunto com colegas do DELET, Departamento de Engenharia Elétrica da UFRGS. As ferramentas desenvolvidas ao longo deste texto são:

---

<sup>3</sup>Eletrônica aplicada à aviação. Do inglês *aviation electronics*.

<sup>4</sup>Empresas iniciantes de tecnologia.

- a. Um VANT.
- b. Algoritmos de criação de mosaicos com as imagens do VANT.
- c. Algoritmos de extração de dados oriundos das imagens.

## 1.2 ABORDAGEM SEGUNDO O MÉTODO CIENTÍFICO.

Essa startup será o cenário da pesquisa e fonte dos dados. Ainda que o contexto imediato não seja um circuito elétrico, ao problema será abordado aplicando-se, constantemente e em todas as tomadas de decisão e etapas do desenvolvimento, métodos de resolução ensinados ao longo do curso de Engenharia Elétrica, principalmente o método científico, assim como apresentado ilustrado na **Figura 1**. Define-se então a metodologia de pesquisa.

Além disso, estipula-se que o presente relatório de pesquisa aborda a tecnologia embarcada ou desenvolvida pelo autor e, em determinados casos, pelo time de desenvolvimento gerenciado por ele.

Organizou-se os capítulos da seguinte forma:

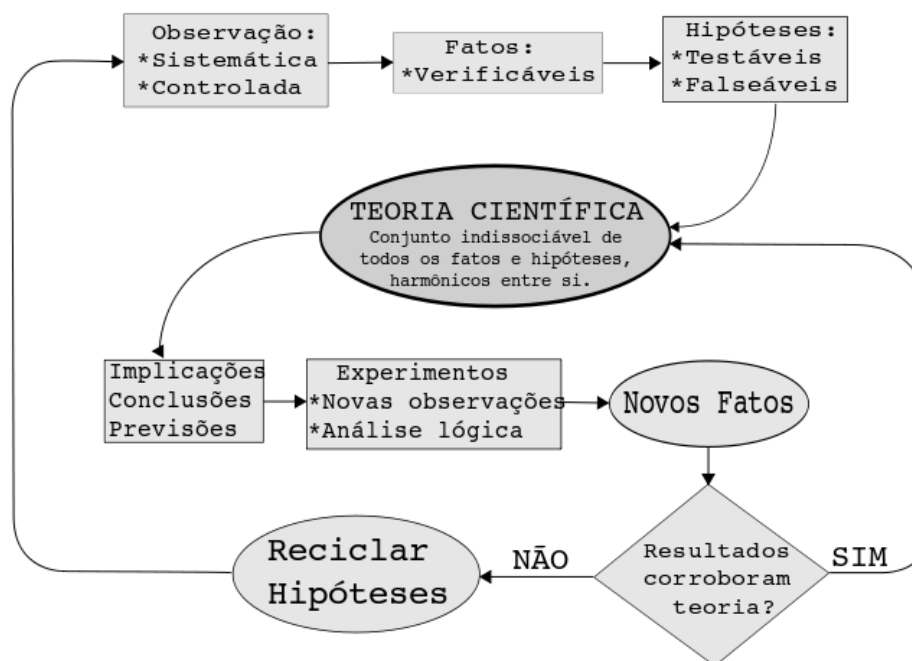
- a. Pesquisa bibliográfica sobre a parte do projeto descrita;
- b. hipótese - formada pela soma de discussões sobre a implementação do dispositivo e considerações sobre o aspecto comercial da ferramenta (i.e. custo e mercado);
- c. teoria - no caso dessa pesquisa, são os protótipos das ferramentas desenvolvidas (i.e. versões beta<sup>5</sup> dos VANTs e algoritmos);
- d. testes e resultados – tanto os testes de ordem técnica, como os de receptividade do mercado;

---

<sup>5</sup> Versão de um produto que ainda se encontra em fase de desenvolvimento e testes.

- e. novas versões – por falta de excelência técnica ou não aceitação do mercado.

**Figura 1** - Descrição das etapas do método científico.



Fonte: Wikipédia (2016, imagem digital).

### 1.3 APRESENTAÇÃO DO TEXTO

Devido à dimensão e escopo do trabalho, organizou-se o texto em capítulos introdutórios e apêndices. Cada capítulo apresenta uma contextualização do uso do objeto estudado, revisão bibliográfica e estudo teórico, relatos e resultados de testes, projeto e desenvolvimento de protótipos e, finalmente, os resultados da implementação. Recomenda-se a leitura de todos os capítulos e os respectivos apêndices que forem do interesse do leitor, conforme são indicados no texto.

## 2 SENSORIAMENTO REMOTO

### 2.1 UM BREVE HISTÓRICO DO SENSORIAMENTO REMOTO E SUA DEFINIÇÃO.

Os conceitos físico-teóricos que compõem o significado de sensoriamento remoto provêm de experimentos como o da decomposição da luz branca com prismas, executada por Sir Isaac Newton, no século XVII (NEWTON, 1979). Em verdade, radiação eletromagnética, como parte excitante do processo sensitivo, é o mesmo processo usado há bilhões de anos pelas mais diversas espécies de seres vivos no que conhecemos por visão (HUGHES, 1977).

No século XVIII, o francês Joseph Nicéphore Niépce translada o conceito teórico de “radiação como estímulo de elementos sensíveis” para algo mais interessante aquele mundo passando pela última fase da Revolução Industrial (ROSENBLUM, 1997) e (RAIZMAN, 2003). Do grego φως [fós] (“luz”) e γραφίς [grafis] (“pincel”) (KYKKOTIS, 1943), a fotografia, cujo primeiro exemplar, de 1826 é mostrado na Figura 2, ofereceu uma forma concreta e permanente de análise da radiação refletida, visto que até então não havia outra forma de registro tão verossímil senão o lento e inconstante processo de confecção de uma pintura.

Figura 2—“*View from the Window at Le Gras*”, a primeira fotografia.



Fonte: Rosenblum (1997).

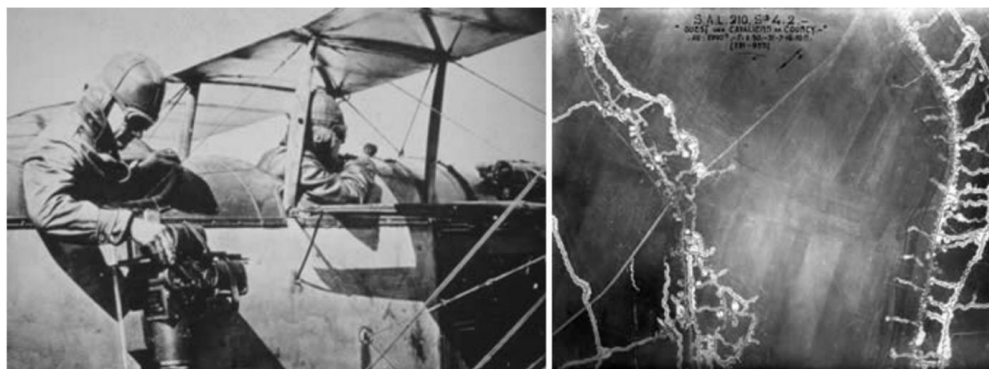
Foi o francês Gaspard-Félix Tournachon, balonista, conhecido como “Nadar”, quem, durante seus voos sobre Paris em 1863 (MCCAULEY, 1994), fez o primeiro registro de ondas eletromagnéticas adquiridas por um sensor sem contato físico com o objeto de estudo com o objetivo de extrair informações, definição utilizada até hoje para sensoriamento remoto (AVERY e BERLIN, 1992). Naquele caso, o objetivo era mapear as ruas de Paris, como mostra a Figura 3. No início do século XX, balões alemães e aviões franceses utilizavam a fotografia de observação como principal método de mapeamento das linhas inimigas durante a Primeira Guerra Mundial (STICHELBAUT, BOURGEOIS e SAUNDERS, 2008). Na Figura 4 é possível notar, a esquerda, as trincheiras inimigas mapeadas por aviões franceses, que estão à direita.

Figura 3 - Fotografia das ruas de Paris feita por Nadar.



Fonte: Commercial Photography in Paris (1994).

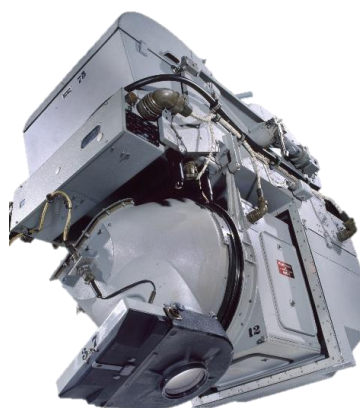
Figura 4 - Avião de reconhecimento francês (E) e trincheiras inimigas mapeadas durante a Primeira Guerra Mundial (D).



Fonte: Rosenblum (1997).

A Guerra Fria incentivou o desenvolvimento de tecnologias embarcadas em aviões furtivos, como o *Lockheed SR-71 Blackbird*, que incluía sensores ópticos de luz visível e infravermelha para reconhecimento estratégico. A câmera *Hycon 73B*, mostrada na Figura 5, foi desenvolvida especialmente para essa aeronave e contava com um sistema que gerava fotos nítidas até 200km longe do alvo e tinha um *gimble*<sup>6</sup>, uma flexibilidade nos movimentos que permitia fotos em diferentes direções (LUO, 2008).

Figura 5 - Câmera Hycon 73B. Para efeito de escala, essa câmera ocupa um volume de 1500 litros.



Fonte: IR & SPACE MAGAZINE (2011, imagem digital).

---

<sup>6</sup>*Gimble* é um suporte articulado que permite a rotação de um objeto sobre um único eixo. Quando montado de forma composta, permite a rotação em diferentes eixos e, de forma ativa, a estabilização da imagem.

O desenvolvimento de satélites artificiais, na segunda metade do século XX, permitiu o alcance global de sistemas de sensoriamento remoto e sua utilização em outras áreas (LILLESAND, 2014). O programa LANDSAT, iniciado em 1972, utiliza sensores multiespectrais e, atualmente, em sua oitava versão, adquire dados remotamente para uso em agricultura, previsão do clima e mapeamento nas mais diversas áreas civis (LAUER, 1997).

## 2.2 MERCADO ATUAL

O mercado atual de sensoriamento remoto incorporou as novas tecnologias em aviônicos e sistemas miniaturizados em seu ferramental de levantamentos. Surgem, então, os VANTs<sup>7</sup>. Esses são caracterizados por serem automáticos, isto é, estabilizam-se sem a intervenção de um operador durante o voo e podem ser autônomos, seguindo trajetos predefinidos, chamados de missões em levantamentos aerofotogramétricos (EISENBEISS, 2004).

O líder do mercado atualmente é o *eBee*, da empresa Suíça *SenseFly*, mostrado na Figura 6, uma aeronave modelo asa voadora. A facilidade no uso e planejamento das missões inseriu esse VANT mesmo nos mercados mais conservadores, visto que não é preciso conhecer sobre pilotagem ou aerodinâmica, bastando seguir alguns passos e regras de operação. Somado a isso, a empresa *SenseFly*, através de parcerias com companhias de *software*, desenvolveu algoritmos de pós processamento que facilitam a execução das ordens de serviço do início ao fim.

---

<sup>7</sup> O termo *drone*, do inglês zangão, comumente utilizado para descrever aeronaves não tripuladas é evitado nesse trabalho por opção do autor. Contudo, alerta-se para a equivalência dos termos.

Figura 6 - eBee, da empresa SenseFly.



Fonte: SenseFly® (2016, imagem digital).

O mercado Brasileiro conta com alguns *players*, sendo o maior deles a empresa *XMrobots*, que desenvolve aeronaves de diferentes tamanhos e para diferentes aplicações. A empresa *NieboDrones*<sup>8</sup> também é referência no mercado do Brasil e Argentina, desenvolvendo tanto multirotores como aviões. Contudo, não existem, no mercado nacional, companhias que visam atender às necessidades de sensoriamento remoto do início ao fim, isto é, desde o voo da aeronave, até a extração de dados e criação do relatório final (PERES, 2015). Nesse contexto, essa pesquisa se propõe a estruturar e inserir uma empresa exatamente nesse espaço vazio do mercado, criando soluções que primam pela facilidade no uso, preço acessível e qualidade através do uso de tecnologias de ponta.

---

<sup>8</sup> Nome fictício.



### 3 PRIMEIRAS TENTATIVAS DE TRABALHO COM VANTS.

Satélites eram a única opção para empresas interessadas em desenvolver produtos baseados em sensoriamento remoto. Contudo, o custo na casa das dezenas de milhares de dólares por imagem e resolução baixa de decímetros por pixel tornavam seu uso proibitivo para diversas aplicações (SULLIVAN, 2005).

O aparecimento dos VANTS no mercado, especificamente o brasileiro, despertou interesse de empresas como a Novos Horizontes<sup>9</sup>, uma consultoria ambiental de matriz americana que buscava baratear custos de aquisição de imagens através do uso de tecnologias autônomas. A equipe de engenheiros utilizaria os dados em conjunto com tecnologias *GIS*, *Geographic Information System*, em projetos que envolvessem recuperação ambiental, processos judiciais, manejo florestal e cartografia. O autor foi contratado como estagiário em engenharia elétrica nessa empresa, com função de ser o responsável pelo processo de compra e, posteriormente, operação diária dos VANTS.

Foi posto em prática um plano de avaliação e estudo das opções de aeronaves disponíveis no mercado. Ponderou-se custo, disponibilidade de importação, reposição de peças, autonomia, qualidade dos dados e facilidade de operação. Foi levada em consideração, também, a experiência da matriz da empresa com o uso de VANTS. Pormenorizadamente, o problema se moldou em escolher uma opção baseando-se em:

- a. Custo - aquisição, manutenção, reposição de peças e treinamento.
- b. Facilidade de operação - a Novos Horizontes foca suas atividades na área ambiental, logo, seus engenheiros não possuem conhecimento profundo de sistemas de controle, eletrônica e eletrônica de potência. A ferramenta escolhida deveria ser o mais amigável possível para usuários leigos.

---

<sup>9</sup> Nome fictício.

- c. Facilidade de compra ou importação - não existe uma legislação vigente da ANAC, Agência Brasileira de Aviação Civil, para importação de VANTs, ficando a cargo de cada fiscal alfandegário permitir, ou não, a entrada do produto no Brasil.
- d. Dados gerados - a qualidade e variedade dos dados foi avaliada, bem como a facilidade de integração com as ferramentas *G/S* já operadas pela empresa.

Listou-se uma série de alternativas disponíveis no mercado e, após uma seleção inicial, restringiu-se às opções representadas na Tabela 1. Para a filtragem inicial, considerou-se a demanda pontual da Novos Horizontes e a possibilidade de importação e regulamentação junto às agências competentes. Esse procedimento eliminaria equipamentos com custo superior a \$50.000,00 USD e peso superior a 25kg – peso máximo para uso comercial sem necessidade de regulamentação especial junto a ANAC, como explica Aquino (2016).

Os custos de logística, impostos de importação (que no Brasil podem chegar a 60%) e a legislação confusa sobre o processo alfandegário de aeronaves não tripuladas para uso comercial levaram a Novos Horizontes a desconsiderar a importação do *eBee*. No entanto, a facilidade de operação se tornou referência para avaliação durante esse processo de compra. Dada a equivalência entre os outros critérios, decidiu-se fazer a avaliação pelo preço e usabilidade dos dados gerados. A empresa *XMobots*, líder do mercado brasileiro, foi eliminada do pleito, visto que seus VANTs oferecem resultados extras, desnecessários a Novos Horizontes e têm um preço inicial de aquisição maior.

Tabela 1 - Comparação entre VANTs.

VANT	CARACTERÍSTICAS
 <p data-bbox="443 593 587 660"><b>eBee SenseFly</b></p>	<ul data-bbox="750 392 1117 537" style="list-style-type: none"> <li>- Preço: \$30.000 USD</li> <li>- Facilidade de operação.</li> <li>- Precisa ser importado.</li> </ul>
 <p data-bbox="363 918 662 996"><b>NieboDrones VANT NieboDrones</b></p>	<ul data-bbox="750 660 1220 806" style="list-style-type: none"> <li>- Preço: R\$80.000 BRL</li> <li>- Nacional.</li> <li>- Custo de treinamento reduzido.</li> </ul>
 <p data-bbox="443 1254 587 1332"><b>Arator 5A XMobots</b></p>	<ul data-bbox="750 1086 1364 1232" style="list-style-type: none"> <li>- Preço: R\$180.000 BRL</li> <li>- Nacional.</li> <li>- Conta com seguro em caso de acidentes.</li> </ul>
 <p data-bbox="443 1568 587 1646"><b>Echar 20B XMobots</b></p>	<ul data-bbox="750 1366 1356 1512" style="list-style-type: none"> <li>- Preço: R\$380.000 BRL</li> <li>- Nacional.</li> <li>- Conta com seguro em caso de acidentes</li> </ul>

Os custos de treinamento e logística de manutenção justificaram a aquisição do VANT da empresa *NieboDrones*. Foi decidido que junto com o VANT, seriam adquiridas duas câmeras *S110*, da empresa japonesa *Canon*.

A escolha dessa câmera se deu pela alta relação resolução/peso. Esse critério de escolha se mostrou insuficiente, como será discutido posteriormente. Através de

cases similares, o fabricante do VANT reiterou, ainda, que essa combinação tem qualidade comprovada por milhares de horas de voo e ofereceu auxílio durante o processo de implementação.

Após a compra dos equipamentos, deu-se início ao processo de treinamento, que envolvia um dia de teoria de operação do VANT, um dia de teoria de processamento de imagens com *softwares* comerciais e dois dias de lições práticas de controle e operação do equipamento. Esses dois últimos dias envolveram dois acidentes catastróficos: um primeiro onde a asa da aeronave se despreendeu durante o voo, resultando na queda do equipamento e um segundo onde o paraquedas de pouso não foi acionado devidamente, enroscou na hélice e causou a destruição do avião.

Tendo em vista as falhas operacionais e a falta de constância nas operações prometidas, decidiu-se por cancelar o contrato de compra da aeronave da *NieboDrones*. A Novos Horizontes, por hora, desistira de investir em VANTs.

## 4 A CRIAÇÃO DA PIXFORCE

Com todo o estudo de mercado que justificava a aquisição da aeronave ainda válido, um dos sócios da Novos Horizontes, o autor e um terceiro investidor decidiram iniciar um novo projeto, uma *startup* chamada *PixForce*, cujo logotipo, feito por um usuário do *freelancer.com*<sup>10</sup> ao custo de \$25 USD, aparece na Figura 7.

Figura 7 - Logotipo da PixForce



Fonte: PixForce® (2016, imagem digital).

### 4.1 ESCOLHA DA ÁREA DE ATUAÇÃO.

Decidiu-se que o foco da empresa estaria na oferta dos serviços através da criação de ferramentas próprias. Contudo, a excelência sempre estaria focada no produto final – o relatório do levantamento, e não nos equipamentos envolvidos nos processos. Dessa forma, podemos eximir os veículos de características que os tornam caros, como facilidade de operação ou acabamento, visto que somente técnicos da *PixForce* lidariam com a ferramenta. Em uma reunião com um dos primeiros clientes da empresa, por exemplo, foi dito que não interessava àquela indústria se usáramos “drones de última geração ou vacas voadoras, desde que cumpríssemos com os prazos estabelecidos”.

A decisão de focar no produto e não na ferramenta foi baseada, também, no fato de que o valor de relatórios cartográficos é maior do que o de fabricação e venda de aeronaves preparados para usuários. Isto é, um mesmo investimento na área de desenvolvimento de métodos de extração de informações gera um retorno maior que

---

<sup>10</sup>Website que permite a contratação de profissionais, dentre eles, *designers* de logotipos, através da criação de uma competição: oferece-se um prêmio, diversos profissionais oferecem suas soluções e o contratante premia o *designer* que julgar vencedor.

na área de vendas de VANT. A Tabela 2 mostra o fluxo de processos para se chegar ao relatório, o produto final.

Tabela 2 - Fluxo de processos dos serviços da PixForce.

PROCESSO	DESCRIÇÃO
1) P&D <sup>11</sup>	- Projeto e desenvolvimento dos VANTs.
2) PLANEJAMENTO DA MISSÃO	- Definição de como o levantamento vai ser feito de acordo com o cliente.
3) LEVANTAMENTO	- Aquisição de dados pelo sensor.
4) PROCESSAMENTO	- União dos dados em um único arquivo ortoretificado.
5) PÓS-PROCESSAMENTO	- Extração de informações úteis ao cliente.

#### 4.2 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

Somado a pesquisa de artigos científicos, um dos métodos utilizados para baratear o custo com pesquisa e desenvolvimento foi buscar relatos de experiências bem-sucedidas de terceiros, disponíveis na *internet*. Dessa forma, implementou-se, na sua maioria, processos já verificados. A pesquisa a fóruns *online* de aeromodelistas, forneceu o conhecimento técnico em aviação que basearia o *design* da primeira versão do avião utilizado pela *PixForce*, feito por um projetista com formação em engenharia elétrica.

<sup>11</sup> Projeto e Desenvolvimento

## 5 PROJETO DO PIXFORCE ONE

Dividiu-se as etapas de projeto e desenvolvimento do *PixForce One* em:

- a. Sistemas de Controle;
- b. Sistemas de Comunicação;
- c. Fuselagem;
- d. Fotogrametria;
- e. Atuadores.

### 5.1 SISTEMA DE CONTROLE E SISTEMA AUTÔNOMO

Em altitudes elevadas, o vento age de forma imprevisível, tornando impossível modelar um sistema de controle das superfícies de atuação da aeronave sem contar com uma série de sensores que detectam anormalidades no trajeto projetado e atuadores que compensam os desvios (CHO, 2011). Em certos casos, corrente de ar quente e frio aumentam ou diminuem consideravelmente a sustentação das asas, fato que exige atuação direta do motor e *elevons*<sup>12</sup> (COWLING, 2007) e (SINGH, 2009); devido a alteração de equipamentos no interior do veículo para atender a diferentes demandas, o peso e o centro de gravidade podem ser modificados drasticamente, alterando o modelo ideal da aeronave inicialmente proposto; em cada pouso, a aerodinâmica do charuto se altera, pois podem ocorrer choques com o solo que danificam parcialmente a fuselagem, porém não de forma irreversível; em caso de erro de configuração do modo de missão autônomo, espera-se que a aeronave mantenha um voo de segurança, mantendo a altitude ou traçando uma rota de emergência que evite obstáculos. Para facilidade de operação, definiu-se também, que o controlador seria responsável por executar, de forma autônoma, a rampa de subida após o lançamento e a rampa de descida.

Esses fatores são somente alguns dos muitos que exigem de forma imprescindível um sistema de controle realimentado para execução de um voo

---

<sup>12</sup> Nome dado as superfícies de controle em uma asa voadora. É a soma do *elevator* e do *aileron*.

utilizando um veículo aéreo não tripulado. De forma análoga, voar um VANT sem um sistema de controle, seria como configurar os atuadores de um jato comercial anteriormente a um voo transatlântico e esperar que esse chegue ao seu destino sem nenhuma correção nos comandos.

Sistemas de assistência de voo são comuns entre aeromodelistas, pois facilitam o manejo de veículos com dinâmica de voo que podem beirar um sistema caótico para um iniciante. Tais sistemas atuam de forma pontual e limitada, corrigindo os comandos manuais do usuário. A grande maioria, como o *HobbyKing RX35*, mostrado na Figura 8, apenas mantém o avião na horizontal caso o usuário mantenha os comandos do rádio controle em modo de repouso ou caso haja perda do sinal de rádio.

Figura 8 - Sistema de estabilização RX35.



Fonte: HobbyKing® (2016, imagem digital).

Considerou-se o projeto e desenvolvimento de um sistema de controle específico para a estrutura do VANT da *PixForce*. Esse procedimento, consistiria na modelagem, *design* e implementação de uma planta de controle realimentada. As vantagens desse sistema próprio, inicialmente, consistem na possibilidade de personalização e especificação, criando uma ferramenta proprietária, facilmente aplicável às necessidades da empresa e com um custo de replicação muito menor que uma ferramenta comercial, pois atenderia somente às demandas de um certo modelo de aeronave.



Iniciou-se uma pesquisa para projetar um sistema de controle, porém logo se percebeu o custo elevado de desenvolvimento de um sistema que exige conhecimentos avançados de eletrônica, instrumentação, sistemas de controle e atuadores. Além disso, devido à natureza de um voo sustentado por asas, não se pode parar um teste em andamento e falhas tendem a ser catastróficas, isto é, as respostas óbvias de um teste de voo do sistema de controle de um VANT são: sucesso absoluto ou uma aeronave destruída, o que eleva ainda mais o custo.

A Figura 9 mostra uma foto da aeronave após uma queda e os registros da telemetria em um teste do sistema inicial de voo autônomo. Nesse caso, houve uma falha no GPS, que retornava que a aeronave se encontrava no meio do Oceano Atlântico a 4294967296 ( $2^{32}$ ) metros de altitude. Os atuadores mecânicos e o motor foram direcionados a fazer o VANT mergulhar imediatamente na taxa de descida limite, estipulada empiricamente e que se mostrou muito alta, pois a aeronave entrou em um parafuso<sup>13</sup> e se chocou contra o solo, causando perda total.

Efetuiu-se a compra de um avião de testes, menor e mais barato, porém com modelo e dinâmica de voo similares a modelos maiores. Diversos testes de voos autônomos foram feitos, porém os resultados ainda se mostravam insatisfatórios, com aterrissagens em árvores, rodovias, janelas de carros e açudes.

Figura 9 - Avião após queda causada por falha no sistema de GPS.



Fonte: Do autor (2016).

---

<sup>13</sup> Termo usual para descrever uma queda descontrolada em trajetória helicoidal.

Considerou-se que a empresa, àquela altura, contava com apenas dois engenheiros e passou-se a procurar por alternativas mais consagradas no mercado e que oferecessem um risco consideravelmente menor à presença comercial da *PixForce*, empresa que, ainda que tenha um viés de pesquisa na área de VANTs bastante grande, devia analisar os custos e elaborar estratégias para funcionar de forma sustentável na sua área de atuação principal: o mercado de consultoria em sensoriamento remoto, independente da ferramenta utilizada. Uma solução pronta representaria uma redução no custo de desenvolvimento, porém aumentaria consideravelmente o custo de aquisição e poderia oferecer dificuldades na adaptação do sistema às ferramentas já implementadas no VANT.

A análise feita para definir uma solução definitiva (desenvolvimento interno ou aplicação de uma ferramenta comercial) considerou o custo das horas de trabalho de um engenheiro de controle somado ao quanto deixou-se de lucrar durante o tempo de desenvolvimento (no qual, a empresa não tem uma aeronave para levantamentos), em comparação ao valor de um controlador comercial, e está estruturada na seguinte relação:

$H_{eng}$  = tempo [h] de trabalho de um engenheiro de controle

$C_{eng}$  = custo [R\$/h] da hora de trabalho de um engenheiro de controle

$V_{drone}$  = valor  $\left[\frac{R\$}{ha}\right]$  associado ao uso de um VANT, no relatório final

$A_{relatório}$  = área [ha] estimada para levantamentos

Se,  $(H_{eng} * C_{eng}) + (V_{drone} * A_{relatório}) > \text{custo de um controlador comercial}$

então, decide – se pelo controlador comercial.

Visto que uma maior parcela do orçamento está no pós-processamento, identificou-se que o valor que a construção de um sistema de controle agregaria no preço final dos produtos é menor que o valor pago aos engenheiros para desenvolvimento de uma solução própria. Considerando que fosse encontrado um controlador comercialmente disponível com desempenho satisfatório, dar-se-ia procedimento a aquisição e implementação. A opção escolhida foi o *PixHawk*.

### 5.1.1 PixHawk – controlador e sistema autônomo integrados.

Considerou-se abordar o problema envolvendo soluções usadas por *hobbyistas*, pois o próprio perfil (de uso interno) do avião não justifica robustez militar ou um nível de facilidade de operação que evite acidentes devido ao uso indevido por terceiros, visto que somente os engenheiros da *PixForce* operariam com a aeronave. Encontrou-se, então, um controlador chamado *PixHawk* que agregou diversas vantagens. Uma vantagem é o fato de ser *open-hardware*, pois conta com um grande grupo de desenvolvedores especializados, o que aumenta a probabilidade de que eventuais problemas já tenham sido resolvidos e suas soluções disponibilizadas para a comunidade. Além disso, publica-se atualizações constantes ao sistema (i.e. implementação em novos modelos de aviões, integração com novos equipamentos e novos sensores).

Além disso, o *PixHawk* é um projeto que busca desenvolver soluções em programas e equipamentos para o meio acadêmico, *hobbyistas* e profissionais interessadas no desenvolvimento de veículos autônomos (MEIER, 2011). O hardware do controlador, com sua versão comercial mostrada na Figura 10, é um sistema preparado para implementação em veículos autônomos.

O APÊNDICE A - explica a implementação do *PixHawk* e o APÊNDICE B - estende uma discussão sobre o *software* e sistema de controle.

Figura 10 - Hardware do sistema *PixHawk*, fabricado pela empresa americana 3DR.



Fonte: 3DR® (2016, imagem digital).

## 5.2 SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO.

### 5.2.1 Sistema de RF como um atuador de emergência.

A *FAA (Federal Aviation Administration)*, agência responsável pela regulamentação do uso de VANTS nos Estados Unidos, regula que o operador deve sempre manter contato visual com o equipamento no ar, atuando sempre que necessário para evitar que o veículo quebre protocolos de segurança (WATTS, 2012). Devido à ausência de tal regulamentação da ANAC para o espaço aéreo brasileiro, definiu-se que o VANT da *PixForce* deveria ter, como protocolo de segurança, um sistema de rádio de longo alcance que permita a conexão constante entre o operador e o avião, permitindo que funções não automáticas do VANT sejam executadas sob o comando humano. O monitoramento das condições de voo, então, não se limita ao aspecto visual, mas foca-se principalmente no acompanhamento das centenas de parâmetros transmitidos em tempo real para o operador em solo pela telemetria a bordo.

Em caso de falha nos sistemas, por exemplo, espera-se que a aeronave adote uma rota de volta para o ponto de partida<sup>14</sup>, ou, em caso de choque eminente com uma aeronave tripulada, um mergulho vertical. Os sensores do controlador são projetados para que uma série de fatores (falhas na alimentação ou leituras fora do esperado) gerem interrupções no sistema de voo, criando um conjunto de parâmetros chamados *Fail\_Safe (Fail\_Safe\_acc, Fail\_Safe\_baro, Fail\_Safe\_GPS etc)*, porém, nem sempre esse sistema se mostra suficiente, cabendo ao operador agir de forma a manter a segurança da aeronave e de terceiros. Para tal, foi especificado um sistema de rádio de longo alcance e um adaptador para comunicação com o computador de bordo, responsável por receber os sinais, interpretar e atuar.

O rádio escolhido deveria ter, no mínimo, seis canais, que permitem o controle das superfícies de controle do VANT em caso de emergência e o comando de eventuais funções extras, como fotografia, paraquedas e ativação da função *RTL*. Além disso, prezou-se pelo alcance do sistema, visto que, como último recurso de atuação no VANT, este deveria se manter conectado durante todo o voo. Escolheu-se o rádio modelo *Turnigy 9X*, fabricado pela empresa chinesa *Turnigy*, mostrado na

---

<sup>14</sup> Função chamada de *RTL, Return To Launch*.

Figura 11, com nove canais, frequência de operação de 2.4 Ghz e alcance em campo de até 8 km.

Figura 11 - Sistema de rádio Turnigy 9X.

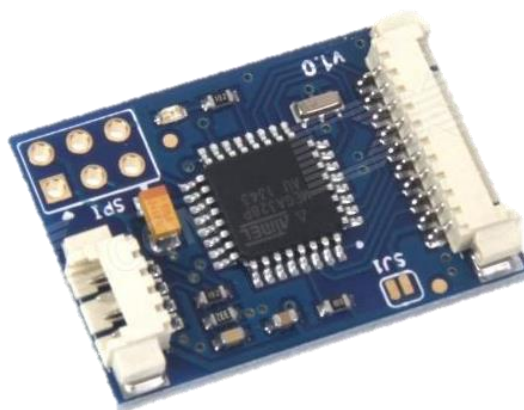


Fonte: HobbyKing® (2016, imagem digital).

O receptor do rádio é um sistema *PPM* (*Pulse Position Modulation*) e o sistema adotado pelo controlador de voo é *PWM* (*Pulse Width Modulation*), o que causa uma incompatibilidade e exige um conversor *PPM-PWM* (BASSOO, 2009). É possível encontrar soluções *PWM* nativas no mercado, porém o custo desse rádio somado ao conversor é ainda bastante inferior. O conversor escolhido foi um *PPM Encoder* da empresa norte-americana *3DR*, mostrado na Figura 12. Baseado em um microprocessador *Atmega328p*, o *encoder* precisava de uma alimentação constante e estável e reiniciava na menor falha na tensão de entrada causada por um pico de corrente devido a uma demanda instantânea do motor. Isso causava o sistema entrar em *Fail\_Safe\_Radio* e muitas vezes fazia o avião manobrar em *RTL*. Um *firmware* alternativo, com correções, foi desenvolvido para o *encoder*, permitindo operação em *by-pass* em um dos canais. Isso significa que o *encoder* não precisaria rodar as rotinas de inicialização para um dos canais (canal 9) cada vez que a energia fosse perdida, o

sinal do rádio passaria diretamente para o controlador de voo, sem a necessidade de execução das funções de conversão e a interrupção *Fail\_Safe\_Radio* não seria gerada. Contudo, o sinal enviado seria *PPM*, não compatível com o controlador *PWM*, porém, notou-se que basta qualquer sinal na entrada para que o avião não ative a função emergência. Uma outra opção estudada foi de alterar os parâmetros do controlador para que só agisse em caso da interrupção *Fail\_Safe\_Radio\_Long* (mais de 10 segundos de perda de sinal) fosse ativada, o que não é prudente, visto que em 10 segundos, um avião a 20 m/s se desloca 200 metros e pode perder até 40 metros de altitude.

Figura 12 - Encoder PPM-PWM.



Fonte: DX® (2016, imagem digital).

### 5.2.2 Telemetria como um monitor das condições de operação do VANT.

Para o operador, o VANT é um dispositivo que opera 99% do tempo às cegas (exceto 30 segundos após a decolagem e 30 segundos antes do pouso), isto é: não é possível acompanhar o levantamento de forma visual devido as distâncias e altitudes envolvidas. Para tanto exige-se que o operador atente às condições de voo em tempo real para segurança e certeza de que o trajeto e comportamento da aeronave condiz com a execução do levantamento. O controlador de voo recebe todos os dados dos diferentes sensores e periféricos e os disponibiliza através do protocolo *MAVLink* de comunicação, cabendo ao projetista especificar um rádio transdutor que envie tais informações e receba instruções do computador em solo, como coloca Benemann

(2013). Para tanto, implementou-se uma telemetria da empresa *3DR*, mostrada na Figura 13, com frequência de 900MHz (única frequência aprovada no Brasil para telemetrias pela ANATEL), 100mW de potência (máxima potência segundo norma da ANATEL) e 250 Kbps de taxa de transmissão.

Figura 13 - Telemetria 3DR.



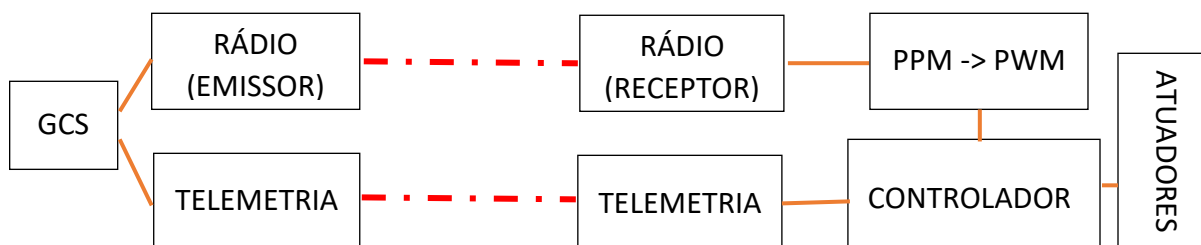
Fonte: 3DR® (2016, imagem digital).

Esse rádio mostrou ter um alcance relativamente limitado, com distância máxima de 2km em testes de campo, porém, com algumas modificações na posição da antena na aeronave e da antena em solo, foi possível estender o alcance para até 4km, suficiente para grande parte dos levantamentos da *PixForce*. O grande empecilho é que o avião não se mantém perfeitamente horizontal durante todo o voo, alterando a orientação relativa das antenas, principalmente durante curvas fechadas há perda de sinal e corre-se o risco de ativar um *Fail\_Safe*. Para contornar esse problema o controlador foi configurado para ativar o modo *RTL* apenas após dez segundos sem telemetria. Ao contrário do rádio de emergência, o sinal da telemetria pode ser momentaneamente perdido, pois o controlador tem em sua memória as instruções de trajeto e altitude para prosseguir com o levantamento autonomamente.

### 5.2.3 Configuração final dos sistemas de comunicação.

Um modelo com os sistemas de RF e telemetria são mostrados na Figura 14.

Figura 14 - Sistemas de rádio.



Fonte: Do autor (2016).

## 5.3 FUSELAGEM DO AVIÃO

Diversos são os fatores envolvidos na escolha de uma fuselagem: tamanho, capacidade de carga, peso e superfícies de controle, como coloca Beard (2005). A menor mudança no formato de um *airframe*, resulta em alterações drásticas na aerodinâmica e comportamento da aeronave, além disso deve-se analisar a facilidade de aquisição ou fabricação, visto que este é o componente mais exposto e o que sofre mais com quedas ou eventuais avarias. Como ponto de partida do estudo sobre qual modelo ser usado, listou-se uma série de características desejadas e qual o grau de importância dessas nas operações da *PixForce*.

Entendeu-se que, assim como o controlador, projeto aerodinâmico e desenvolvimento de um novo *airframe* ainda estava fora do alcance dos engenheiros da *PixForce*. Decidiu-se que se avaliaria opções disponíveis no mercado e cuja importação fosse facilitada, como descrito pormenorizadamente no APÊNDICE A -.

Após a definição de todos os parâmetros desejados na aeronave, decidiu-se por adquirir a asa voadora *SkyWalker X8*, ilustrada na Figura 15 e com especificações mostradas na Tabela 3 da empresa chinesa *SkyWalker*. Dentre as opções consideradas, este demonstra se aproximar mais das especificações e ainda possibilita uma margem para embarcar novos sensores e periféricos.



Figura 15 - Skywalker X8.



Fonte: SkyWalker® (2016, imagem digital).

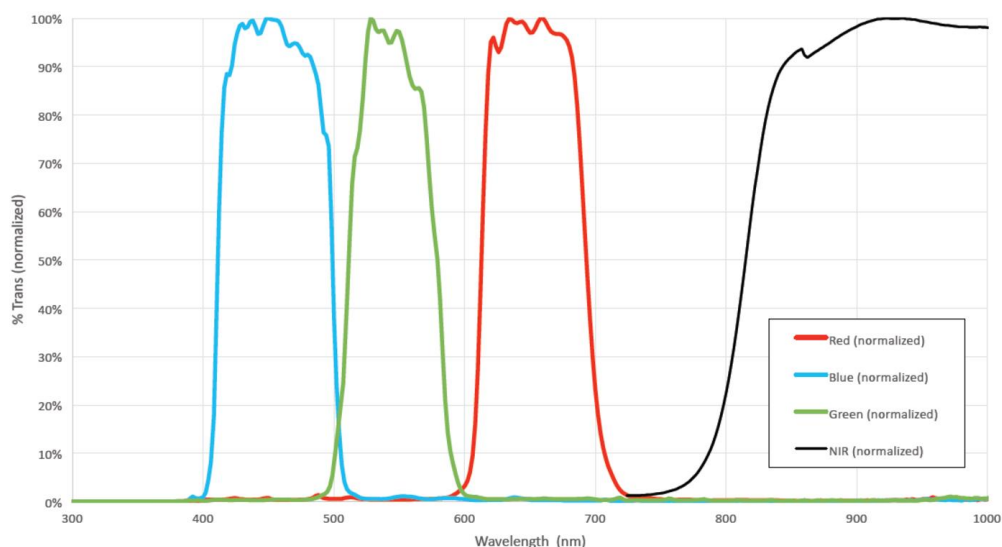
Tabela 3 - Especificações do Skywalker X8.

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>DIMENSÃO</b>
Distância entre asas	2122mm
Área de asa	80dm <sup>2</sup>
Peso	450g
Peso máximo de decolagem (Indicado pelo fabricante)	3,5kg

#### 5.4 SENSORES PARA FOTOGRAMETRIA.

Wolf (2000) coloca que um sensor fotográfico pode variar de uma simples câmera comercial até um satélite custando dezenas de bilhões, assim como os espectros de luz detectados também mudam de acordo com o objeto de estudo. A *PixForce* tem como mercado principal a área florestal, onde os dados mostrados na Tabela 4, devem ser extraídos das imagens. Para cada informação obtida, utiliza-se um tipo de sensor, porém a iteração entre eles também é frequentemente útil aos algoritmos desenvolvidos. O sensor *RGB* em questão é o mesmo utilizado em uma câmera para fotografia convencional, gerando imagens no espectro visível, enquanto o multiespectral e o NIR (*Near Infra Red*), detectam as faixas de frequências mostradas na Figura 16.

Figura 16 - Frequências dos componentes *B*, *G*, *R* e *NIR* da luz, respectivamente.



Fonte: MicaSense® (2016, imagem digital).

Tabela 4 - Dados levantados e sensor necessário.

<b>INFORMAÇÃO EXTRAÍDA</b>	<b>SENSOR NECESSÁRIO</b>
Índice de sobrevivência	RGB e multiespectral
Detecção de pragas	Multiespectral
Detecção de falhas	RGB e multiespectral
Problemas hídricos	NIR
Detecção de mato competição	RGB

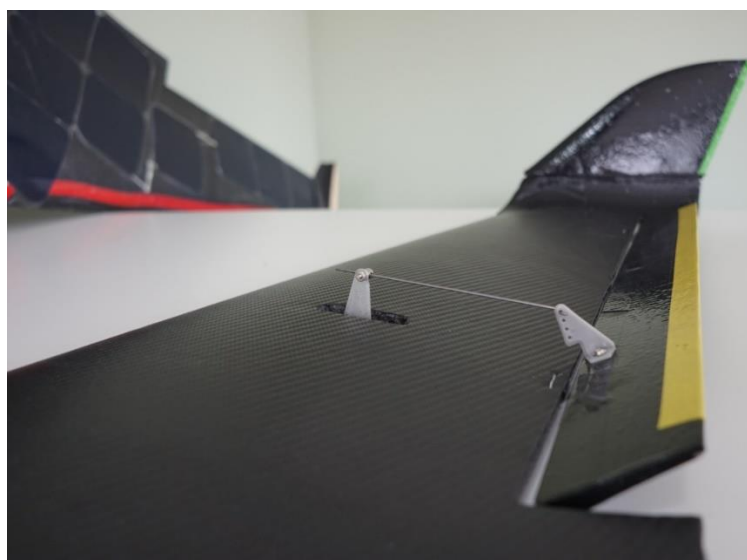
Essa definição de sensores se deu após o primeiro contato com a indústria florestal e diversas reuniões sobre as demandas que a *PixForce* poderia atender. Definiu-se que seria especificado dois sensores para imageamento: um *RGB* e um multiespectral (sensor capaz de captar as bandas *R*, *G* e *B* em sensores individuais).

Embarcou-se no *PixForce One* uma câmera *RGB Alpha 6000*, da marca japonesa *Sony* e uma câmera multiespectral *Sequoia*, da marca americana *MicaSense*. As discussões que levaram a escolha dos sensores estão contidas no APÊNDICE D -.

## 5.5 ATUADORES

Devido à necessidade de manter a aeronave em curso e estável, os sistemas de controle constantemente enviam sinais corretivos para os atuadores com frequências de até 100Hz, como sinaliza Meier (2011). O *PixForce One*, com seu atuador de asa representado na Figura 17, conta com um motor na traseira do avião, responsável pela propulsão e movimento horizontal e dois servomotores nas asas, controlando os *elevons*. Todos conectados ao controlador de voo, porém alimentados por fontes e *drivers* periféricos. Os sinais de comando do *PixHawk*, modulados em *PWM*, devem ser interpretados e, se necessário, convertidos para os atuadores executarem os movimentos da forma desejada. O dimensionamento dos atuadores também é crítico, visto que o sobredimensionamento torna o veículo desnecessariamente pesado e o subdimensionamento torna o veículo incapaz de vencer as rajadas de vento ou rampas íngremes, no caso do motor principal e com problemas de controle, no caso dos servomotores localizados nas superfícies de controle da asa, chamadas *elevons*, como coloca Valavanis (2014).

Figura 17 - Detalhe da asa do PixForce One.



Fonte: Do autor (2016).

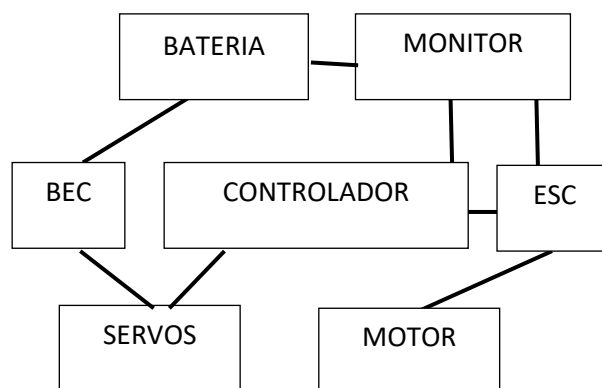
Em testes iniciais de levantamento, quando a primeira versão da aeronave já estava pronta, dois engenheiros da *PixForce* seguiram até o estado da Bahia, na cidade de Maiquinique para fazer o mapeamento de 5000 hectares de minas de grafite. Durante os trabalhos, sob sol forte e temperaturas maiores que 40° C, um dos

servomotores, feito majoritariamente de plástico injetado, derreteu e causou a queda do avião. Conferindo os *logs*<sup>15</sup> da telemetria, notou-se que o *driver* do servo o alimentava com uma potência 2,5 vezes maior que sua potência máxima, sendo a demanda criada pelo *K<sub>I</sub>* do controlador. Isto é, constatou-se que às informações de torque fornecidas pelo fabricante não condiziam com a realidade, o atuador estava sofrendo uma sobrecarga pois o controlador não identificava correções de estabilidade e fornecia uma potência cada vez maior. A falha causou o derretimento das engrenagens, porém os circuitos continuaram alimentados e a dissipação de calor aconteceu, principalmente, na espuma da fuselagem. Nessa oportunidade, o servo travou na posição horizontal, permitindo que o operador, manualmente reduzisse a velocidade do mergulho e evitasse uma perda catastrófica. No APÊNDICE E -, discute-se os atuadores, seus *drivers*, as baterias e os sistemas de monitoramento de energia.

### 5.5.1 Sistema final de atuadores.

O sistema de atuação montado na aeronave é mostrado na Figura 18.

Figura 18 - Modelo do sistema de atuadores.



Fonte: Do autor (2016).

---

<sup>15</sup> Registros armazenados no cartão de memória do controlador e transmitidos pela telemetria para o operador.

## 5.6 RECURSOS EM SOLO

Durante os trabalhos em campo, é necessário que o operador em solo conte com diversos recursos que permitam o acompanhamento do levantamento. Dessa forma, é possível verificar a trajetória, velocidade e altitude do VANT, por exemplo, além de responder a eventuais alarmes gerados pelo controlador. Benemann (2013), coloca, ainda, que para o desenvolvimento da aeronave, é desejável acompanhar os dados do controlador de voo em tempo real. Dessa forma, pode-se estudar a resposta da aeronave a um comando de forma instantânea e, se necessário, efetuar alterações nos parâmetros ainda em voo. Esse procedimento de calibração dos controladores permite que mais de um parâmetro seja testado em ar sem a necessidade de efetuar-se novos pousos e decolagens.

É desejável, ainda, que o controle de solo permita que o operador altere a presente rota prevista do VANT. Isso é útil em casos onde o vento ou correntes de ar permitem voos mais longos ou mais curtos e o operador deve reprogramar a aeronave. Em testes, essa característica é útil para testar a capacidade de decidir manobras automáticas e analisar o comportamento em ar. Para tanto, define-se uma rota distante e em seguida solicita-se que o avião retorne ativando o modo *RTL*. Durante a volta, monitora-se o trajeto programado para conferir se o controlador está desviando de obstáculos, como árvores altas ou montanhas presentes na altimetria do terreno, previamente carregada. O computador de solo deve permitir, também, que se projete as missões do VANT, isto é, defina-se o polígono a ser levantado e calcule-se a rota necessária para cobrir a área.

Para tanto, implementou-se o uso do *software open-source Mission Planner*. O APÊNDICE F - detalha o processo de implementação.

## 5.7 PRIMEIRO PROTÓTIPO DO PIXFORCE ONE.

A primeira versão do *PixForce One* foi concluída em Dezembro de 2015, noventa dias após o início da pesquisa. Seu *maiden flight*<sup>16</sup>, foi bastante caótico, visto que o avião ainda não estava calibrado para executar curvas fechadas e percorreu

---

<sup>16</sup> Primeiro voo de um avião com seu próprio motor.

2km antes de iniciar a curva para dar a volta completa em torno do operador. Em diversos outros testes de voo mais longos, relatados anteriormente neste trabalho, a aeronave apresentou problemas nos sistemas de controle e teve quedas catastróficas. Após ajustes nos parâmetros, executaram-se novos voos com sucesso e a plataforma foi considerada apta a executar levantamentos. A Figura 19 mostra o *PixForce One* finalizado sendo lançado pelo operador, neste caso, o autor.

Figura 19 - PixForce One sendo lançado pelo operador. Foto com múltipla exposição – mesmo VANT em diferentes momentos da decolagem.



Fonte: Do autor (2016).

## 6 TRATAMENTO DAS IMAGENS E PÓS PROCESSAMENTO

Até a finalização do projeto do primeiro VANT, a *PixForce* procurava diferentes indústrias que, possivelmente, adotariam a tecnologia desenvolvida. Foi no mercado florestal, então, que a empresa encontrou seu nicho. Seu primeiro cliente foi uma grande empresa do ramo florestal do Rio Grande do Sul, cujas florestas estavam sofrendo com a irregularidade do clima. Para acionar a seguradora, devia-se fazer um levantamento preciso dos prejuízos e, para isso, precisava-se dos índices de sobrevivência dos talhões<sup>17</sup>. Após o desenvolvimento desse primeiro algoritmo para o mercado florestal, um sistema para detecção de plantas vivas, a *PixForce* continuou sua oferta para outras empresas e desenvolvimento de novos algoritmos na mesma área. Consolidou-se assim, o mercado florestal como principal área de atuação da *PixForce*.

Existem dois procedimentos pós voos principais durante o processo de criação do relatório final: a criação de ortomosaicos e a extração de dados. No APÊNDICE G -, discute-se o primeiro.

Reitera-se que, no caso do desenvolvimento dos algoritmos, o autor implementou os sistemas de ortorretificação e participou do desenvolvimento da primeira versão do sistema de detecção de plantas vivas. Posteriormente como Gerente de Projetos da *PixForce*, formou uma equipe composta por seis profissionais (dois engenheiros eletricitas, dois engenheiros da computação, um cientista da computação e um geólogo) e coordenou o desenvolvimento dos algoritmos de inteligência artificial utilizados pela equipe atualmente.

---

<sup>17</sup> Termo usado no mercado florestal para designar uma porção de terreno com floresta plantada.

## 7 EXTRAÇÃO DE DADOS

Na maioria das aplicações comerciais, o processo de criação de um ortomosaico não é suficiente, pois, apesar de representar toda a área de forma visual e precisa, não fornece nenhuma informação estatística sobre o que está sendo representado. Em alguns casos, porém, recorre-se ao uso de VANTs para inspeções que só podem ser feitas por técnicos especializados: diversas empresas de transmissão de energia, por exemplo, utilizam VANTs para inspecionar isoladores em linhas de transmissão – ao menor sinal de rachadura, deve-se providenciar a troca do dispositivo imediatamente (RANGEL, 2009). Em plantas de geração de energia solar, ainda, utiliza-se VANTs para inspeção de falhas nos painéis e empresas de telecomunicação utilizam VANTs para monitorar torres onde antenas estão instaladas (EVERAERTS, 2008). Contudo, em nenhum dos casos existem algoritmos que detectam anomalias de forma automática (e seria muito difícil desenvolvê-los), inclusive, nos dois primeiros, utiliza-se, preferencialmente, imagens de câmeras térmicas. Para tanto, prefere-se o uso de transmissão de vídeo em tempo real para um inspetor em solo, em vez de captar as imagens, leva-las ao escritório e, após várias horas e um custo elevado, gerar o ortomosaico.

Em todos os outros casos, deve-se pensar em algoritmos capazes de extrair informações das imagens de forma automática. Muitas vezes, inclusive, utiliza-se dados de câmeras multiespectrais que só fazem sentido técnico após serem efetuados cálculos em cada pixel, como o *NDVI*. O APÊNDICE H - e o APÊNDICE I - abrangem, respectivamente, dois algoritmos de pós-processamento<sup>18</sup>: a geração de modelos digitais de terreno, na área da mineração, e o censo total de plantas, na área florestal.

---

<sup>18</sup> Processamentos após a criação do ortomosaico.



## 8 CONCLUSÕES

Essa pesquisa foi realizada de Setembro de 2015 até Agosto de 2016, quando começou-se a utilizar a segunda versão do VANT, aposentando-se o *PixForce One*. A aeronave foi a ferramenta de levantamentos da PixForce durante todo o primeiro semestre de 2016. Alcançou-se uma autonomia de 80 minutos e a capacidade de levantamento é de 1000 hectares com uma carga de 10Ah. Seu custo final de construção foi de R\$ 11.000 BRL, o que o deixou mais barato que as opções disponíveis no mercado. O sistema de controle e autônomo se mostraram bastante robustos, com um índice de voos bem sucedidos de 70%. As falhas ocorreram, majoritariamente por erro do usuário operando fora de condições permitidas (i.e. ventos fortes, chuva ou carga insuficiente na bateria).

O objetivo de projetar um VANT para atender às necessidades comerciais da *PixForce* foi atingido de forma parcial, visto que a aeronave se mostrou superdimensionada para os levantamentos executados, isto é, as áreas levantadas se revelaram com dimensões pequenas e disposição mais esparsa. Após o final da pesquisa, foram implementados multirotores com capacidade de levantamentos de 50 hectares (5% do *PixForce One*), porém podem ser carregados em motocicletas para campo, ou despachados em voos nacionais sem necessidade de pagamento de bagagem extra.

Os algoritmos desenvolvidos e os *softwares* incorporados aos processos da *PixForce* permitiram uma inserção inicial da empresa no mercado, principalmente no momento em que se oferecia os serviços mesmo enquanto os VANTs ainda estavam sendo desenvolvidos. Atingiu-se então, os objetivos de forma parcial, pois exige-se que o algoritmo ainda seja calibrado de forma manual, o que gera um tempo bastante alto de processamento e, por consequência, um alto custo em horas de trabalho. Uma alternativa proposta para avançar com o desenvolvimento é implementar sistemas de classificação semiautomáticos baseados em inteligência artificial.

O objetivo final da pesquisa, criar ferramentas de sensoriamento remoto para a *PixForce*, foi alcançado, contudo, falta avaliar se o modelo de negócios permitiu a inserção da empresa no mercado. Apesar de não existir um parâmetro absoluto para análise do crescimento de uma empresa, alguns pontos devem ser considerados.

- a. O crescimento se deu de forma orgânica, isto é, apenas reinvestindo seus lucros;
- b. a empresa conta, no segundo semestre de 2016, com 17 colaboradores: dentre engenheiros de controle, designers 3D, engenheiros de software, engenheiros eletricitas e um setor comercial composto por profissionais com experiência na área de sensoriamento remoto;
- c. durante o primeiro semestre do ano, a sede da empresa deixou de ser o quarto e sala de um dos fundadores e passou a ser em um edifício comercial; além disso, deixou-se de depender de caronas para executar os testes em campo e adquiriu-se carros para levantamentos;
- d. a PixForce fechou contratos de levantamentos e processamentos de imagem com os três maiores *players* do mercado florestal brasileiro;
- e. a empresa reserva 40% das horas de trabalho para desenvolvimento, criando novas ferramentas que são constantemente incorporadas aos levantamentos comerciais.

Considera-se então, que os objetivos dessa pesquisa foram alcançados e, mais importante, diversos dados técnicos e sobre o mercado de sensoriamento remoto foram adquiridos para implementação nos produtos da PixForce.

## BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, José Augusto de. Normas de Segurança para Implantação dos VANT Civis no Espaço Aéreo Brasileiro: uma nova abordagem. **Conexão SIPAER**, v. 2, n. 1, p. 212–220, 2010. Disponível em:

<<http://inseer.ibict.br/sipaer/index.php/sipaer/article/viewPDFInterstitial/51/97>>.

AM CHO; KIM, Jihoon; LEE, Sanghyo; KEE, Changdon. Wind estimation and airspeed calibration using a UAV with a single-antenna GPS receiver and pitot tube. **IEEE transactions on aerospace and electronic systems**, v. 47, n. 1, p. 109–117, 2011.

AQUINO, Bárbara Soares de. Os efeitos jurídicos do uso do drone no direito brasileiro, 2016. Disponível em:

<<http://www.repositorio.uniceub.br/bitstream/235/8468/1/21153337.pdf>>.

ASSIS, Leonardo Campos de; VIEIRA, Carlos Antonio Oliveira; SILVA, Fabyano Fonseca. Improvement of the accuracy on image classification process through incorporation of contextual information. Disponível em: <[http://www.spatial-accuracy.org/system/files/img-X07133426\\_0.pdf](http://www.spatial-accuracy.org/system/files/img-X07133426_0.pdf)>.

EVERY, Thomas E.; BERLIN, Graydon L. Fundamentals of remote sensing and airphoto interpretation, 1992.

BASSOO, Vandana; MUSTAFA, A. K.; FAULKNER, Mike (Ed.). **Distortion arising from polar to PWM/PPM conversion in an all digital upconverter for switching rf power amplifier**: IEEE, 2009. 1533-1536. ISBN 1424428033.

BEARD, Randal W.; KINGSTON, Derek; QUIGLEY, Morgan; SNYDER, Deryl; CHRISTIANSEN, Reed; JOHNSON, Walt; MCLAIN, Timothy; GOODRICH, Michael. Autonomous vehicle technologies for small fixed-wing UAVs. **Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication**, v. 2, n. 1, p. 92–108, 2005.

Disponível em:

<<http://scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2510&context=facpub>>.

BENEMANN, Arthur. Estação de controle para veículos aéreos não tripulados, 2013. Disponível em:

<<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/96216/000915511.pdf?sequence=1>>.

BETHKE, Brett; VALENTI, Mario; HOW, Jonathan P. UAV task assignment. **IEEE Robotics & Automation Magazine**, v. 15, n. 1, p. 39–44, 2008. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Jonathan\\_How/publication/228962240\\_Experimental\\_Demonstration\\_of\\_UAV\\_Task\\_Assignment\\_with\\_Integrated\\_Health\\_Monitoring/links/02e7e52cea7c9eb024000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jonathan_How/publication/228962240_Experimental_Demonstration_of_UAV_Task_Assignment_with_Integrated_Health_Monitoring/links/02e7e52cea7c9eb024000000.pdf)>.

CARLSON, Toby N.; RIPLEY, David A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. **Remote sensing of Environment**, v. 62, n. 3, p. 241–252, 1997. Disponível em: <[http://cursosihlla.bdh.org.ar/curso%20posgrado-tdi1/3\\_Bibliografia/1997%20-%20RSE\\_Pv%20Carlson.pdf](http://cursosihlla.bdh.org.ar/curso%20posgrado-tdi1/3_Bibliografia/1997%20-%20RSE_Pv%20Carlson.pdf)>.

CHAI, Hua-bin; ZOU, You-feng; LIU, Jing-yan. Application of DTM in visualization prediction of mining subsidence [J]. **Journal of Liaoning Technical University**, v. 2, 2004.

CONBOY, Kieran; FITZGERALD, Brian (Ed.). **Toward a conceptual framework of agile methods: a study of agility in different disciplines**: ACM, 2004. 37-44. ISBN 1581139888. Disponível em:  
<[https://ulir.ul.ie/bitstream/handle/10344/2382/2004\\_Conboy.pdf?sequence=2](https://ulir.ul.ie/bitstream/handle/10344/2382/2004_Conboy.pdf?sequence=2)>.

COPPIN, Pol R.; BAUER, Marvin E. Digital change detection in forest ecosystems with remote sensing imagery. **Remote sensing reviews**, v. 13, 3-4, p. 207–234, 1996. Disponível em:  
<<http://www.academia.edu/download/30887131/915961986.pdf>>.

COWLING, Ian D.; YAKIMENKO, Oleg A.; WHIDBORNE, James F.; COOKE, Alastair K. (Ed.). **A prototype of an autonomous controller for a quadrotor UAV**: IEEE, 2007. 4001-4008. ISBN 3952417386. Disponível em:  
<<http://www2.engr.arizona.edu/~sprinkjm/research/c2wt/uploads/Main/paper1.pdf>>.

DE BARROS, BRUNA SOARES XAVIER; GUERRA, Saulo Philipe Sebastião; BARROS, ZACARIAS XAVIER de; CATITA, CRISTINA MARIA SOUSA; FERNANDES, JOÃO CARLOS COSTA CATALÃO. Uso de imagens de satélite para cálculo de volume em floresta de eucalipto no município de botucatu/sp. **ENERGIA NA AGRICULTURA**, v. 30, n. 1, p. 60–67, 2015. Disponível em:  
<[http://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/download/1538/pdf\\_17](http://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/download/1538/pdf_17)>.

DE CASTRO GALIZIA, LUIZ FELIPE; RAMIRO, Glodoaldo Arantes; DE CARVALHO ROSA, CIRINEU JOSE. Qualidade das atividades silviculturais e silvicultura de precisão. **Série Técnica IPEF**, v. 24, n. 45, 2016. Disponível em:  
<<http://www.ipef.br/publicacoes/stecnica/nr45/st45-cap07.pdf>>.

EISENBEISS, Henri. A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and image acquisition. **International Archives of Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, 5/W1, 2004.

EVERAERTS, Jurgen. The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for remote sensing and mapping. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 37, p. 1187–1192, 2008. Disponível em: <[http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1\\_pdf/203.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/203.pdf)>.

FALEIRO, L. F.; LAMBREGTS, A. A. Analysis and tuning of a ‘Total Energy Control System’ control law using eigenstructure assignment. **Aerospace science and technology**, v. 3, n. 3, p. 127–140, 1999. Disponível em:  
<<https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-bb630411-0a97-3476-913e-0910d27b887d>>.

FERNANDES, Marc Lamas. Modelação e Controlo de Motores DC Brushless, 2013.

FLETCHER, Steven David Angus; NORMAN, Patrick; GALLOWAY, Stuart; RAKHRA, Puran; BURT, Graeme; LOWE, Vince. Modeling and simulation enabled UAV electrical power system design. **SAE International Journal of Aerospace**, v. 4, 2011-01-2645, p. 1074–1083, 2011. Disponível em:

<[http://strathprints.strath.ac.uk/35501/1/2011\\_01\\_2645\\_Modeling\\_and\\_Simulation\\_Eabled\\_UAV\\_Electrical\\_Power\\_System\\_Design\\_authors.pdf](http://strathprints.strath.ac.uk/35501/1/2011_01_2645_Modeling_and_Simulation_Eabled_UAV_Electrical_Power_System_Design_authors.pdf)>.

FRYER, John G.; BROWN, Duane C. Lens distortion for close-range photogrammetry. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 52, n. 1, p. 51–58, 1986. Disponível em:  
<[http://www.isprs.org/proceedings/XXVI/part5/30\\_XXVI-part5.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXVI/part5/30_XXVI-part5.pdf)>.

FURTADO, Vitor Hugo; GIMENE, R.; JUNIOR, J. Camargo; JUNIOR, J. Almeida. Aspectos de segurança na integração de veículos aéreos não tripulados (VANT) no espaço aéreo brasileiro. **Anais do VII Simpósio de Transporte aéreo-Sitraer7**, p. 506–517, 2008. Disponível em:  
<<https://www.ufpe.br/latecgeo/images/PDF/vants.pdf>>.

GUERRA, Eduardo Bento. ESTIMATIVA DE PESO DE DECOLAGEM PARA VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS. Disponível em:  
<<http://www.abcm.org.br/app/webroot/anais/conem/2010/PDF/CON10-0955.pdf>>.

GURTNER, Alex; GREER, Duncan G.; GLASSOCK, Richard; MEJIAS, Luis; WALKER, Rodney A.; BOLES, Wageeh W. Investigation of fish-eye lenses for small-UAV aerial photography. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 47, n. 3, p. 709–721, 2009. Disponível em:  
<[http://eprints.qut.edu.au/19323/1/Alex\\_Gurtner\\_Final\\_Thesis.pdf](http://eprints.qut.edu.au/19323/1/Alex_Gurtner_Final_Thesis.pdf)>.

HARRINGTON, Aaron M.; KRONINGER, Christopher. **Characterization of small dc brushed and brushless motors**, 2013. Disponível em:  
<<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a577582.pdf>>.

HERMANGE, Emmanuel. Aspects and uses of ekphrasis in relation to photography, 1816-1860. **Journal of European Studies**, v. 30, n. 117, p. 5–18, 2000.

HERRICK, Katrina. Development of the unmanned aerial vehicle market: forecasts and trends. **Air & Space Europe**, v. 2, n. 2, p. 25–27, 2000.

HUGHES, Austin. The topography of vision in mammals of contrasting life style: comparative optics and retinal organisation. **The visual system in vertebrates**: Springer, 1977, p. 613–756.

JIANZHUANG, Liu; WENQING, Li; YUPENG, Tian (Ed.). **Automatic thresholding of gray-level pictures using two-dimension Otsu method**: IEEE, 1991. 325-327.

JULKANANUSART, Arthit; NILKHAMHANG, Itthisek (Ed.). **Quadrotor tuning for attitude control based on double-loop PID controller using fictitious reference iterative tuning (FRIT)**: IEEE, 2015. 004865-004870.

JÚNIOR, ESTEVES DE ARAÚJO SILVA; SOUZA, Newton Moreira de; LIMA, Carlos Henrique Ribeiro. Avaliação dos Dados de Alta Resolução Espacial Obtido por Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) para Produção de Modelo Digital de Terreno. Disponível em:  
<[http://www.infoteca.inf.br/sbsr/smarty/templates/arquivos\\_template/upload\\_arquivos/acervo/docs/p0025.pdf](http://www.infoteca.inf.br/sbsr/smarty/templates/arquivos_template/upload_arquivos/acervo/docs/p0025.pdf)>.

KIM, Jong-Hyuk; SUKKARIEH, Salah; WISHART, Stuart (Ed.). **Real-time navigation, guidance, and control of a UAV using low-cost sensors**: Springer, 2003. 299-309. Disponível em: <<http://users.cecs.anu.edu.au/~Jonghyuk.Kim/pdf/FSR03-NavGuidCtrl-Kim.pdf>>.

KYKKOTIS, I. English-Greek and Greek-English dictionary, 1943.

LA MCCULLERS. Aircraft configuration optimization including optimized flight profiles, 1984. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19870002310.pdf>>.

LAUER, Donald T.; MORAIN, Stanley A.; SALOMONSON, Vincent V. The Landsat program: Its origins, evolution, and impacts. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 63, n. 7, p. 831–838, 1997. Disponível em: <[http://info.asprs.org/publications/pers/97journal/july/1997\\_jul\\_831-838.pdf](http://info.asprs.org/publications/pers/97journal/july/1997_jul_831-838.pdf)>.

LEPRINCE, Sbastien; BARBOT, Sylvain; AYOUB, Francois; AVOUAC, Jean-Philippe. Automatic and precise orthorectification, coregistration, and subpixel correlation of satellite images, application to ground deformation measurements. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 6, p. 1529–1558, 2007. Acesso em: <http://authors.library.caltech.edu/8420/1/LEPieetgrs07.pdf>.

LIANG, Chia-Kai; CHANG, Li-Wen; CHEN, Homer H. Analysis and compensation of rolling shutter effect. **IEEE Transactions on Image Processing**, v. 17, n. 8, p. 1323–1330, 2008. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.493.2766&rep=rep1&type=pdf>>.

LILLESAND, Thomas; KIEFER, Ralph W.; CHIPMAN, Jonathan. **Remote sensing and image interpretation**: John Wiley & Sons, 2014. ISBN 111834328X.

LIU, Qingyuan; LIU, Wenyang; LEI, Z.; WANG, Jinling; LIU, You. A new approach to fast mosaic UAV images. **Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 38, n. 1, 2011. Disponível em: <<http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXVIII-1-C22/271/2011/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-271-2011.pdf>>.

LOGAN, Michael J.; CHU, Julio; MOTTER, Mark A.; CARTER, Dennis L.; OL, Michael; ZEUNE, Cale (Ed.). **Small UAV research and evolution in long endurance electric powered vehicles**, 2007. 7-10. (2730). Disponível em: <<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20070021697.pdf>>.

LUO, Jiebo; YU, Jie; JOSHI, Dhiraj; HAO, Wei (Ed.). **Event recognition: viewing the world with a third eye**: ACM, 2008. 1071-1080. ISBN 1605583030.

MCCAULEY, Elizabeth Anne. **Industrial Madness: Commercial Photography in Paris, 1848-1871**: Yale University Press New Haven, CT, 1994. (23).

MEIER, Lorenz; FRAUNDORFER, Friedrich; POLLEFEYS, Marc. The intelligent flying eye. **SPIE Newsroom**, 2011. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Marc\\_Pollefeys/publication/265114715\\_The\\_intelligent\\_flying\\_eye/links/5450bd5d0cf24e8f7374f2e9.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Marc_Pollefeys/publication/265114715_The_intelligent_flying_eye/links/5450bd5d0cf24e8f7374f2e9.pdf)>.

MEIER, Lorenz; TANSKANEN, Petri; FRAUNDORFER, Friedrich; POLLEFEYS, Marc (Ed.). **Pixhawk: A system for autonomous flight using onboard computer vision**: IEEE, 2011. 2992-2997. ISBN 1612843867. Disponível em: <[http://cvg.ethz.ch/publications/pdf/pub\\_73260.pdf](http://cvg.ethz.ch/publications/pdf/pub_73260.pdf)>.

MERCHANT, Monal P.; MILLER, L. Scott. Propeller performance measurement for low Reynolds number UAV applications. **AIAA**, v. 1127, p. 2006, 2006. Disponível em: <<http://soar.wichita.edu/xmlui/bitstream/handle/10057/773/t05031.pdf>>.

MONDENARD, Anne de. A emergência de um novo olhar sobre a cidade: as fotografias urbanas de 1870 a 1918. **Projeto História. Revista do Programa de Estudos Pós-Graduados de História**. e-ISSN 2176-2767; ISSN 0102-4442, v. 18, 1999.

NORMA ANATEL PARA O USO DE BANDAS POR EQUIPAMENTOS BASEADOS EM TECNOLOGIA DE ESPALHAMENTO ESPECTRAL. **IMPLEMENTAÇÃO DE ESPALHAMENTO ESPECTRAL POR SEQUÊNCIA DIRETA**, p. 137, 2002.

Disponível em:

<<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3582/000390127.pdf?sequence=1#page=138>>.

NEWTON, Isaac. **Opticks, or, a treatise of the reflections, refractions, inflections & colours of light**: Courier Corporation, 1979. ISBN 0486602052. Disponível em: <[http://www.relativitycalculator.com/pdfs/Opticks\\_by\\_Sir\\_Isaac\\_Newton.pdf](http://www.relativitycalculator.com/pdfs/Opticks_by_Sir_Isaac_Newton.pdf)>.

OLIVEIRA, Gustavo Bonfim; DE SILVA BUSAMRA, FLÁVIO LUIZ. Análise Estrutural de Asa de VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado). Disponível em: <<http://www.bibl.ita.br/xiiiencita/AER02.pdf>>.

PATIL, Mayuresh J.; HODGES, Dewey H. Flight dynamics of highly flexible flying wings. **Journal of Aircraft**, v. 43, n. 6, p. 1790–1799, 2006. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Mayuresh\\_Patil2/publication/228348911\\_Flight\\_Dynamics\\_of\\_Highly\\_Flexible\\_Flying\\_Wings/links/53eab9f50cf2dc24b3ce71ed.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Mayuresh_Patil2/publication/228348911_Flight_Dynamics_of_Highly_Flexible_Flying_Wings/links/53eab9f50cf2dc24b3ce71ed.pdf)>

PAULA NETO, Francisco de; SOARES, Vicente Paulo; SOUZA, Agostinho Lopes de; RIBEIRO, José Carlos. Influência do tamanho e da forma de unidades de amostra na estimativa do volume, número de árvores e porcentagem de sobrevivência de plantações de *Eucalyptus grandis*, NA REGIÃO DE BOM DESPACHO, MG. **Revista Arvore**, v. 5, n. 2, p. 148, 1981. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=tIqaAAAAIAAJ&oi=fnd&pg=PA148&ots=6B5XlirxAv&sig=7bz6R366z52BTBkLtruOD9NUEBg>>.

RAIZMAN, David. **History of modern design: graphics and products since the Industrial Revolution**: Laurence King Publishing, 2003. ISBN 1856693481.

RANGEL, Rodrigo Kuntz; KIENITZ, Karl Heinz; BRANDÃO, Mauricio Pazini (Ed.). **Sistema de Inspeção de Linhas de Transmissão de energia elétrica utilizando veículos aéreos não-tripulados**, 2009. 14-16. Disponível em: <<http://www.cta-dlr2009.ita.br/Proceedings/PDF/59018.pdf>>.

REBOUÇAS, Rodrigo Augusto; HABERMANN, Matheus; SHIGUEMORI, Elcio Hideiti. Identificação de objetos móveis com uso de imagens aéreas obtidas por VANT. **XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2013. Disponível em: <<http://bibdigital.sid.inpe.br/dpi.inpe.br/marte2/2013/05.29.01.03.33>>.

ROSENBLUM, Naomi. **A world history of photography**: Abbeville Press New York, 1997. ISBN 0789200287.

ROSNELL, Tomi; HONKAVAARA, Eija. Point cloud generation from aerial image data acquired by a quadcopter type micro unmanned aerial vehicle and a digital still camera. **Sensors**, v. 12, n. 1, p. 453–480, 2012. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/12/1/453/htm>>.

SABIKAN, S.; NAWAWI, S. W. Open-Source Project (OSPs) Platform for Outdoor Quadcopter. **Journal of Advanced Research Design**, v. 24, n. 1, p. 13–27, 2016. Disponível em: <[http://eprints.utem.edu.my/17289/1/ARDV24\\_N1\\_P13\\_27.pdf](http://eprints.utem.edu.my/17289/1/ARDV24_N1_P13_27.pdf)>.

SADER, S. A.; WINNE, J. C. RGB-NDVI colour composites for visualizing forest change dynamics. **International journal of remote sensing**, v. 13, n. 16, p. 3055–3067, 1992.

SAHA, Bhaskar; KOSHIMOTO, Edwin; QUACH, Cuong C.; HOGGE, Edward F.; STROM, Thomas H.; HILL, Boyd L.; VAZQUEZ, Sixto L.; GOEBEL, Kai (Ed.). **Battery health management system for electric UAVs**: IEEE, 2011. 1-9. ISBN 1424473500.

SALEM, Thomas; HASKEW, Tim A. (Ed.). **Simulation of the brushless DC machine**: IEEE, 1995. 18-22. ISBN 0818669853. Disponível em: <[http://www.academia.edu/download/33190399/CONTROLE\\_DE\\_MOTOR\\_BRUSHLISS\\_DC.pdf](http://www.academia.edu/download/33190399/CONTROLE_DE_MOTOR_BRUSHLISS_DC.pdf)>.

SANTAMARIA, Eduard; ROYO, Pablo; LOPEZ, Juan; BARRADO, Cristina; PASTOR, Enric; PRATS, Xavier (Ed.). **Increasing UAV capabilities through autopilot and flight plan abstraction**: IEEE, 2007. 5-B. ISBN 1424411076. Disponível em: <<http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/78939/04391935.pdf>>.

SHAPOVALOV, Roman; VELIZHEV, Er; BARINOVA, Olga (Ed.). **Nonassociative markov networks for 3d point cloud classification**. The: Citeseer, 2010.

SILVA, C. A.; DUARTE, Cynthia Romariz; SOUTO, Michael Vandesteem Silva; SABADIA, José Antonio Beltrão. Utilização de VANT para geração de ortomosaicos e aplicação do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). **Artigo apresentado no SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR)**, 2015. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0211.pdf>>.

SILVA, Cibelle Celestino; MARTINS, Roberto de Andrade. A “Nova Teoria sobre Luz e Cores” de Isaac Newton: uma tradução comentada. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 18, n. 4, p. 313–327, 1996. Disponível em: <<http://sbfisica.org.br/rbef/pdf/v18a33.pdf>>.



SINGH, Shashiprakash; PADHI, Radhakant (Ed.). **Automatic path planning and control design for autonomous landing of UAVs using dynamic inversion**: IEEE, 2009. 2409-2414. ISBN 142444523X. Disponível em: <<http://eprints.iisc.ernet.in/24239/1/0992.pdf>>.

SONG, Chiuk; KIM, Hongseok; JUNG, Daniel H.; YOON, Kibum; CHO, Yeonje; KONG, Sunkyu; KWACK, Younghwan; KIM, Jounggho (Ed.). **Three-phase magnetic field design for low EMI and EMF automated resonant wireless power transfer charger for UAV**: IEEE, 2015. 1-4.

SPADOTTO, Anselmo José. Análise jurídica e ambiental do uso de drones em área urbana no Brasil/Juridical and environmental analysis of the use of drone in urban area in Brazil. **Revista de Direito da Cidade**, v. 8, n. 2, p. 611–630, 2016.

STICHELBAUT, Birger; BOURGEOIS, Jean. The aerial imagery of World War One: a unique source for conflict and landscape archaeology. **Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation**, v. 2009, n. 3, p. 235–244, 2009.

SULLIVAN, Jeffrey M. (Ed.). **Revolution or evolution? The rise of the UAVs**: IEEE, 2005. 94-101. ISBN 0780392841. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Jeffrey\\_Sullivan/publication/3226769\\_Evolution\\_or\\_revolution\\_The\\_rise\\_of\\_UAVs/links/561fcac608ae93a5c9243456.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jeffrey_Sullivan/publication/3226769_Evolution_or_revolution_The_rise_of_UAVs/links/561fcac608ae93a5c9243456.pdf)>.

TAKASU, Tomoji; YASUDA, Akio (Ed.). **Evaluation of RTK-GPS performance with low-cost single-frequency GPS receivers**, 2008. 852-861. Disponível em: <[http://gpspp.sakura.ne.jp/paper2005/isgps\\_2009\\_rklib.pdf](http://gpspp.sakura.ne.jp/paper2005/isgps_2009_rklib.pdf)>.

TAKASU, Tomoji; YASUDA, Akio (Ed.). **Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB**: International Convention Centre Jeju, Korea, 2009. 4-6.

TAMPUBOLON, W.; HENDRAYANA, E. Orthorectification of Very High Resolution Satellite Imagery in the context of detail spatial planning purposes. **AGSE 2012-FOSS4G-SEA**, p. 46, 2012. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Franz-Josef\\_Behr/publication/231346866\\_Geoinformation\\_\\_Catalyst\\_for\\_planning\\_development\\_and\\_good\\_governance/links/09e4150f7cddeb8b3e000000.pdf#page=58](https://www.researchgate.net/profile/Franz-Josef_Behr/publication/231346866_Geoinformation__Catalyst_for_planning_development_and_good_governance/links/09e4150f7cddeb8b3e000000.pdf#page=58)>.

TARASCON, J-M; ARMAND, Michel. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. **Nature**, v. 414, n. 6861, p. 359–367, 2001. Disponível em: <<http://www.nature.com/nature/journal/v414/n6861/full/414359a0.html>>.

**The visual system in vertebrates**: Springer, 1977.

TURNER, Darren; LUCIEER, Arko; WATSON, Christopher. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery, based on structure from motion (SfM) point clouds. **Remote Sensing**, v. 4, n. 5, p. 1392–1410, 2012. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/4/5/1392/htm>>.

VALAVANIS, Kimon P.; VACHTSEVANOS, George J. **Handbook of unmanned aerial vehicles**: Springer Publishing Company, Incorporated, 2014. ISBN 9048197082.

VALLET, Julien; PANISSOD, Flory; STRECHA, Christoph; TRACOL, M. (Ed.). **Photogrammetric performance of an ultra light weight swinglet UAV**, 2011. Disponível em: <[http://infoscience.epfl.ch/record/169252/files/Paper-vallet\\_UAVg.pdf](http://infoscience.epfl.ch/record/169252/files/Paper-vallet_UAVg.pdf)>.

VIANI, Ricardo Augusto Gorne. O uso da regeneração natural (Floresta Estacional Semidecidual e talhões de Eucalyptus) como estratégia de produção de mudas e resgate da diversidade vegetal na restauração florestal, 2005.

WATTS, Adam C.; AMBROSIA, Vincent G.; HINKLEY, Everett A. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use. **Remote Sensing**, v. 4, n. 6, p. 1671–1692, 2012. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/4/6/1671/pdf>>.

WOLF, Paul R.; DEWITT, Bon A. **Elements of Photogrammetry: with applications in GIS**: McGraw-Hill New York, 2000. (3).

XIANG, Haitao; TIAN, Lei. Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV). **Biosystems engineering**, v. 108, n. 2, p. 174–190, 2011.

YAN, ZHOU. A review of UAV GCS development. **Avionics Technology**, v. 41, n. 1, p. 31–37, 2010.

ZHANG, Jun; HU, Jinglu (Ed.). **Image segmentation based on 2D Otsu method with histogram analysis**: IEEE, 2008. 105-108. (6). ISBN 0769533361. Disponível em: <<http://andrei.clubcisco.ro/cursuri/f/f-sym/5master/analiza-extragerea-continutului/prezentari/RenalBiopsyImageSegmentationBasedon2-DOtsuMethod.pdf>>.

## APÊNDICE A - ESPECIFICAÇÕES E APLICAÇÕES DO HARDWARE DO PIXHAWK

### • Processador

- 32 bit STM32F427 Cortex M4 (168 MHz, 256 KB RAM, 2 MB Flash)
- 32 bits STM32F103 (coprocessador redundante destinados a suprir o sistema em caso de falhas no processador principal)

Quanto mais rápido o processador, melhor são as correções feitas no sistema do VANT e mais eficiente ele se torna (MEIER, 2012). Isso reflete em uma maior autonomia e maior aproveitamento dos dias de campo, diminuindo o custo de logística e transporte.

Em um primeiro protótipo, quando um outro controlador foi utilizado (*APM 2.6*, mesmo projeto porém uma versão anterior ao *PixHawk*), a autonomia do *drone* foi 10% menor, visto que o processador era incapaz de lidar com dados de altimetria do terreno em tempo real e os voos precisavam ser muito mais altos para que o VANT não tivesse riscos de choque contra uma parcela elevada do solo.

### • Sensores

- Giroscópio: ST Micro L3GD20H 16 bit gyroscope
- Magnetômetro: ST Micro LSM303D 14 bit
- Acelerômetro: Invensense MPU 6000 3-eixos
- Barômetro: MEAS MS5611

Para um bom funcionamento do sistema de controle, é imprescindível que dados suficientes sejam adquiridos de forma rápida e confiável. Os tipos de sensores necessários variam de acordo com o objetivo do voo. Sensores que visam a estabilidade do avião são comuns a todos os sistemas, porém espera-se que um VANT para uso comercial na área de sensoriamento remoto possua sistemas que otimizem os processos por essa perspectiva. O uso de um medidor de velocidade do vento é um bom exemplo disso, pois uma aeronave que funciona em plena potência

todo o tempo, está desnecessariamente rápida em relação ao ar – desperdiçando energia das baterias (VALAVANIS, 2014). Em contrapartida, uma aeronave lenta pode entrar em *stall*<sup>19</sup> e cair. Um *pitot*<sup>20</sup> medidor de velocidade informa o sistema sobre a real velocidade da aeronave em relação ao ar, facilitando cálculos de potência fornecida ao motor para a sustentação mínima exigida. Isso ainda permite que se controle o disparador da câmera de forma mais precisa, resultando em imagens muito mais estáveis e um pós-processamento mais barato, pois não exige tanto ajuste das fotos (VALLET, 2011).

Adicionou-se, também, um módulo *GPS* modelo u-Blox LEA-6H, que permite a localização do VANT com uma precisão de 5cm nos eixos X e Y e precisão na altitude de 10cm. Tal sensor é indispensável, porque permite ao VANT operar sob o plano de voo pré-determinado e informa o controlador sobre alterações na rota esperada desejada, tornando o sistema autônomo. Além disso é utilizado como dispositivo de segurança, pois no caso de perda de sinal do rádio, falha nos sensores ou emergência apontada manualmente pelo operador, o VANT pode executar uma série de tarefas pré configuradas, como sugere Takasu (2008). A mais comum é o retorno para o local da decolagem, do inglês *RTL (Return to Launch)*.

A redundância de sensores é um fator positivo nesse controlador, pois permite que falhas não causem acidentes graves com o equipamento em caso de uma leitura errada, fato que se mostrou bastante comum. Contudo, deve-se atentar as configurações de prioridade, para que não aconteça um conflito entre dados de sensores gerando informação divergentes, como alerta Kim (2003).

- **Interfaces**

- 5x UART (portas seriais)
- 2x CAN (uma com um transdutor de 3.3V)
- PPM sum signal input

---

<sup>19</sup> Situação em que o avião encontra-se abaixo do limite mínimo de velocidade para voo.

<sup>20</sup> Tubo.

- RSSI (PWM or voltage) input
- I2C, SPI e entradas ADC de 3.3V e 6.6V.

Para uma boa implementação do sistema de controle na plataforma adotada, espera-se que exista a possibilidade de expansão para inclusão de outros sensores. Além disso, espera-se que o sistema conte com portas de comunicação com os atuadores e protocolos de comunicação com o solo, como rádio e telemetria.

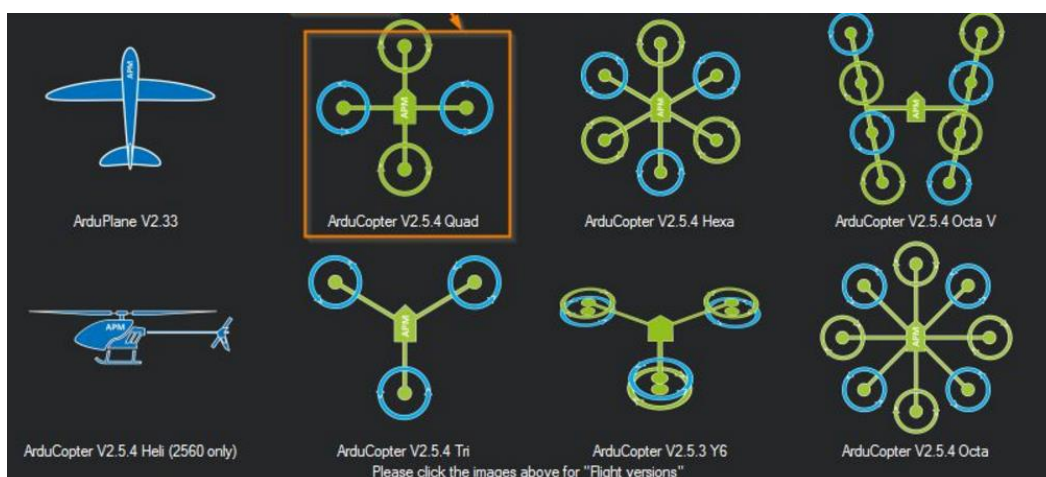
No caso do VANT da PixForce, foi utilizada a porta *I2C* para conexão do *pitot* de velocidade do ar, magnetômetro externo e sensor ultrassônico de proximidade. Além disso, estudou-se a possibilidade de conectar um segundo magnetômetro externo, de forma redundante, visto acidentes catastróficos que aconteceram devido a interferência da fiação elétrica do avião. Contudo, foi suficiente afastar o sensor e aproximar as baterias do controlador de tensão, reduzindo o ruído eletromagnético como sugerido por Song (2015).

O sensor ultrassônico (sensor de altitude utilizados em rampas de aproximação para altitudes menores que 10 metros, onde o barômetro falha constantemente) foi conectado de forma digital pois sua versão analógica também sofria de leituras inconstantes devido às altíssimas correntes usadas pelo sistema do motor.

## APÊNDICE B - ESPECIFICAÇÕES E APLICAÇÕES DO SOFTWARE DO PIXHAWK

O *software* do projeto *PixHawk* constitui um sistema *RTOS (Real-Time Operating System)* que pode ser carregado com diversas opções de parâmetros de controle e personalização pré-configurados para diversos veículos (carros, barcos e aviões). Cada opção de veículo constitui de centenas de parâmetros de ajustes e ferramentas de calibração que permitem a adaptação da planta de controle às características da aeronave. Além disso, é possível utilizar o *USB bootloader* e descarregar parâmetros personalizados e se utilizar de todas as ferramentas do *hardware* disponíveis. A Figura 20 lista algumas das opções de personalização disponíveis.

Figura 20 - Opções de firmwares disponíveis para upload no PixHawk.



Fonte: Do autor (2016).

O projeto é muito bem documentado e o desenvolvimento é organizado, contando com uma *wiki*<sup>21</sup> com todas as informações necessárias para uma operação e um *git*<sup>22</sup> que permite contribuições e adição de novas ferramentas por parte da comunidade. Atualmente, a *PixForce* vem contribuindo com o projeto através da adição de novas ferramentas para controle de asas voadoras, como o *Skywalker X8*

<sup>21</sup> Coleção de documentos em hipertexto.

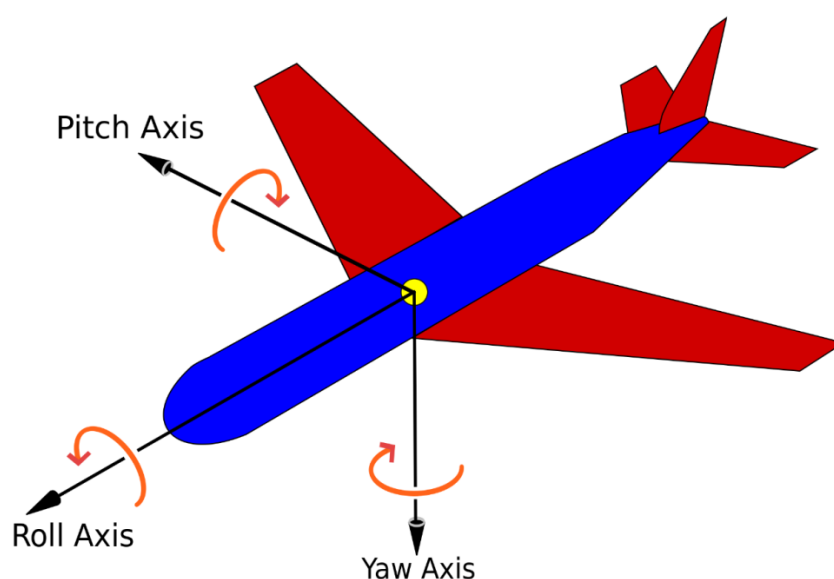
<sup>22</sup> Controlador de versionamento utilizado para desenvolvimento colaborativo.

e novos protocolos de comunicação com diversas câmeras, permitindo o disparo e conferência da execução dos comandos relativos a fotografia.

- **Controle**

O sistema de controle conta com um controlador *PID* modelado pelos movimentos da aeronave durante o voo – o sistema organiza os parâmetros entre *Roll*, *Pitch* e *Yaw*, movimentos mostrados na Figura 21 (JULKANANUSART, 2015).

Figura 21 - Roll, Pitch e Yaw.

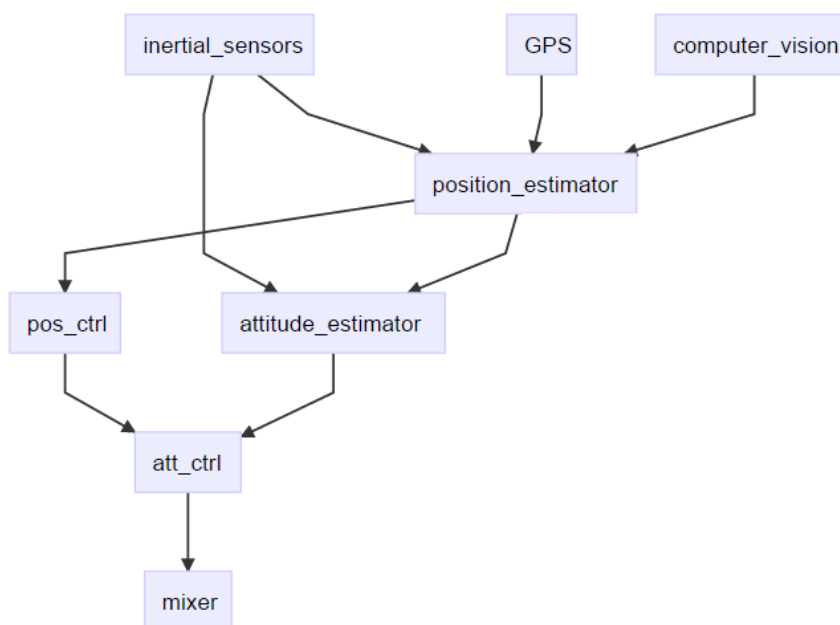


Fonte: MathWorks® (2016, imagem digital).

O fluxo do sistema de controle, como mostrado parcialmente na Figura 23, é o seguinte:

- I) O operador indica, através de uma interface homem-máquina (i.e. *sticks* do controle remoto ou programação do sistema autônomo) qual o movimento desejado;
- II) os dados dos sensores são adquiridos e mixados com a intenção do operador, como mostra o fluxograma da Figura 22;
- III) o *mixer*, através dos parâmetros *PID*, define a saída do sistema para os atuadores.

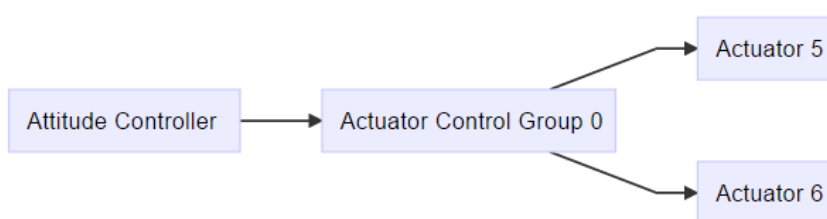
Figura 22 - Funcionamento do sistema de mixagem.



Fonte: px4® (2016, imagem digital).

Cabe colocar que o sistema trabalha com grupos de controles (conjunto de atuadores) em vez de saídas únicas. Isso significa, por exemplo, que para fazer uma curva, em um avião do tipo asa voadora, o controlador de altitude comanda os dois atuadores (servos nas asas).

Figura 23 - Exemplo de fluxo de atuação.



Fonte: px4® (2016, imagem digital).

O sistema também conta com uma ferramenta de auto calibração: através de repetidos testes que consistem de curvas e rampas de subida e descida, os sensores armazenam a resposta do sistema a uma entrada (o controle manual do operador) e após dez segundos, o processador recalcula os parâmetros *PID* da aeronave. Após aproximadamente vinte exercícios de cada movimento, é possível observar uma melhora satisfatória na performance e estabilidade do avião.



## APÊNDICE C - ESPECIFICAÇÕES E ESTUDO DA FUSELAGEM DO AVIÃO

- **Dimensões.**

O tamanho é um fator diretamente ligado com a logística de transporte do VANT, visto que uma grande parcela dos levantamentos é realizada fora do estado do Rio Grande do Sul, deve-se considerar que o avião deve ser enviado no porão das aeronaves comerciais sem maiores problemas. Além disso, considera-se que quanto maior o peso e as dimensões, maior é a taxa de bagagem extra cobrada pelas companhias aéreas. Deseja-se, também, que o avião possa ser transportado dentro de carros disponíveis na maior parte das locadoras de automóveis brasileiras, entende-se por isso que as dimensões máximas não podem passar da caçamba de uma camionete com cabine dupla. Um agravante, ainda, é o aspecto da redundância: visto o custo logístico de uma operação em campo em outro estado, deve-se transportar pelo menos dois aviões, para que, em caso de falha grave do primeiro, não seja necessário providenciar emergencialmente o envio em separado de um reserva.

Não cabem aqui considerações sobre capacidade de carga da aeronave, apenas espaço interno, visto que o tamanho não é o único aspecto para analisar o peso máximo de decolagem (outros fatores são área da asa, layout da asa, área do charuto da fuselagem, potência do motor e peso total dos componentes), como coloca Oliveira (2010). Finalmente, deseja-se que a aeronave possa caber dentro de uma caixa protetora cuja dimensão não pode ultrapassar a metade do compartimento de cargas de uma camionete, veículo majoritariamente utilizado para transporte até áreas de difícil acesso. Para tanto, considerou-se o carro Amarok, da marca Volkswagen, veículo que a PixForce adquiriu e a maioria das empresas de locação de carros possuem. A Tabela 5 mostra as dimensões da caçamba e dá uma ideia geral das dimensões máximas da caixa de transporte do VANT, visto que diversas disposições são possíveis com tais informações.

Tabela 5 - Dimensões do compartimento de carga.

ITEM	DIMENSÃO
Comprimento	1555 mm
Largura	1620 mm
Largura entre caixas de rodas	1222 mm
Altura	508 mm
Área da caçamba	2,52 m <sup>2</sup>
Volume da caçamba	1,280 m <sup>3</sup>

- **Capacidade de carga.**

O peso total de decolagem é dependente de uma soma de diversos fatores, aqui separa-se entre os inerentes aos aviões (motor, bateria e controlador) e os periféricos responsáveis pelo funcionamento de acordo com a área de atuação do VANT, como coloca Guerra (2007). Os primeiros, tendem a ter uma relação constante de peso dos componentes essenciais em relação a capacidade de carga, isto é, um avião que carrega 20kg, tem um motor de 2 kg (no caso de motores a combustão), já um avião de 3kg, tem por volta de 300g em peso de motor e outros componentes essenciais ao seu funcionamento. A Tabela 6 - Comparação dos diferentes *airframes* e peso dos motores. mostra alguns exemplos dessas comparações. Outros itens como rádios, controladores, sensores e demais eletrônicos não são incluídos nessa análise por representarem um percentual muito pequeno no peso total da aeronave (peso somado menor que 100g).

Tabela 6 - Comparação dos diferentes *airframes* e peso dos motores.

<b>AIRFRAME</b>	<b>PESO MÁXIMO</b>	<b>PESO DO MOTOR</b>	<b>RELAÇÃO</b>
New Mugin Plus	25 kg	2300 g	10.9
Swallow Electric	9 kg	845 g	10.6
Skywalker X8	3,8 kg	320 g	11.9

Essa relação, relativamente constante, permite ao projetista analisar as demandas de peso apenas pela adição dos componentes essenciais aos levantamentos, considerando que o peso disponível para sensores é igual ao peso máximo de decolagem menos o peso da fuselagem com componentes mínimos. Isto é, mesmo em modelos com dimensões similares, o peso dos equipamentos

essenciais tende a seguir essa relação. Parte-se, então, para uma análise dos componentes necessários para fotogrametria e seus acessórios. Considerou-se ainda, uma margem para a adição de novos componentes, eventualmente solicitados pelo mercado.

A câmera, principal sensor para execução de levantamentos aerofotogramétricos, pesa 750g com a lente selecionada. Além disso, considera-se o peso do sensor multiespectral, 200g. Outros sensores como LIDAR, câmeras térmicas, câmeras com maior resolução tem um peso total de aproximadamente 1100 gramas, como exemplifica a Tabela 7 - Peso de diferentes *payloads*. Dessa forma, estipulou-se que o *drone* deveria carregar, além de seu próprio peso 1200g em equipamentos de sensoriamento remoto.

Tabela 7 - Peso de diferentes *payloads*

<b>PRODUTO</b>	<b>PESO</b>
<b>LIDAR</b> UAV LidarPod	1110g
<b>Câmera Térmica</b> Workswell WIRIS 640	850g
<b>Câmera de alta resolução</b> Canon EOS 5D	1050g

- **Outras características.**

Além de especificações de tamanho e peso, especificou-se que o VANT deve ter espaço interno suficiente para acomodar todos os equipamentos, fator que é atendido pela maioria das opções avaliadas. Com o uso comercial, a capacidade de cobrir áreas extensas deve ser considerada, porém, isso depende, principalmente de dois fatores: a velocidade e a autonomia. Esse último, função de variáveis como energia disponível nas baterias, aerodinâmica do avião, motor, hélice, dentre outros, como discute Guerra (2010).

Segundo informações do fabricante da câmera selecionada, definiu-se que a velocidade de operação não poderia ser maior que 20 m/s. O sensor multiespectral conta com um *rolling shutter*, Liang (2008) explica que isso significa que as linhas da matriz da imagem são formadas em tempos diferentes, causando cisalhamento na foto. A Figura 24 ilustra o efeito em um automóvel em movimento em relação à câmera. Desse modo, estipulou-se a velocidade máxima de 18 m/s.

Figura 24 - Efeito do *rolling shutter*.



Fonte: (LIANG, 2008).

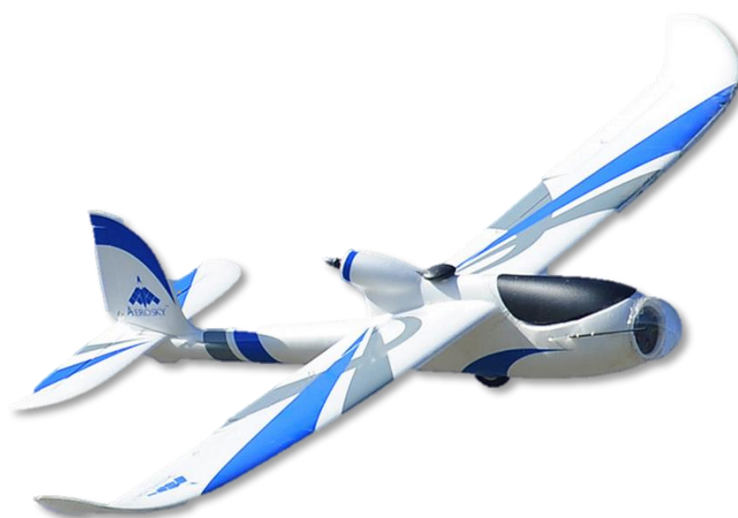
A área que pode ser coberta pelo *drone* é função, também, do tempo em que ele permanece no ar. Há diversas formas de adicionar tempo à autonomia do VANT, porém deseja-se achar uma combinação, principalmente, de baterias e tamanho da asa. Buscou-se informações fornecidas pelos fabricantes das fuselagens com curvas de autonomia, isto é, qual é o tempo de voo para uma determinada quantidade de energia nas baterias. Dessa forma, não é necessário um conhecimento avançado de aerodinâmica, visto que esses dados já foram levantados pelo fabricante e cruzados com dados de energia. Cabe ao projetista analisar tais curvas e considerar diversos tipos de baterias e seus respectivos pesos, informação resumida em um parâmetro chamado “densidade de energia”. Para tal, considerou-se bateria de Lithium-ion, baterias recarregáveis com densidade de energia de aproximadamente 200 W.h/kg. Essas baterias possuem um ótimo ciclo de cargas (200 ciclos) e estão disponíveis no mercado em diversas capacidades.

Deve-se considerar a facilidade de operação, visto que diferentes formatos de aeronaves possuem diferentes superfícies de comando, alterando completamente o funcionamento do controlador. A Figura 25 mostra uma asa voadora e uma aeronave de asa fixa. Deve-se notar que a primeira possui apenas duas superfícies de comando para executar todos os três movimentos (*Roll*, *Pitch*, *Yaw*), o que torna a modelagem bastante complexa. Essas superfícies são chamadas de *elevon*, pois fazem a função do *elevator* e do *aileron*, presentes em aviões com cauda. Já o segundo, conta com uma menor área de asa, o que diminui a sustentação e exige que o motor funcione por mais tempo, diminuindo sua razão de planeio. Considerou-se também, que uma asa voadora possui uma mesma sustentação com dimensões totais menores, o que facilitaria a logística de transporte e manteria a autonomia.

Figura 25 - Aeronave do tipo asa voadora (acima) e asa fixa (abaixo).



Fonte: Parrot® (2016, imagem digital).



Fonte: HobbyKing® (2016, imagem digital).

## APÊNDICE D - ESPECIFICAÇÕES E ESTUDO OS SENSORES PARA AEROFOGRAMETRIA

- **Sensor RGB.**

A busca por sensores *RGB* se dividiu em duas: soluções preparadas para VANTS ou uma solução comercial adaptada às necessidades da *PixForce*. Foram consultadas diversas empresas especializadas, no Brasil, Estados Unidos e França, porém as opções encontradas se mostravam excessivamente caras para o momento inicial da empresa no mercado. Usando o suporte aos periféricos do *PixHawk*, projetou-se *hardware* para um sistema de disparo de câmeras via rádio e posteriormente, foi programado um sistema de disparo automático, onde o operador seleciona qual o intervalo de tempo ou distância entre cada foto e o controlador envia os sinais para a câmera.

A câmera escolhida foi uma *Alpha 6000*, da fabricante japonesa *Sony*, principalmente por ser a câmera que um dos engenheiros da *PixForce* já possuía, contudo, essa se mostrou excelente para o trabalho proposto, visto sua altíssima resolução 24.3 Mp e ampla opção de lentes. Posteriormente, mesmo após diversos testes com câmeras compactas *point-and-shoot*, manteve-se a opção por essa câmera por mostrar ótimos resultados mesmo em situações extremas de interferência eletromagnética e vibração. O peso da câmera foi um fator positivo, visto que apesar de um grande sensor, a estrutura, sem a lente, tem apenas 375 gramas. Durante o desenvolvimento do VANT foi lançado o modelo *QX1*, também da *Sony*, uma câmera sem interfaces, apenas com sensores e suporte para a lente. Devido a semelhança com a *Alpha 6000* e as vantagens de ter dimensões e peso menores, adquiriu-se o modelo *QX1*. A Figura 26 mostra as câmeras.

Figura 26 - Câmera Sony Alpha 6000 (acima) e Sony QX1 (abaixo).



Fonte: Sony® (2016, imagem digital).

Como coloca Gurtner (2009) em sua discussão sobre lentes olho-de-peixe, a escolha da lente deve considerar o pós-processamento executado pela PixForce: visto que o processo de ortorretificação, comum a todos os levantamentos aerofotogramétricos, exige uma imagem pouco distorcida. Além disso, De Assis (2010) coloca que o campo de visão da lente determina a altitude do voo: quanto maior a altitude, mais energia se gasta e maior é o risco devido a ventos ou perda de sinal de rádio e telemetria. Nessa pesquisa, considerou-se lentes de 16, 18 e 20 milímetros. A distorção gerada por essa última foi estudada por Fryer (1986).

A primeira, uma *Sony E-Mont. SEL16F28 16mm* causaria um demasiado efeito de bordas, isto é, devido à curvatura da lente, a imagem teria um efeito de “olho-

de-peixe”. Apesar de ser possível calibrar tal lente via software, este processo adiciona tempo de máquina à execução dos serviços.

A segunda, uma *Sony E 10-18mm f/4 OSS Lens* teria bons resultados com a imagem, devido a sua qualidade e distância focal apropriada, porém o fato de ser uma lente móvel, incorpora distorções nas fotos devido a constante vibração da aeronave. Além disso, tem um preço três vezes maior que lentes fixas com características similares.

A terceira opção, de 20 milímetros, modelo *Sony 20mm f/2.8 Alpha E-mount Lens*, mostrada na Figura 27, se mostrou bastante adequada às necessidades dos levantamentos da PixForce. Apesar de ter um *footprint* (área fotografada em solo) menor do que as outras lentes e por isso exigir voos mais altos, tem uma ótima qualidade de imagem, por não ter componentes móveis e um preço compatível com as outras opções.

Figura 27 - Lente Sony embarca no sistema de fotografia RGB.



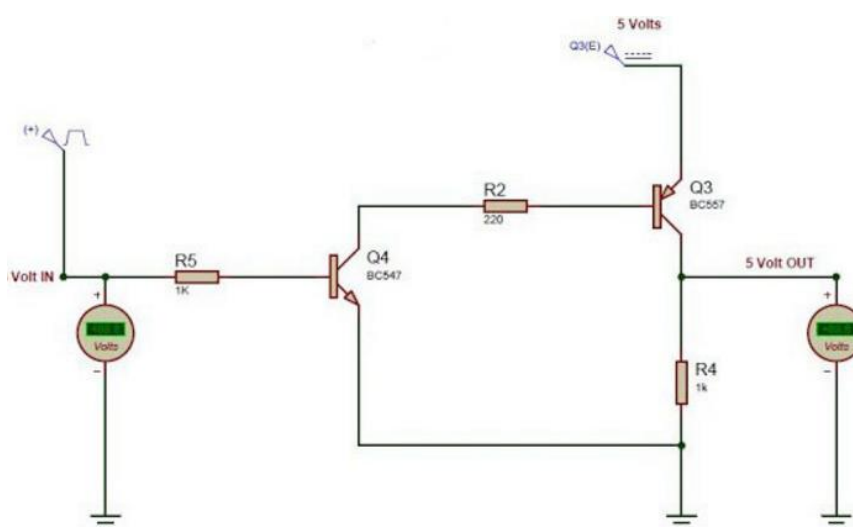
Fonte: Sony® (2016, imagem digital).

Em testes de campo, a combinação *Sony Alpha 6000* ou *Sony QX1* somada a lente de 20 mm, da mesma marca, geraram imagens com qualidade suficiente para criação de mosaicos e extração de informações das imagens. Foi projetado e embarcado ao *drone* um suporte feito em impressora 3D para a câmera.



Quando existiu a necessidade de trabalhar com a câmera funcionando em modo automático, disparando sempre que uma certa distância fosse percorrida, desenvolveu-se um circuito disparador para a câmera, pois o controlador, trabalhando em 3.3V, não consegue acionar o *shutter*, que exige uma borda de subida de 5V. O circuito, mostrado na Figura 28, é bastante simples no aspecto da eletrônica, conta com dois transistores e uma fonte de tensão de 5V, de um controlador de tensão já embarcado no VANT. Apesar disso, quando foi disponibilizado no site *hackiao.com*, *blog* de projetos do autor desse texto, teve 30.000 acessos em três meses, demonstrando a demanda que a comunidade, usuário do *PixHawk* tinha.

Figura 28 - Circuito do disparador.



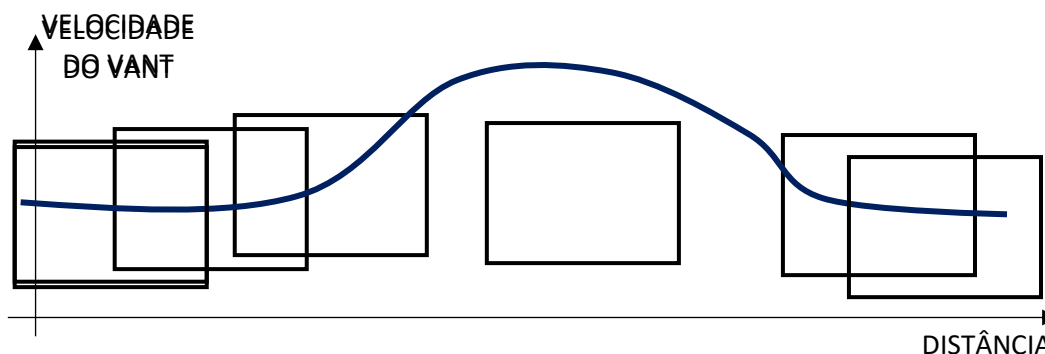
Fonte: Do autor (2016).

- **Notas sobre o tipo de disparo e ângulo da câmera.**

Escolhida a câmera, lente e disparador, cabe estudar como os disparos vão ocorrer, isto é, de forma manual, por tempo ou distância. Xiang (2011) ainda coloca que o primeiro é a forma mais usada no VANTS para fotografia, onde o usuário pressiona um botão e a câmera tira uma foto. Tal uso é inviável para missões de mais de 90 minutos, onde exige-se que o usuário pressione o botão a cada dois segundos. Logo, foi implementado parâmetros no controlador que coordenam um pulso em uma das saídas analógicas, que após passar pelo circuito amplificador, acionam o *shutter* da câmera. Como um primeiro teste, usou-se um *timer* que acionava a câmera a cada

$n$  segundos, porém esse método se mostrou ineficiente, visto que ventos de diferentes velocidades podem retardar o avião em relação ao solo e a aquisição se torna heterogênea, como exemplifica a Figura 29.

Figura 29 - A linha representa a velocidade do VANT e os retângulos o *footprint* das fotos.



Fonte: Do autor (2016).

Finalmente, aplicou-se dados do *GPS* do avião, para que o disparo acontecesse em relação a distância percorrida em solo, isso garante uma aquisição homogênea e independente da velocidade relativa do avião em relação ao ar. Contudo, algumas vezes, principalmente quando o avião está muito rápido em relação ao solo, os disparos acontecem mais rápido que o *buffer* da câmera consegue acompanhar e as fotos deixam de ser tiradas por vários segundos. Para contornar isso, foi limitado que os disparos podem acontecer com um intervalo de no mínimo 1200 milissegundos.

Devido a dinâmica de voo de uma asa voadora, que inclui uma intensa operação de *roll*, devido à ausência de estabilizador de cauda, como coloca Patil (2006), grande parte das imagens são tiradas com a câmera não apontando exatamente  $90^\circ$  para baixo, mas com um certo ângulo em relação ao eixo vertical. Isso causa distorções nas imagens e exige um maior cuidado no pós-processamento. Foi estudada a implementação de um *gimbal*, sistema ativo que compensa os movimentos de *roll* do avião dentro girando a câmera e mantendo o eixo da lente perfeitamente apontado para baixo, perpendicular ao horizonte. Tal implementação foi bem sucedida, porém, durante testes, verificou-se que a energia gasta no atuador

somada ao peso extra do suporte diminuía em torno de 15% a autonomia de voo e por isso o sistema não foi embarcado.

- **Sensor multiespectral.**

O sensor multiespectral fornece dados para uma série de análises úteis ao mercado florestal, dentre elas a identificação de falhas e o cálculo do NDVI, como relata Coppin (1996). Outras informações também são comumente extraídas desses sensores, porém procurou-se especificar um sensor que atendesse a essas necessidades, visto que envolvem um maior número de bandas.

- **NDVI - o padrão de análise de saúde na plantação.**

NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) é a abreviação da expressão em inglês para, o que equivale em português, a Índice de Vegetação da Diferença Normalizada. Carlson (1997) coloca que o índice serve para analisar a condição da vegetação natural ou agrícola nas imagens geradas por sensores remotos e é frequentemente usado para medir a intensidade de atividade clorofiliana, na maioria das vezes comparando vários períodos distintos e fornecendo informações sobre perdas e produtividade.

Saders (1992) coloca que o NDVI é computado realizando aritmética, como demonstra a Equação 1 - Cálculo do NDVI., de canais espectrais dos sensores na maioria dos casos provenientes de satélites. Contudo, com o crescimento do mercado de VANTs, é possível encontrar sensores embarcáveis em aeronaves como o da PixForce.

Equação 1 - Cálculo do NDVI.

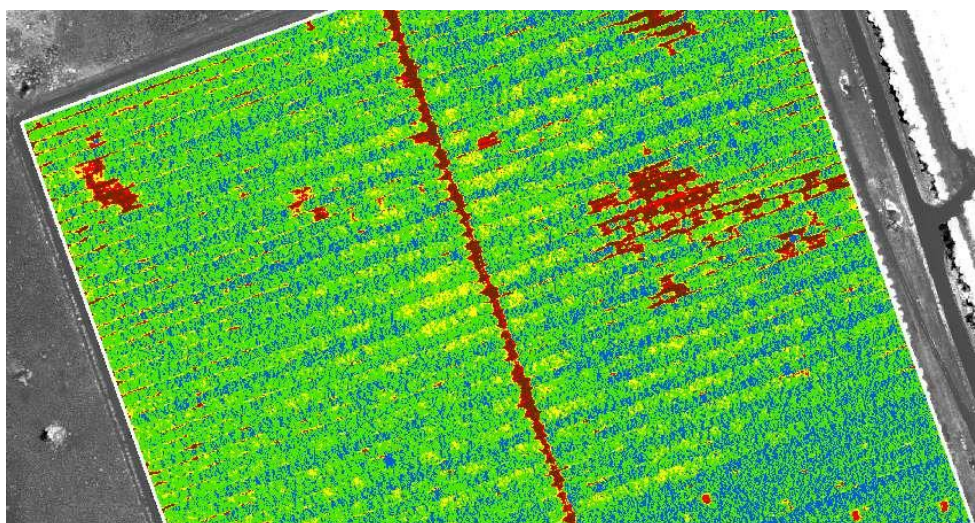
$$NDVI = \frac{CANAL_{Infra\ Vermelho} - CANAL_{Vermelho}}{CANAL_{Infra\ Vermelho} + CANAL_{Vermelho}}$$

O princípio de funcionamento é que a vegetação, quanto mais ativa, mais absorve a luz solar na região do vermelho, no processo de trabalho da clorofila nos tecidos vegetais, deixando os valores digitais baixos da imagem no canal vermelho. Da mesma forma, a estruturas celulares das folhas provocam uma forte reflexão da

luz solar na região do *NIR*, deixando os valores digitais altos da imagem no canal infra vermelho. O índice se aproxima de 1 para grande atividade clorofiliana e -1 para uma vegetação com baixa intensidade. Uma imagem com o índice *NDVI* em escala colorida é mostrada na Figura 30.

Além da saúde da plantação, o algoritmo de identificação de falhas em plantações de eucaliptos, discutido adiante, se beneficia muito dos sensores multiespectrais e de índices de vegetação, visto que o solo tem um índice de refletância bastante contrastante com o vegetal, tornando mais fácil a tarefa de diferenciar a planta viva da morta ou da falha no plantio, como coloca De Barros (1992). Nesses casos é comum identificar as falhas utilizando o sensor multibandas e utilizar uma imagem *RGB* para pontuar no relatório final onde estão localizadas as falhas no plantio.

Figura 30 - Mapa NDVI. As zonas vermelhas indicam menor quantidade de clorofila na planta.



Fonte: UnmannedSensing®(2016, imagem digital).

Finalmente, o sensor escolhido foi o *Sequoia* da marca americana *MicaSense*, pois seu valor (\$5400 USD) somado aos seus sensores (bandas *R*, *G*, *NIR* e *RedEdge*), representados na Figura 31, atendem às demandas da PixForce. Seu tamanho e peso (107 gramas) diminuto facilitam a integração com o VANT. Em testes, contudo, notou-se que a câmera apresentava superaquecimento devido à ausência

de refrigeração, pois foi projetada para veículos multirotores, onde o próprio deslocamento do veículo refrigera o sistema. Esse problema foi contornado, em um primeiro momento, com o uso de uma ventoinha, que foi substituída por um canal de refrigeração na fuselagem do avião, o que se mostrou mais eficiente em termos energéticos.

Figura 31 - Sensor Sequoia.



Fonte: MicaSense® (2016, imagem digital).

Dispensou-se a integração com o controlador de voo, visto que a Sequoia possui um GPS próprio, além de um conjunto de sensores responsáveis por calibrar constantemente as imagens. Isso é útil quando há diferença de luminosidade durante o levantamento e os dados se tornam relativos a parâmetros de incidência solar distintos.

- **Adaptação à fuselagem do avião.**

Todos os sensores foram instalados em suportes projetados em CAD 3D (*Computer Aided Design*) e impressos nas impressoras 3D da *PixForce*. Contudo, uma série de testes, revelou que os materiais tradicionais ainda transmitiam excessiva vibração às lentes. Utilizou-se então um filamento de impressão *UP3D*, flexível, que absorve grande parte das vibrações provenientes do motor. Além disso, furos foram feitos na fuselagem para o encaixe das câmeras e vidros resistente a riscos foram instalados para proteger as lentes em caso de pouso em pedregulhos.

## APÊNDICE E - ESPECIFICAÇÕES E ESTUDO DOS ATUADORES E DRIVERS

- **Motor.**

As baterias de Li-Po (Polímero de Lítio) disponíveis no mercado foram um fator decisivo para a opção por motores elétricos. A alta densidade de energia somada a facilidade de operação e confiabilidade dos motores vão ao encontro das necessidades comerciais da PixForce. No caso de um motor a combustão, por exemplo, o ângulo das curvas deveria ser limitado pela capacidade da bomba de combustível de funcionar em situações diferentes da posição horizontal e adaptadores para permitir o bombeamento aumentariam a complexidade e custo do projeto. Somado a isso, todos os três primeiros engenheiros da PixForce são Eletricistas, tornando a especificação e projeto dos controladores muito mais familiares. Tendo definido o modelo da fuselagem e peso de decolagem, é possível selecionar o motor de acordo com parâmetros fornecidos pelo fabricante, contudo, resta saber a tensão da bateria embarcada, visto que a maioria dos motores trabalha com parâmetros de rotação baseados na tensão de alimentação.

Fletcher (2011) coloca que os motores disponíveis no mercado para VANTs são, na sua maioria, de corrente contínua sem escovas (*brushless*), síncronos, alimentados por um inversor através de corrente contínua. Diversas são as vantagens sob os motores de corrente contínua com escovas, como ruído mecânico reduzido, importante para reduzir a vibração e manter a câmera estável, vida útil mais longa, devido à ausência de desgaste da escova e ausência de ionização do comutador. Além disso, o ruído eletromagnético gerado é menor, fato essencial para o bom funcionamento dos sensores, principalmente o magnetômetro embarcado.

Harrington (2013) coloca, contudo, que o custo dos motores sem escovas é mais elevado, o qual se deve ao fato de requerem dispositivos *MOSFET* de alta potência na fabricação do *ESC (Electronic Speed Controller)*. Por outro lado, os motores de corrente contínua com escovas podem ser regulados por um resistor variável simples (potenciômetro ou reostato), porém essa forma de controle se mostra ineficiente em uma aeronave com energia extremamente limitada pelo peso das

baterias. Finalmente, definiu-se pela implementação de um motor *brushless* devido a ampla oferta de motores e controladores no mercado e a facilidade de integração com o controlador. Apesar do custo de aquisição elevado, o custo de operação menor justifica a aplicação em um sistema que deve funcionar por diversas vezes.

O principal parâmetro de um motor *brushless* para aplicação aviônica é o valor KV, como discute Salen (1995), que representa o número de rotações do motor em um minuto quando 1 V é aplicado e nenhuma carga é conectada. Isso significa que quanto maior o número de KVs, maior é a rotação do motor e menor é o torque. Motores com altos KV são recomendados para aplicações onde exista uma demanda de picos de funcionamento por um pequeno período de tempo, usualmente menos que 30 segundos, fato que se aplica para planadores, por exemplo, onde é necessário que a aeronave suba até uma certa altitude através do funcionamento do motor em potência elevada. Por outro lado, baixos KVs são indicados para aplicações que exigem grande torque e funcionamento constante, como aeronaves esportivas, onde deseja-se, inclusive, aceleração vertical através do uso de grandes hélices e funcionamento constante e permanente do motor (FERNANDES, 2013). Limitou-se a análise sobre a escolha do motor a esse parâmetro, pois ele reflete na performance das respostas do avião, principalmente, enquanto o peso de decolagem, outro fator importante a ser considerado, foi definido por uma escolha apropriada de baterias e hélices. O PixForce One, apesar de, idealmente, funcionar como um planador, deve poder se recuperar de rajadas de vento ou usar 100% da potência do motor em casos de correntes de ar frio, que diminuem a sustentação da aeronave. Logo, o projetista da *PixForce* definiu que o desempenho do motor deveria ser intermediário às duas regiões: deve permitir ascensões até altitudes elevadas por curtos períodos de tempo, ao mesmo tempo que deve poder funcionar de forma constante, se necessário.

Durante os treinamentos dos pilotos de campo, adquiriu-se uma aeronave modelo asa fixa para testes de decolagem e pouso. Ela veio de fábrica com um motor com KV elevado e uma grande hélice, o que não é uma combinação recomendada, visto que esses motores, usualmente, têm baixo torque. Em uma das decolagens, contra um vento de 18 m/s (extremamente forte e fora da região de operação do VANT), um dos operadores manteve o motor em potência máxima por muito tempo, para que o avião se deslocasse em relação ao solo. Após dois minutos, percebeu-se que a aeronave perdia altitude e o motor não estava mais sendo acionado. Após o

pouso, notou-se que a tinta vermelha que recobria o motor estava preta, fruto da temperatura elevada causada pelo uso indevido.

Definiu-se, que o motor SII-3014 *Brushless*, mostrado na Figura 32, da marca *Scorpion*, com 840KV, seria embarcado no VANT. Ele representa uma performance intermediária entre funcionamento constante e demanda instantânea. Tal opção se deu, também, pela negociação de importação, onde o fabricante garantiu pagar os impostos de importação para uma compra de trinta unidades, além de fornecer gratuitamente os suportes para instalação do motor. Esse último se mostrou incompatível com o modelo da aeronave, e novos suportes foram projetados em CAD e cortados em *CNC*.

Figura 32 - Motor utilizado no PixForce One.



Fonte: Scorpion (2016, imagem digital).

- **Baterias.**

Em um sistema aeronáutico movido a baterias, a densidade energética é um fator fundamental ao bom desempenho da aeronave (SAHA, 2011). Tomando esse cuidado, determinou-se que após definidos o tipo e tensão, o próximo passo seria definir a quantidade de baterias presentes na aeronave.



Baterias Li-Pocontêm, em seus eletrólitos, sais de lítio retidos em um polímero sólido, como o óxido de polietileno, ao invés de solventes, tornando-as adaptáveis a diferentes formatos e permitindo altas taxas de descarga (TARASCON, 2001). Atualmente, oferecem a maior densidade energética disponível no mercado, somado a isso há abundância de opções de capacidade, tensão de operação e taxa de descarga.

Tais baterias tem sua tensão representadas pelo número de células (S), onde cada uma tem 3.7 V e as opções disponíveis no mercado variam de 2S (7.4 V) até 14S (51.8 V). O motor escolhido tem uma tensão de operação entre 3S e 6S, contudo, o controlador de voo recomenda que se alimente seus sensores embarcados com 4S. Portanto, optou-se por uma bateria de 4S, que em funcionamento com um motor de 840 KV, proporciona em torno de 13000 RPM.

A taxa de descarga da bateria é dependente de um parâmetro chamado C, que multiplicado pela capacidade da bateria, representa a corrente máxima de operação. Um fato importante é que, quanto maiores as taxas de descarga, menor a vida útil da bateria e maior o seu preço. É sabido do projetista que o VANT da PixForce vai operar com uma quantidade de energia relativamente grande. Para efeito de comparação, o eBee, com novecentas gramas, da empresa *Parrot*, funciona com baterias de 3700 mAh, o que representa 37C de taxa de descarga  $\left(\frac{3700 \text{ mAh}}{100 \text{ A}}\right)$ , para um motor com corrente máxima de operação de 100 A. No caso do PixForce One, um VANT de dois metros de envergadura e quatro kg, considera-se que taxas de descarga de 20 C são suficientes, visto que uma bateria de 5000 mAh e 20C ( $5000 \text{ mAh} * 20C$ ) pode alimentar o motor sob operação máxima, fato que dificilmente ocorre devido à programação do controlador de voo. Com essas especificações, definiu-se que a bateria utilizada seria a *Flightmax*, da empresa *ZIPPY*, mostrada na Figura 33, com 5000mAh de capacidade, 4S (14.8 V) de tensão e 20C de taxa de descarga. A capacidade de 5000mAh foi escolhida pois, dessa forma, é possível executar os testes de autonomia do avião com diversas combinações de baterias.

Figura 33 - Bateria utilizada no PixForce One.



Fonte: ZIPPY® (2016, imagem digital).

O número de baterias foi calculado de forma empírica devido às informações conflitantes do fabricante do *airframe*: durante uma conversa com o engenheiro da fábrica *SkyWalker*, foi relatado que, baseado na aerodinâmica do modelo, era possível obter noventa minutos de autonomia utilizando 5000 mAh de carga. Em testes de campo, o VANT permaneceu no ar por apenas 40 minutos. Decidiu-se prosseguir com experimentos executados pela PixForce e levantar uma curva de capacidade de carga das baterias em relação à autonomia. Lembra-se que cada bateria adiciona 460 gramas ao peso do *drone*, e o ponto ótimo de quantidade de baterias não é aquele onde se coloca mais energia disponível na aeronave, visto o peso que isso representa. Os dados dos experimentos são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Teste de autonomia baseado no número de baterias.

NÚMERO DE BATERIAS	CARGA	PESO DAS BATERIAS	AUTONOMIA
1	5000 mAh	460 gramas	40 minutos
2	10000 mAh	920 gramas	67 minutos
3	15000 mAh	1380 gramas	91 minutos
4	20000 mAh	1840 gramas	57 minutos
5	25000 mAh	2300 gramas	-

Segundo os dados da tabela, ocorre uma diminuição na autonomia entre três e quatro baterias utilizadas. Logo, definiu-se que se utilizariam três baterias embarcadas no VANT. No teste com 5 baterias, a aeronave não decolou.

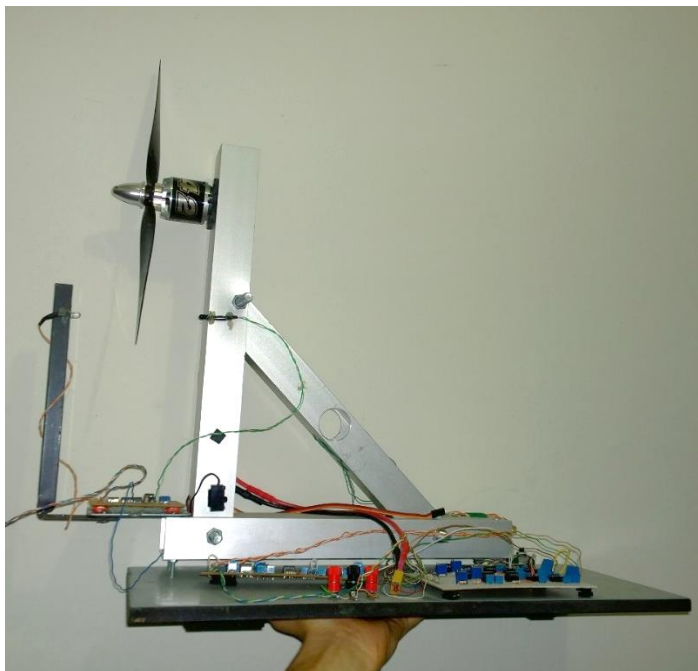
- **ESC**

Em motores com escovas, o controle da velocidade de rotação é feito através da variação de corrente provinda das baterias. No caso dos motores *brushless*, deve-se pensar em um circuito eletrônico capaz de fornecer tensão alternada trifásica ao motor, além de coordenar a sincronização das fases, controlando, pela frequência de operação, a velocidade do motor, como coloca Gabriel (2011). O *ESC (Electronic Speed Controller)* se vale de um micro controlador para variar a frequência de chaveamento da corrente entre as fases do motor utilizando *MOSFETS* e dessa forma variar a velocidade de rotação. Nos circuitos mais avançados, existe um canal de *feedback* que informa ao circuito a localização dos polos do motor para uma melhor sincronia. Os comandos de velocidade do motor são transmitidos via *PWM* para o micro controlador do *ESC*.

Atenta-se que o dimensionamento do *ESC* deve considerar que o circuito não pode funcionar como *circuit breaker*, isto é, caso o motor demande mais potência, o *ESC*, mesmo que tenha proteção contra surtos ativada, tende a superaquecer e até mesmo deixar de funcionar. Para tanto, o fabricante do motor recomenda que o *ESC* suporte uma corrente 50% maior que a corrente máxima projetada na aeronave.

No caso do PixForce One, desenvolveu-se um suporte para experimentos com os motores, mostrado na Figura 34 - Suporte com extensômetros para análise de empuxo., utilizando *strain gauges* que fornecem informações de torque através da deformação das estruturas de metal. Projetou-se, também, um sensor óptico para medir a rotação e corrente máxima de operação é medida através de um monitor de baterias conectado a um micro controlador.

Figura 34 - Suporte com extensômetros para análise de empuxo.



Fonte: Do autor (2016).

Através de testes com o motor e baterias selecionados, tanto a vazio quanto com diferentes hélices, constatou-se que a corrente máxima de operação é de 51.8A. Logo, espera-se que o *ESC* suporte aproximadamente 75 A. Selecionou-se o *ESC Turnigy Brushless 85*, mostrado na Figura 35, da marca *Turnigy*, com 85A. Após diversos testes em solo, cinco *ESCs* comprados, 20% das unidades, apresentaram superaquecimento e derretimento da proteção plástica. Após contato com o fabricante, constatou-se que eles pertenciam a um lote sem pasta térmica entre os *MOSFETS* e o dissipador. Negociou-se uma nova remessa de *ESCs* e a devolução do pagamento do lote com defeito.

Figura 35 - ESC fabricado pela empresa Turnigy.



Fonte: HobbyKing® (2016, imagem digital).

- **BEC**

O fornecimento de energia aos servomotores é feito através de tensão contínua. Para tanto, necessita-se de um conversor da tensão da bateria para a exigida pelos servomotores. O *BEC* (*Battery Eliminator Circuit*) é um regulador de tensão fixo e disponível comercialmente em diferentes tensões e correntes máximas de operação. O fabricante do *airframe* recomenda o uso de servomotores cuja corrente máxima de operação em pico somada, é 3.5 A. Logo, o *BEC* (8-26v) *SBE*, mostrado na Figura 36, da fabricante *Turnigy*, com corrente máxima de operação de 5 A, cumpre bem a função de alimentar os atuadores dos *elevons*.

Figura 36 - BEC utilizado no PixForce One.



Fonte: HobbyKing® (2016, imagem digital).

Durante um teste de campo, o avião perdeu potência no motor e, segundos depois, entrou em parafuso. O operador não obteve resposta das superfícies de controle e a perda do avião foi evitada pois o mesmo caiu em um açude. Após análise dos *logs* de voo, constatou-se que a tensão na bateria diminuiu drasticamente de forma quase instantânea e, após alguns segundos, chegou a zero. Especulou-se que uma das baterias havia se desconectado em voo e a tensão na outra seria insuficiente para manter o avião no ar. Essa teoria foi descartada pois a descarga das baterias deve ocorrer de forma igual, a menos que o ciclo de cargas seja bastante diferente, o que não era o caso, já que uma havia sido carregada 25 vezes e a outra 27 vezes. Após o retorno do time de campo, uma das baterias começou a inchar e notou-se defeito em uma das suas células. Naquele teste, testava-se a taxa de subida máxima do VANT e a corrente exigida era constantemente alta. Definiu-se, então, que o problema havia acontecido pois a bateria sofreu uma demanda muito alta, apresentou defeito em uma das células, que parou de funcionar, diminuindo a tensão, e, em seguida, danificou a outra bateria, que estava conectada em paralelo. Os servomotores, apesar de necessitarem uma tensão menor do que a do motor, pararam de funcionar após alguns segundos pois a bateria, que havia sido parcialmente danificada, foi totalmente inutilizada após o motor continuar demandando potência. Detectou-se que havia um problema de projeto grave no avião: em casa de falha em uma das células da bateria, o motor inutilizaria a bateria e impossibilitaria o planeio controlado pelos servomotores nos elevons do VANT.

Após contato com a *Turnigy*, fabricante tanto do *BEC* quanto do *ESC*, foi sugerido que se utiliza-se o *BEC* integrado do *ESC* de 85 A conectado em uma bateria exclusiva para os servomotores. Porém, isso adicionaria peso ao avião e comprometeria a autonomia. Esse *BEC* havia sido ignorado, pois após as falhas em testes de solo, não se confiou a alimentação dos servomotores a esse dispositivo.

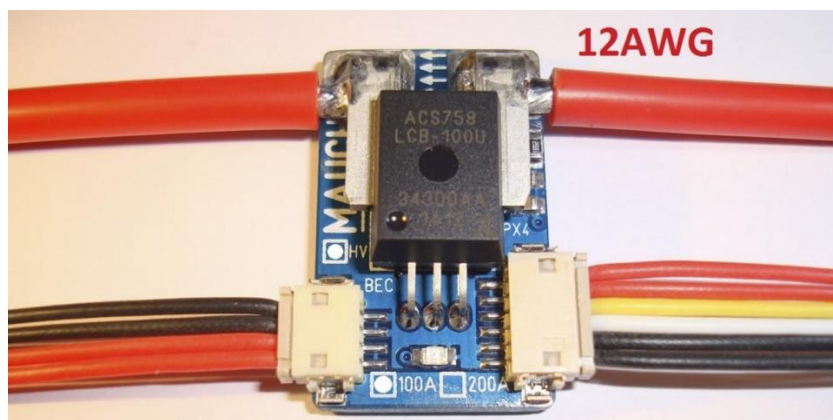
A solução foi encontrada foi reprogramar o micro controlador do *ESC* para que, em caso de diminuição súbita de energia, fosse cortada a alimentação do motor e fosse priorizada a atuação dos controles de asa e controlador de voo. Tal método mostrou-se eficiente e possibilitou planeio e pousos controlados mesmo em casos de falta de energia para o motor. Em um teste, o motor foi desligado devido a uma falha na bateria e apenas os servos foram alimentados. O avião estava à 5km de distância e 650 metros de altitude. Após perceber a queda na tensão, o controlador de voo

acionou imediatamente o modo *RTL* e o avião planou em segurança até um pouso controlado próximo do operador em solo.

- **Monitor de bateria.**

Um dos aspectos principais de segurança de operação é o monitoramento da energia restante na bateria, como coloca Bethke (2008). Para tanto, utilizou-se um módulo HS-100-HV, da empresa *MAUCH*, mostrado na Figura 37. Esse medidor possui um sensor de efeito Hall para medir a corrente demandada e pode ser montado em uma placa que fornece uma fonte de energia redundante para o controlador de voo. Deste modo, em caso de mal funcionamento das fontes primárias, os *logs* de voo continuam sendo registrados. Utilizou-se as conexões *ADC (Analog-to-Digital Converter)* do PixHawk para que as informações de tensão e corrente fossem utilizadas como parâmetros de decisão em caso de emergência, isto é, definiu-se níveis mínimos de energia na bateria para ativar o *fail\_safe\_vcc*. Contudo, a detecção automática de baixa energia não é suficiente e definiu-se um alarme em solo, que dispara sempre que a tensão diminuir mais de 0.5V em menos de cinco segundos. Isso porque, em diversos testes, uma das baterias havia sido mal fixada e, após uma curva, se deslocou, causando mal contato. O sistema de *fail\_safe* não foi alertado pois a tensão ainda estava acima do *threshold* permitido devido a bateria conectada, porém, a carga total real caiu em relação ao que o sistema estimou. Isso pode causar problemas em situações em que o avião está distante do ponto de pouso e o computador conta com uma carga inexistente para retornar, cabendo ao operador em solo identificar que uma queda brusca na tensão é, na maioria das vezes, causada pela desconexão da bateria.

Figura 37 - Monitor de bateria modelo HS100HV.



Fonte: MAUCH® (2016, imagem digital).

- **Hélices.**

Para dimensionamento da hélice, utiliza-se a recomendação do fabricante do motor e calcula-se o empuxo teórico a partir da combinação bateria-motor-hélice, como recomenda Merchant (2006) e Ost (2016). Além disso, realizaram-se testes em solo que revelaram o real valor do empuxo gerado, dessa forma, pode-se analisar se os sistemas estão gerando o empuxo mínimo recomendado pelo fabricante do *airframe*.

As hélices selecionadas para o *PixForce One* são da marca *Aeronaut*. Nesse caso, definiu-se a marca antes do tamanho pois esta é a única fabricante de hélices de fibra de carbono no estilo *folding*, isto é, não oferecem risco durante o pouso, pois podem ser dobradas como mostra a Figura 38. No caso de uma hélice fixa, existe a possibilidade de que as pás atinjam o solo, visto que a ponta da hélice fica abaixo do fundo do avião, parte que funciona como trem de pouso.



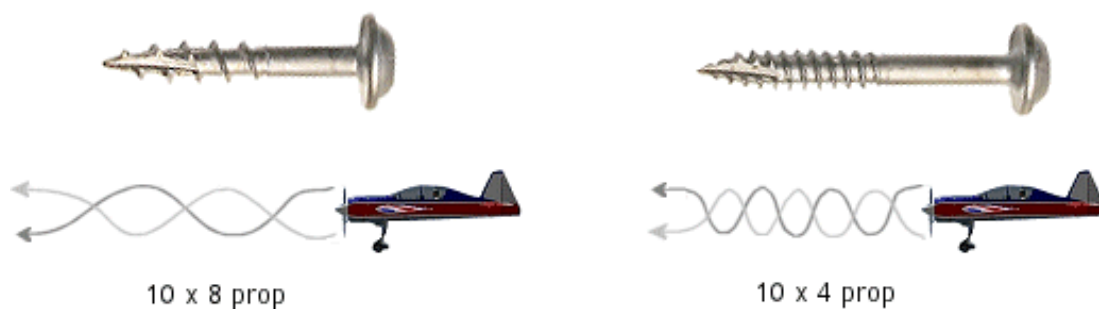
Figura 38 - Hélices dobráveis.



Fonte: AERONAUT (2016, imagem digital).

Hélices para aeronaves elétricas tem dois parâmetros principais: o tamanho da pá e a torção. Quanto maior o segundo, mais ar é empurrado em cada rotação, como mostra a Figura 39, porém maior é o torque exigido do motor.

Figura 39 - Deslocamento do ar em hélices com maior e menor torção, respectivamente.



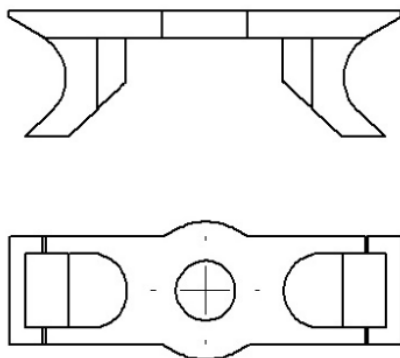
Fonte: RC Airplane World® (2016, imagem digital).

O fabricante do motor indica o uso de hélices de 12.5 polegadas e torção de 7.5°, porém, ainda é necessário verificar o empuxo gerado pela combinação. O fabricante da hélice indica que esse modelo gera 4,5kg de empuxo funcionando a

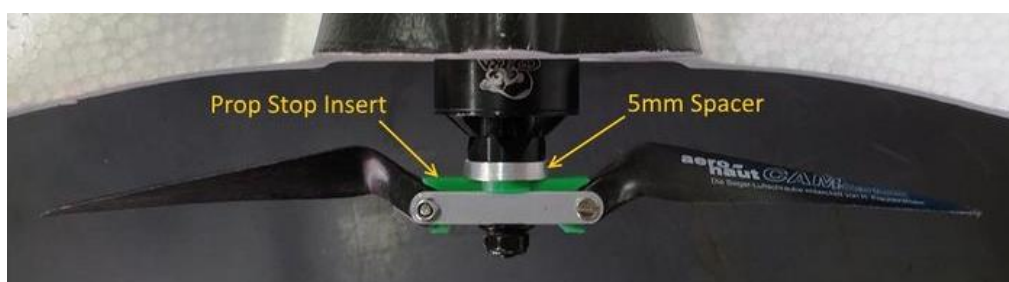
13000 RPM. Visto que o fabricante da fuselagem sugere, pelo menos, 4kg de empuxo, o sistema atende a todas as demandas, visto que o motor de 840KV alimentado por baterias de 4S, gera aproximadamente 12500 RPM. Em testes práticos, o empuxo máximo alcançado foi de 4,45 kg. Finalmente, a hélice escolhida foi o modelo *CAM Folding 12.5x7.5*, da marca *AERONAUT*.

Em testes de campo o modelo foi bem sucedido em relação a performance, porém, devido à capacidade de dobra da hélice, quando o avião desliga o motor no ar, por uma corrente quente ou rampa de descida, as pás podem se dobrar para dentro e não retornar quando o motor é religado. Isso pode causar que o motor gire em vazio, sobrecarregando o sistema de potência. O fabricante das hélices foi contatado e sugeriu que fosse cortado um cartão de crédito no formato de um adaptador. Dessa forma, as hélices nunca fecham completamente e quando o motor é religado, elas são reabertas. Para fins de velocidade na produção e garantia de que haveria simetria na peça (fundamental para conter vibrações no VANT), um acessório foi projetado em CAD 3D e impresso em impressora 3D.

Figura 40 - Adaptador contra o fechamento da hélice. Projeto (acima) e implementação (abaixo).



Fonte: Do autor (2016).



Fonte: AERONAUT® (2016, imagem digital).

## APÊNDICE F - RECURSOS DE SOLO

- **Modos de voo.**

O controlador de voo foi programado com uma série de parâmetros arranjados em configurações rápidas, isto é, selecionando apenas uma opção no controle de longo alcance ou computador, é possível alterar todas as configurações rota ou comportamento do avião. Alguns modos de voos são listados na

Tabela 9. Essas opções também podem ser acionadas pelos alarmes de *fail\_safe* do controlador.

Tabela 9 - Modos de voo pré-programados.

<b>MODO</b>	<b>FUNÇÃO</b>
RTL ( <i>Return To Launch</i> )	Retorna o avião para o ponto de decolagem, independente das condições de voo ou porcentagem do levantamento concluído.
AUTO	Transfere todos os controles ao computador de bordo. Tanto funções de estabilidade, quanto trajeto são decididas de forma autônoma baseados na missão programada pelo operador.
FBW ( <i>Fly by Wire</i> )	Permite ao operador controlar completamente o avião com o auxílio do controlador. Isto é, decide qual a melhor operação dos atuadores para executar os comandos desejados pelo operador.
Manual	Transmite todas os comandos do controle de emergência direto para o VANT sem assistência do controlador. Útil para testes em solo.
LOITER	Faz o VANT voar em círculos. Útil para quando há necessidade de alterar parâmetros do controlador em solo e não deseja-se pousar, logo faz-se a aeronave ao redor da antena de solo até os parâmetros serem carregados.

- **Acompanhamento dos parâmetros do controlador.**

Considerou-se, durante a especificação do sistema de telemetria, um rádio que permite tanto a leitura quanto escrita dos parâmetros de voo. Na aeronave desenvolvida, existem 325 parâmetros de todos os aspectos da aeronave, desde teto de operação até tempo de espera após o lançamento da aeronave para acionamento do motor (necessário pois o lançamento é manual e a mão do operador passa bastante perto da hélice). A antena de solo tem uma interface USB e a conexão é automática com a telemetria no VANT, desde que ambas possuam o mesmo parâmetro ID.

Todos os parâmetros do controlador *PID* podem ser modificados em solo, apesar de que definiu-se que, por medida de segurança, não se alteraria os parâmetros de forma drástica durante o voo da aeronave. Em uma situação extrema, o desenvolvedor alterou um parâmetro utilizando uma vírgula para marcar a casa decimal. O programa, que utiliza pontos, parou de funcionar e só voltou após o computador ter sido reiniciado. Enquanto isso, o VANT permaneceu voando em linha reta e só retornou quando entrou em modo *RTL* pela perda do sinal do rádio de emergência, 7km longe do local de decolagem. Modificou-se o *software* para filtrar os dados de entrada desse campo e evitar quebras, assim como programou-se o controlador de voo para entrar em modo *RTL* assim que o programa fosse fechado inesperadamente no computador.

- **Plano de voo.**

Definiu-se a necessidade de planejar a missão do VANT baseado na ordem de serviço. Usualmente os clientes da PixForce fornecem as áreas a serem mapeadas em um *shapefile*, arquivo de perímetro com coordenadas geográficas. Esse arquivo fornece os limites do levantamento e cabe ao *software* definir a trajetória real do VANT, processo descrito por Silva (2015).

Para projetar como a missão, foi necessário estudar como os algoritmos de fotogrametria lidam com as fotos após o levantamento e utilizou-se alguns parâmetros comuns a esses *softwares*, como descrito por Turner (2012).

- I) O *footprint* é o tamanho da área coberta em uma fotografia. Para o cálculo desse parâmetro, é necessário saber qual o ângulo de abertura da lente, a proporção da fotografia, e a altitude do VANT. Um modelo geométrico é mostrado na Figura 41. Sabendo-se a altura do triângulo e o ângulo  $\alpha$  de abertura, é possível calcular uma das dimensões do retângulo coberto em solo. Dessa forma é possível saber qual a precisão das imagens geradas em centímetros por pixel. Para tanto, basta saber a distância em um dos lados do retângulo em solo e compará-lo com o tamanho, em pixels, do sensor da câmera.

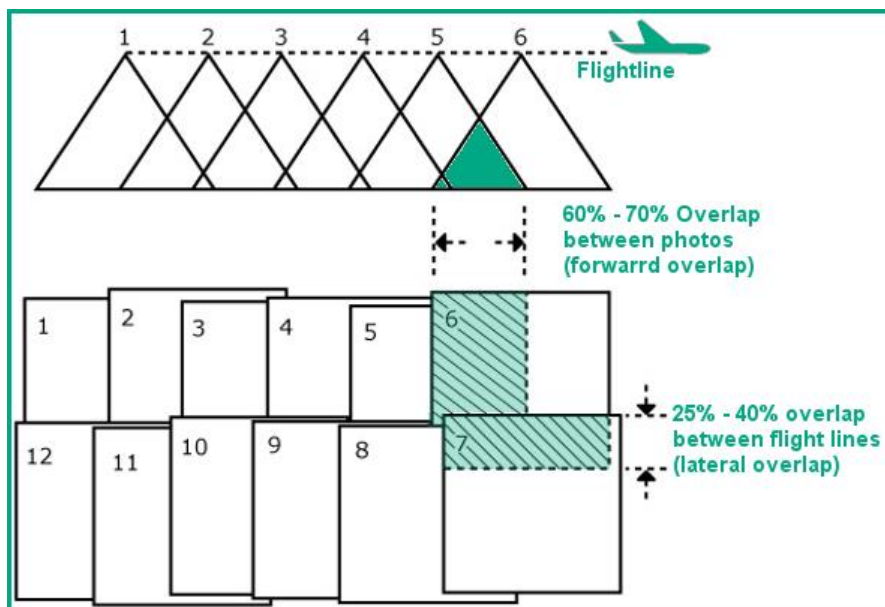
Figura 41 - A linha representa o *footprint*, em solo, da fotografia tirada pelo VANT.



Fonte: SenseFly® (2016, imagem digital).

- II) O *sidelap* e *overlap* são, respectivamente, a porcentagem da foto sobreposta lateralmente e o *overlap* é a porcentagem da foto que será sobreposto no sentido da trajetória do VANT. A Figura 42 ilustra os termos. Na prática, calcula-se o tempo entre disparos sabendo qual a distância desejada entre as fotos e compara-se com a velocidade da aeronave em relação ao solo.

Figura 42 - Sidelap e overlap, mostrados na área hachurada no quadrado 7 e 6, respectivamente.



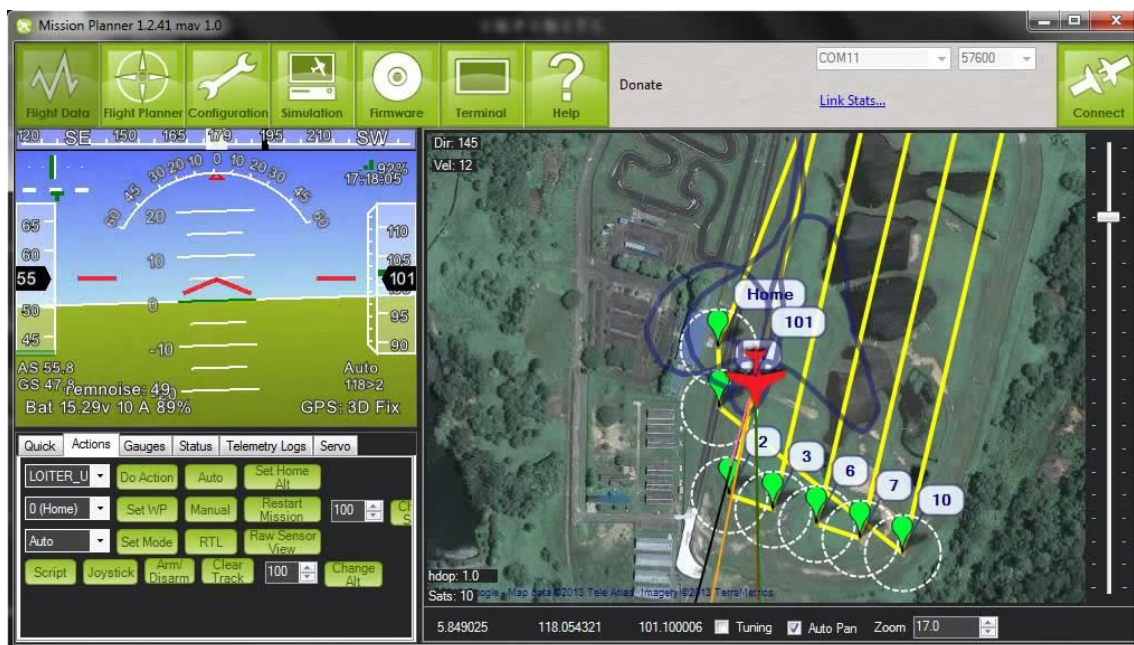
Fonte: GrindGIS (2016, imagem digital).

- III) Parâmetros do VANT, como **teto de operação, velocidade e autonomia** são considerados para traçar o trajeto, visto que é esperado que o *software* calcule uma opção realista para a aeronave em questão.

- **GCS.**

Um *software* de monitoramento com as características acima é chamado de *GCS (Ground Control Station)*. A escolha para uso na PixForce foi o *Mission Planner*, software de código aberto que atente às necessidades imediatas da empresa e ainda permite a personalização da interface e recursos. Algumas telas do *software* são mostradas nas Figura 43 e Figura 44.

Figura 43 - Tela de acompanhamento da missão.



Fonte: Do autor (2016).

Figura 44 - Tela de planejamento da missão.



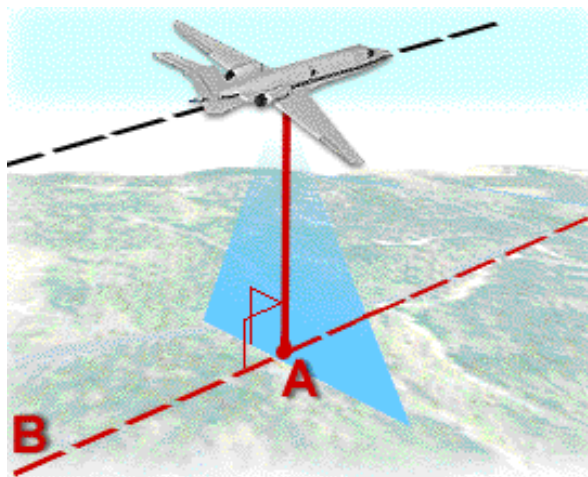
Fonte: Do autor (2016).

## APÊNDICE G - CRIAÇÃO DE ORTOMOSAICOS

A partir da análise da natureza da construção de uma asa voadora, que conta com apenas dois atuadores, é possível perceber que não há o *elevator*, atuador de cauda que existe em aviões comerciais, por exemplo. Não há como fazer curvas, ou compensar o vento, sem gerar um efeito de *roll* no avião, como discutido anteriormente. Ainda sim prefere-se esse modelo pela autonomia e preço de construção, porém, deve-se compreender que há implicações no resultado final.

Idealmente, o plano de todas as imagens geradas é perfeitamente perpendicular com a linha do horizonte, como mostra a Figura 45, e bastaria que as imagens passassem por um processo de junção para formarem mapas escalados de grandes áreas, como relata LePrince (2007). Contudo, essa situação ideal não se reproduz na realidade e a maioria das fotos têm inclinações em todos os eixos (*roll*, *pitch* e *yaw*), criando imagens, que, por vezes, durante ventos fortíssimos, retratam o céu e o horizonte em vez do solo, como na Figura 46. Dessa forma, é necessário corrigir cada imagem para que todas representem o mesmo plano do solo (LEPRINCE, 2007). A seguir são mostrados métodos de correção implementados comercialmente pela *PixForce* no início do ano de 2016. Antes disso, discute-se uma etapa anterior ao processo, o georeferenciamento.

Figura 45 - Situação ideal de captura.



Fonte: SkyViewSurvey® (2016, imagem digital).



Figura 46 - Foto do horizonte tirada durante o um levantamento em lavoura de soja.



Fonte: Do autor (2016).

- **Georeferenciamento.**

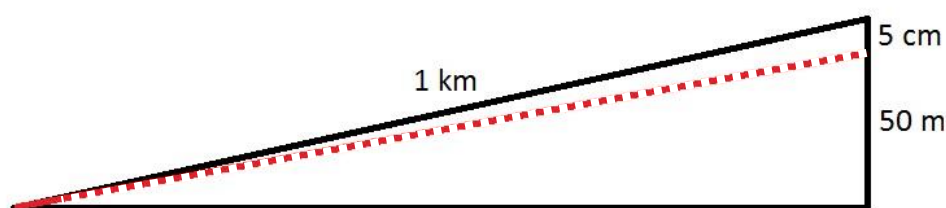
O controlador de voo do *PixForce One* armazena diversos dados de voo em sua memória, inclusive a posição do GPS e os comandos de disparo das câmeras. Isso permite que as imagens sejam geolocalizadas, isto é, saiba-se onde o centro delas estão localizados em coordenadas geográficas (latitude e longitude). Somado a isso, utiliza-se dados dos outros sensores, como o barômetro, para utilizar a altitude do VANT para, através de cálculos geométricos, expandir a inserção de coordenadas para toda a área da imagem.

Esse método é suficiente para várias aplicações na área florestal, onde é mais interessante obter dados de fatores que dependem pouco das coordenadas geográficas, como sobrevivência de talhões, por exemplo. Em um relatório de

sobrevivência, pouco importa se a planta está meio metro para a esquerda ou direita, sendo muito mais interessante à empresa saber se ela está viva ou morta. Os dados de GPS são usados, nesse caso, para estimar a posição da imagem, facilitando o processo de criação dos ortomosaicos.

Em outras aplicações contudo, exige-se um grau altíssimo de precisão, com erros na ordem de milímetros, como coloca Tampubolon (2012). Na área da mineração de metais preciosos, por exemplo, um erro de 5cm em uma rampa de 1km de extensão e 50 metros de altura, mostrada na Figura 47, representa um erro na ordem de 0.1% no volume total de material extraído. Em minérios de altos valores, esse é um erro inaceitável, visto que, na maioria das vezes, os levantamentos topográficos são utilizados para estimar o valor de uma mina em operações de venda ou compra.

Figura 47 - Rampa em uma mina.



Fonte: Do autor (2016).

Um método mais preciso de georeferenciar a imagem é através da utilização de *GCP (Ground Control Points)*. Distribui-se em solo marcas visíveis das fotos do VANT e registra-se com um GPS em solo as coordenadas e, posteriormente, no escritório, faz-se um cruzamento, utilizando um software *GIS*, das informações. Para aplicações de extrema precisão, utiliza-se um *GPS RTK (Real Time Kinematic)*, como o modelo *Hiper SRRTK*, da fabricante *Topcon*, mostrado na Figura 48 e utilizado pela *PixForce* em campo. Takasu (2009) coloca que um *GPS* normal funciona adquirindo dados de tempo de emissão de onda emitidos por satélites e comparando com o seu sistema. Contudo, o sinal pode chegar fraco ou com interferência causada pela viagem através das diferentes camadas da atmosfera. O *GPS RTK* utiliza o sinal da

onda portadora, muito mais potente, para estimar sua posição de forma muito mais precisa.

Figura 48 - GPS RTK.



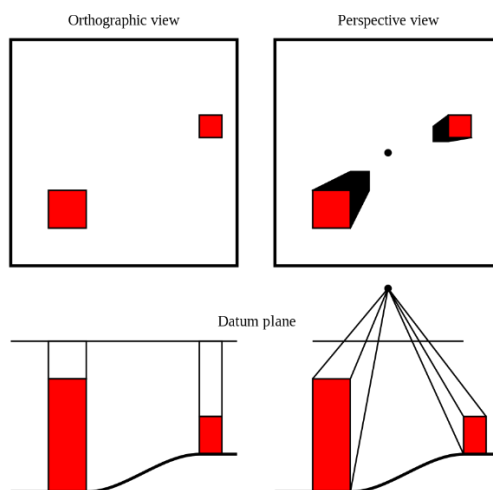
Fonte: Topcon® (2016, imagem digital).

- **Ortorretificação**

A imagem aérea, gerada em um VANT, acumula, além do problema do ângulo de disparo, já descrito, distorções causadas pelas lentes, um exemplo é a Figura 50, a esquerda (GURTNER, 2009). Para explicar-se esse fenômeno, imagina-se um ponto exatamente no centro da lente de uma câmera, apontando perfeitamente para baixo, que se encontra alta amarrada a um balão em repouso. Fotografa-se um prédio perfeitamente horizontal construído exatamente no respectivo ponto em solo. Independente da altura do prédio, a foto será tirada da cobertura e não das laterais. Caso esse prédio se encontre em outros pontos do solo, ou a câmera de desloque, uma parcela da lateral será representada e isso não é desejável para aplicações de mapeamento, onde o engenheiro está interessado apenas no plano perfeitamente horizontal, onde as distâncias são verossímeis com a realidade. A Figura 49 mostra, a direita, uma vista ortográfica ideal e, a direita, uma vista real distorcida. Uma forma teórica de contornar essa situação é ter um sensor perfeitamente estabilizado e do

tamanho da área que se quer fotografar. Visto que a PixForce trabalha com áreas (50 km) com dimensões  $10^5$  vezes maior que o tamanho dos sensores disponíveis no mercado (5 cm) e é da natureza aerodinâmica de um avião fazer movimentos para permanecer estável, recorre-se a um processo chamado de ortorretificação.

Figura 49 - Ortofoto (E) e imagem distorcida (D).



Fonte: AbovItAll® (2016, imagem digital).

Segundo LePrince (2007), a ortorretificação é uma correção geométrica das imagens através do uso de:

- I) Localização, posição e altitude da câmera - em aplicações de sensoriamento remoto com imagens obtidas via satélite, depende-se da disponibilidade de dados dos sensores e posicionamento do satélite para efetuar a ortorretificação, contudo no caso dos VANTs, isso é fornecido pelo controlador de voo.
- II) MDS (Modelo Digital da Superfície) ou MDT (Modelo Digital do Terreno) – os modelos digitais são representações, no primeiro caso, da altimetria da superfície (i.e. incluindo árvores, pedras e construções) e, no segundo caso, uma representação do terreno filtrando as imperfeições.

O primeiro passo é a geração da MDT, criada com o *software Photoscan*, da empresa russa *Agisoft*. Isso é feito através de *keypoints*<sup>23</sup> entre as imagens, encontrados por análise de semelhança. Achando-se os pontos em comum das fotografias, utiliza-se os dados de posicionamento para calcular a altimetria do terreno.

O processo matemático de ortorretificação apesar de basear-se em conceitos simples de geometria, são longos. Aqui, novamente utiliza-se os dados de posição para calcular correções. No final do processo, obtém-se uma imagem ortorretificada, como a da Figura 50, a direita.

Figura 50 - Imagem gerada por VANT (E) e ortofoto (D).



Fonte: SharpGIS® (2016, imagem digital).

- **Geração de mosaicos.**

Devido às limitações de altura do VANT, as missões são executadas em altitudes muito menores que os satélites, como consequência, há um número muito maior de imagens geradas. Seria impensável criar um relatório final baseado em milhares de fotos ortorretificadas, por motivos de praticidade. Uma alternativa, é a criação de mosaicos, imagens geradas a partir da união de todas as fotos de uma

---

<sup>23</sup> Pontos em comum.

missão, após passarem pelo processo de ortorretificação (LIU, 2011). A Figura 51 exemplifica o conceito de mosaico em uma área com 35 imagens.

Implementou-se o projeto *open-source OpenDroneMap*, um algoritmo que gera ortomosaicos, através do reconhecimento dos *keypoints* e união das ortofotos. O algoritmo funciona via linhas de comando no sistema operacional *Linux*. Porém, devido ao tempo levado para achar os pontos em comum, definiu-se que utilizar-se-ia máquinas remotas de altíssimo desempenho disponibilizadas pela empresa americana *DigitalOcean* para execução dos algoritmos. A Tabela 10 mostra as configurações da máquina utilizada.

Figura 51 - Ortofotos (E) e ortomosaico (D).



Fonte: Do autor (2016).

Tabela 10 - Máquina virtual para criação de ortomosaicos.

ITEM	VALOR
Memória RAM	224 GB
Número de núcleos	32
Disco	2 TB SSD

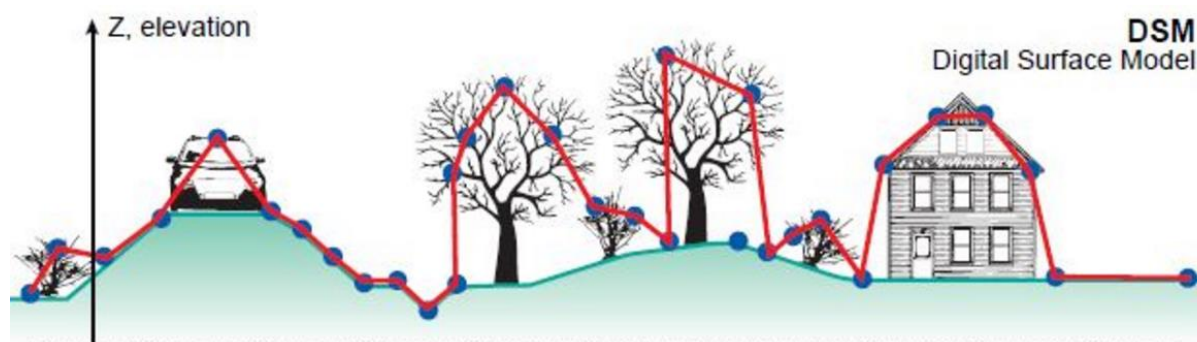
## APÊNDICE H - CRIAÇÃO DE DTMS

Em aplicações de mineração, além de extrema precisão no levantamento, exige-se, muitas vezes, que itens como construções, árvores e pedras não interessantes à extração sejam retiradas do modelo tridimensional do terreno, para que, dessa forma, seja executado um cálculo volumétrico mais condizente com a realidade (CHAI, 2004). Essa filtragem é chamada de *DTM*, do inglês *Digital Terrain Model* (Modelo Digital do Terreno) e é processado a partir de uma *DSM*, do inglês *Digital Surface Model*. Ambos conceitos são explicados em seguida.

- **DSM**

Uma *DSM* é o modelo exato da superfície mapeada pelo VANT gerado a partir de algoritmos discutidos anteriormente. São consideradas quaisquer relevos no terreno, contanto que sejam maiores que o tamanho mínimo de detecção do algoritmo (JÚNIOR, 2015). A Figura 52 ilustra o perfil de uma *DSM*.

Figura 52 - A linha vermelha representa a cota Z de uma *DSM*.



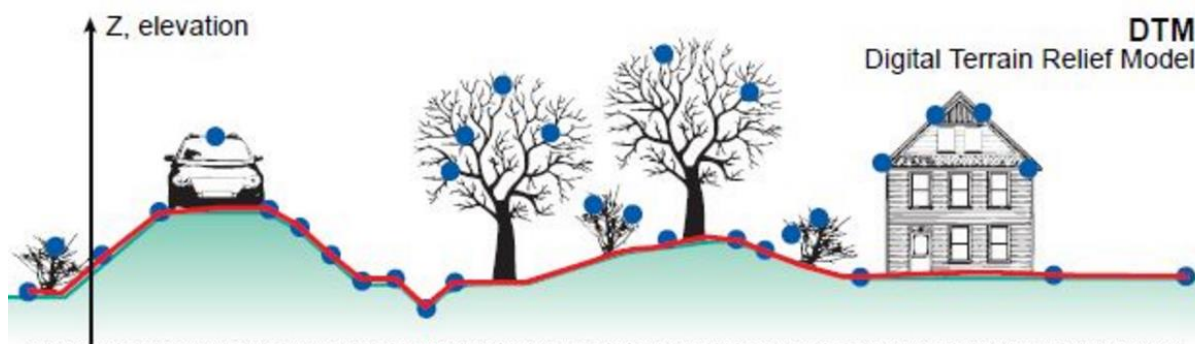
Fonte: (2016, imagem digital).

- **DTM**

Chai (2004) ainda coloca que a criação de uma *DTM* se dá através da aplicação de um ou mais filtros no modelo de superfície que variam de acordo com a aplicação final do relatório. Os processos descritos abaixo foram implementados utilizando as

ferramentas do *software open-source QGIS*. A Figura 53 ilustra o significado de uma DTM – a linha vermelha representa o perfil da DTM.

Figura 53 - A linha vermelha representa a cota Z de uma DTM.



Fonte: (2016, imagem digital).

- **Nuvens de Pontos**

Uma nuvem de pontos é um conjunto de coordenadas tridimensionais criadas a partir de algoritmos de processamento de imagem; uma discretização da altimetria do terreno (ROSNELL, 2012). Utiliza-se, nessa pesquisa, o software *Photoscan* e sua ferramenta de criação de nuvens de pontos. Não é possível relatar com precisão como o *software* lida com os dados, pois seu código é fechado, mas o processo de obtenção da altimetria de um terreno é feito, por outras ferramentas *open-source*, da seguinte forma:

- I) Detecta-se os *keypoints* entre as imagens – quanto maior for o número de imagens que representam um único ponto (ou seja, quanto maior o *sidelap* e *overlap* da missão), maior a precisão da estimativa da cota Z daquela coordenada;
- II) através dos dados do controlador de voo, identifica-se onde a câmera estava e para onde estava apontando;
- III) por um processo geométrico de identificação das intersecções das projeções das imagens, atribui-se uma cota Z para a coordenada.

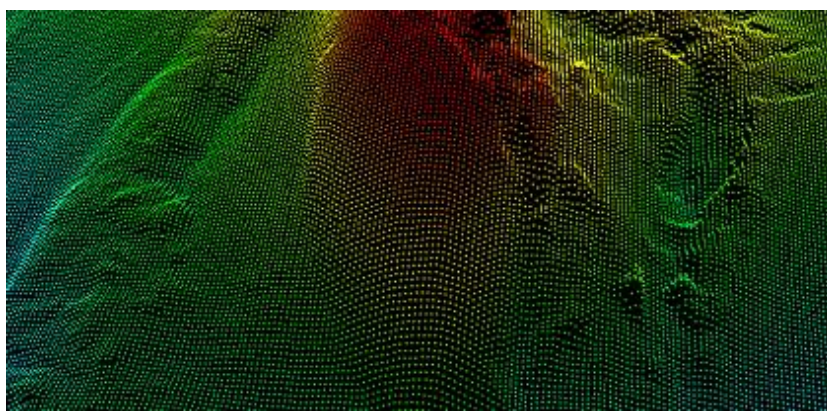


No contexto cartográfico, as nuvens de ponto representam o plano altimétrico do solo. E deseja-se obter, ao final desse processo, uma ortofoto da região e uma tabela das cotas Z. Esses dados são, em seguida, exportados para o QGIS.

A ão Z. O vermelho indica regiões mais altas e o verde, regiões mais baixas.

Figura 54 mostra um exemplo de nuvem de pontos colorida conforme sua dimensão Z. O vermelho indica regiões mais altas e o verde, regiões mais baixas.

Figura 54 - Nuvem de pontos de uma montanha.



Fonte: Do autor (2016).

- **Classificação e filtragem dos pontos.**

Após conhecida a altimetria do terreno, deve-se classificar os pontos entre pertencentes ao solo, ou não (SHAPOVALOV, 2010). Existem outros classificadores mais complexos, como classificadores de construções humanas, de espécies de árvores ou tipos de relevo, contudo, essa pesquisa abrange o primeiro contrato não remunerado<sup>24</sup> da PixForce: um filtro de relevo para minas de grafita no sul da Bahia.

Para tanto, desenvolveram-se os seguintes algoritmos classificadores utilizando o *software* QGIS:

- I) Filtro por ângulo máximo - define-se um ângulo máximo permitido para rampas. Isso exclui mudanças abruptas de altitude, frequentemente

---

<sup>24</sup> No início da inserção da empresa no mercado, fecharam-se contratos não remunerados de pesquisa.

causadas por elementos não minerais do terreno como árvores ou casas.

- II) Filtro por raio mínimo do objeto – define-se um raio mínimo para inclusão do objeto<sup>25</sup> na DTM e exclui-se todos os objetos menores que o limite. É útil para regiões com pedregulhos.
- III) Filtro por raio máximo – define-se um raio máximo para inclusão do objeto na DTM e exclui-se todos os objetos maiores que o limite. É útil para regiões com talhões de florestas uniformes, como exemplifica a Figura 55.

Figura 55 - Região de talhão de floresta. O pontilhado representa a ação do filtro por raio máximo.



Fonte: Do autor (2016).

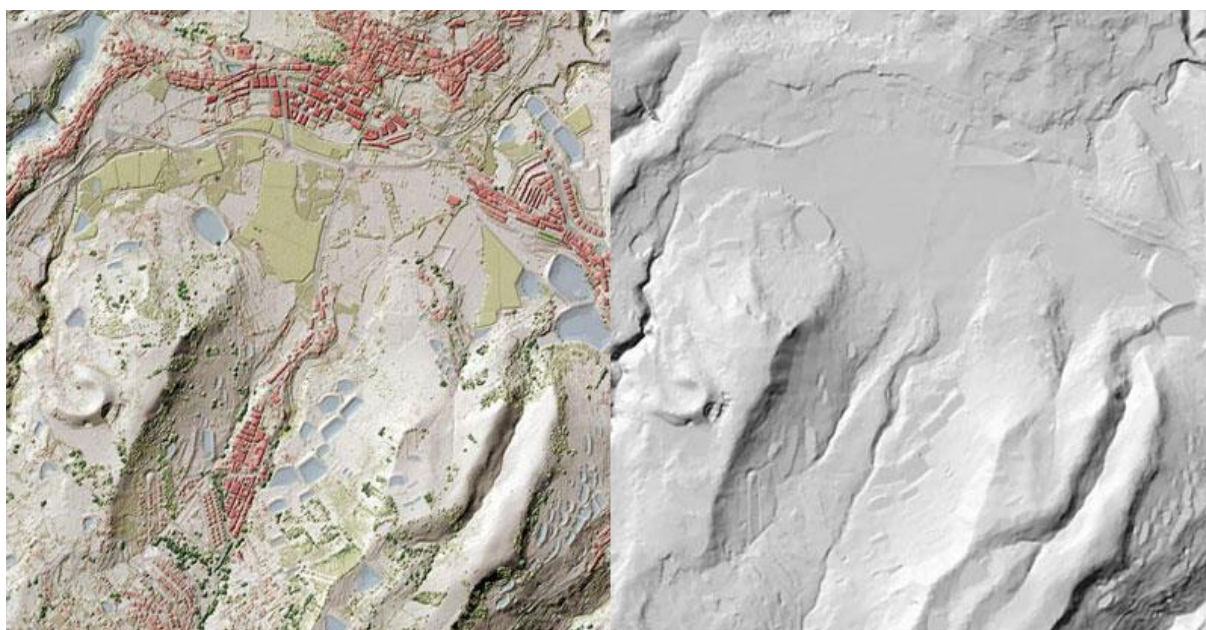
A Figura 56 mostra um exemplo de aplicação desse algoritmo. A direita, uma região com casas, em vermelho, e a esquerda a mesma região filtrada. Segundo avaliação do geólogo da empresa contratante, os filtros mostraram-se bastante precisos, contudo, o levantamento foi feito, na sua maioria, sem o uso de *GCP*. A região levantada, divisa entre Minas Gerais e Bahia é de difícil acesso e não era

---

<sup>25</sup> Entende-se por objeto, um conjunto de cotas Z com altitude diferente do terreno.

possível colocar marcações em solo ao longo de toda a área. Solicitou-se, então, para que uma empresa de geoassessoria fizesse o levantamento de coordenadas em pontos de referência, isto é, visíveis nas imagens do VANT (i.e. vértices de cercas, pedras e rios). Em seguida, utilizando-se o QGIS, atribui-se às coordenadas levantadas aos pontos nas imagens do VANT.

Figura 56 - DSM (E) e DTM (D).



Fonte: (2016, imagem digital).

## APÊNDICE I - ÍNDICES DE SOBREVIVÊNCIA EM FLORESTAS

Viani (2005) coloca que a legislação ambiental brasileira exige que empresas do setor florestal organizem suas plantações em áreas chamadas talhões, regiões com áreas reduzidas cujas plantas são todas clones. Isso acontece para diminuir o impacto ambiental na região da floresta, pois cada talhão tem uma época de plantio e colheita, evitando-se assim um impacto drástico na fauna e flora locais. Essa característica impede, na maioria das vezes, que imagens de satélite sejam usadas para monitorar plantações, pois o custo de uma fotografia se tornaria muito elevado para monitorar apenas um talhão. VANTs vêm sendo utilizados pelo mercado brasileiro, principalmente o de celulose e exige-se que as empresas prestadoras de serviço levantem, além das imagens, dados das florestas a um custo menor que o tradicional, feito por amostragem por técnicos em solo. A Figura 57 mostra um extrato de um talhão mapeado por um VANT.

Figura 57 - Extrato de um talhão de eucaliptos com 3 meses.



Fonte: Do autor (2016).

Usualmente, após a criação do ortomosaico, utiliza-se um processo de amostragem para estimar a quantidade de plantas vivas e mortas e, então, o índice de sobrevivência no talhão (DE PAULA NETO, 1981). Porém, esse processo gera um erro estatístico bastante grande devido a diversidade das regiões:

- I) Mato competição – plantas de pequeno porte no meio das plantações apresentam-se de forma bastante heterogênea.
- II) Efeito de fronteira com região desmatada – a produtividade é maior nas divisas com áreas desmatadas devido a maior insolação das plantas.
- III) Efeito de fronteira com floresta nativa – menor produtividade nas divisas com florestas nativas, devido a mato competição ou falta de manutenção devido ao difícil acesso.

Nesse contexto, objetivou-se desenvolver um algoritmo de censo completo automatizado em florestas, isto é, contar toda a planta e falha em um talhão para evitar erros de aproximações. Se bem sucedido, esse produto seria inédito no mercado de sensoriamento remoto mundial.

- **Objetivo.**

Criar um algoritmo automatizado<sup>26</sup> que detecte:

- I) Plantas vivas;
- II) linhas de plantio;
- III) falhas nas linhas de plantio.

- **Abordagem.**

---

<sup>26</sup> Nesse contexto, automatizado significa que as plantas seriam detectadas de forma automática, mesmo que calibrações manuais precisassem ser feitas.

Decidiu-se que utilizar-se-ia o software *MATLAB*, da empresa americana *MathWorks*, para desenvolvimento da primeira versão do algoritmo. Apesar de ser do conhecimento dos desenvolvedores que existem ferramentas mais robustas, em uma segunda-feira, foi proposto a PixForce que extraísse os índices de sobrevivência de três talhões diferentes, totalizando 155 hectares. O prazo de entrega foi de sete dias e o autor do texto, àquela altura, sabia utilizar ferramentas de processamento de imagem utilizando somente o software *MATLAB*. Além disso, o primeiro algoritmo foi baseado em projetos da disciplina de Sistemas de Controle e Instrumentação, rodando na mesma plataforma. No primeiro caso, o algoritmo base detectava o centro de uma bola branca em um fundo preto e, no segundo, um ponto de *LASER* vermelho era detectado em um anteparo.

Estipulou-se, então, que as etapas para abordar o problema seriam as seguintes:

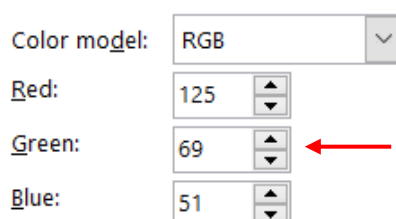
- I) Detecção de tudo que é verde no talhão, incluindo matocompetição.
- II) definição de objeto, isto é, características mínimas para considerar um conjunto de pontos como uma árvore.
- III) detecção das linhas de plantio;
- IV) exclusão dos objetos que estão entre as linhas de plantio;
- V) definir um raio de plantio para cada árvore – através dos dados fornecidos pela máquina plantadeira, é possível definir qual a distância média entre cada muda;
- VI) detecção de falhas - se, ao longo da linha de plantio, uma planta não está presente onde o raio de plantio estipula que ela esteja, define-se uma falha.

$$\text{VII) } \% \text{ Sobrevivência} = \frac{\text{PlantasVivas}}{\text{PlantasVivas} + \text{Falhas}} * 100$$

- **Implementação**

Utilizando-se funções nativas do *MATLAB*, extraiu-se o canal verde da imagem *RGB*. Idealmente, isso seria suficiente para detectar árvores, porém o solo, marrom, tem um grande componente no canal verde, como mostra a Figura 58. Contornou-se essa questão aplicando um filtro *threshold* no canal G, eliminando pontos com esses índices bastante elevados. O nível *threshold* é obtido utilizando-se o método de Otsu, que consiste em assumir que a imagem é formada de duas classes de pixels, nesse caso os verdes e os não verdes (JIANZHANG, 1991), (ZHANG, 2008) e. Calcula-se, então, um *threshold* ótimo que classifica todos os pixels de modo que a variância intra-classes seja mínima e a inter-classes seja máxima. Feito isso, a imagem está binarizada.

Figura 58 - Índices RGB da cor marrom.



Fonte: Do autor (2016).

O próximo passo é a detecção de objetos. Para tal, cria-se círculos em diversos pontos da imagem e soma-se o valor dos seus pixels (1 para verde, 0 para ausência de verde). Define-se um *threshold* mínimo a partir de informações de idade da planta, pois plantas mais novas são menores e exigem um limite menor, enquanto plantas adultas são compostas por mais pixels verdes. Detectam-se, então, as linhas de plantio através uma série de algoritmos que estimam a posição da linha baseando-se na posição das árvores.

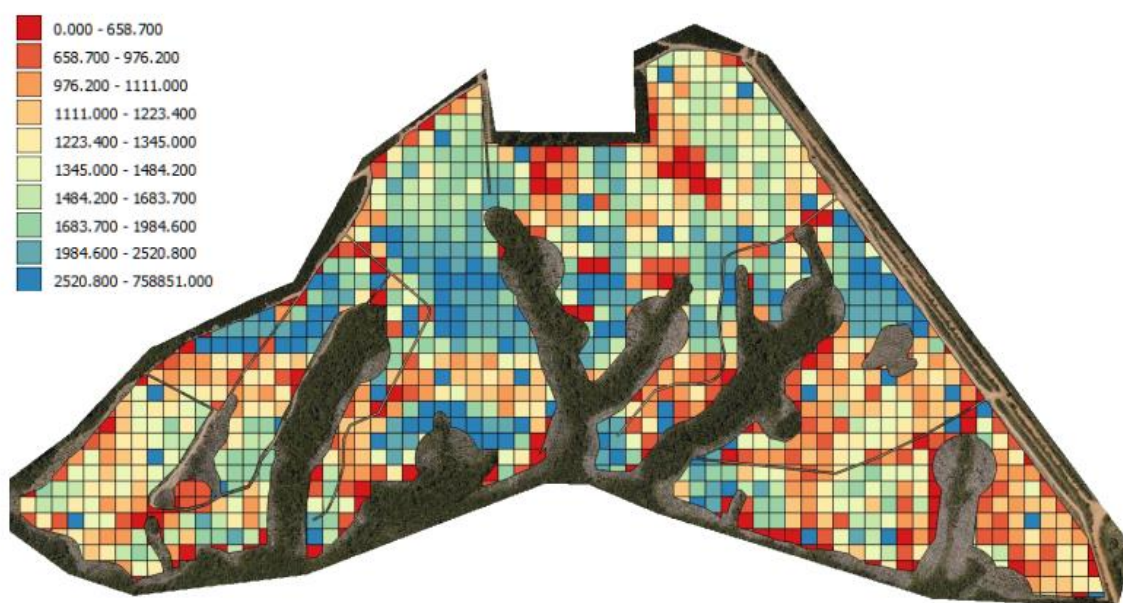
Em seguida, todos os objetos que estão entre as linhas são excluídos, isso elimina a maior parte da matocompetição. O restante é eliminado através de um algoritmo classificatório que conhece o espaçamento das árvores e elimina tudo o que estiver entre ela. Parte-se, então, para a detecção de falhas, onde percorre-se as

linhas de plantio e verifica-se se a cada intervalo de plantio existe uma planta. Em caso negativo, atribui-se uma falha.

Gera-se então, uma matriz com as coordenadas das plantas vivas e outra com as coordenadas das ausências. Utilizando-se o *software QGIS*, as estatísticas do talhão são calculadas e um arquivo do tipo *shapefile* é exportado com os pontos com árvores e os pontos com falhas. Na maioria das vezes, é mais interessante ao cliente obter informações por regiões nos talhões, em vez de pontos isolados. Nesse caso, divide-se a imagem em um *grid* e define-se o nível de sobrevivência por quadrado, assim, pode-se elencar as áreas onde a atuação é mais necessária.

O algoritmo desenvolvido alcançou resultados com precisão de 97,8%, quando comparado a conferência manual. O tempo de processamento foi de 18 horas de trabalho por 100 hectares de floresta. A Figura 59 mostra um talhão com indicação dos índices de sobrevivência: o vermelho mostra áreas com maior índice de plantas mortas e o azul, onde existe maior densidade de plantas. A Tabela 11 - Índice de sobrevivência no talhão da Figura 59. mostra a contagem de plantas e a porcentagem de plantas vivas e mortas do talhão da Figura 59.

Figura 59 - Resultado discretizado.



Fonte: Do autor (2016).



Tabela 11 - Índice de sobrevivência no talhão da Figura 59.

<b>Talhão</b>	<b>Plantas</b>	<b>Falhas</b>	<b>Vivas (%)</b>	<b>Mortas (%)</b>
<b>313</b>	38131	604	98,44	1,56
<b>311</b>	356600	7658	97,90	2,10
<b>Total</b>	<b>394731</b>	<b>8262</b>	<b>98,17</b>	<b>1,83</b>