



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS DE FLORIANÓPOLIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS DE FLORIANÓPOLIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Michael Wesley Batista Machado

**Sistema estéreo embarcado em RPAS aplicado a fotogrametria para medição de cenas
não preparadas**

Florianópolis

2021

Michael Wesley Batista Machado

**Sistema estéreo embarcado em RPAS aplicado a fotogrametria para medição de cenas
não preparadas**

Florianópolis
2021

Michael Wesley Batista Machado

**Sistema estéreo embarcado em RPAS aplicado a fotogrametria para medição de cenas
não preparadas**

Dissertação submetida ao Programa de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina
para a obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica.

Orientador: Prof. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto,
Dr. Eng.

Coorientador: Pedro de Deus Vieira Buschinelli, Dr.
Eng.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Machado, Michael

Sistema estéreo embarcado em RPAS aplicado a
fotogrametria para medição de cenas não preparadas /
Michael Machado ; orientador, Prof. Tiago Loureiro Figaro
da Costa Pinto, coorientador, Pedro de Deus Vieira
Buschinelli, 2021.

123 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 3. Reconstrução 3D. 4. Sistema
estéreo. 5. RPAS. I. Loureiro Figaro da Costa Pinto, Prof.
Tiago. II. de Deus Vieira Buschinelli, Pedro. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós
Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Michael Wesley Batista Machado

Sistema estéreo embarcado em RPAS aplicado a fotogrametria para medição de cenas não preparadas

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Marco Antônio Martins Cavaco Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Leandro Buss Becker, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Prof. Paulo de Tarso Rocha de Mendonça, Dr. Eng.
Coordenador do Programa

Prof. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, Dr. Eng.
Orientador(a)

Florianópolis, 12 de julho de 2021.

Este trabalho é dedicado em primeiro lugar a Deus, a minha
família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus.

A minha família, em especial a mãe Valdete Batista e minha namorada Shaiene Antunes, por todo o apoio durante o processo.

Ao professor Tiago Loureiro e ao Pedro Buschinelli, pela paciência, e por todo conhecimento repassado na orientação deste trabalho.

Aos membros da banca, pela disponibilidade em participar desta etapa e pelas contribuições que serão muito importantes.

À equipe do Labmetro, pelo espaço e recursos cedidos durante a realização do trabalho.

À fundação CERTI, pelos equipamentos e recursos disponibilizados.

A toda a equipe do projeto VANT3D, em especial ao Patrick, Guilherme, José, Moacir, Luís, Diogo e Daniel por todo o auxílio nas realizações dos experimentos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

Na exploração de petróleo e gás *offshore*, a conexão entre as estruturas em solo marinho e a plataforma pode ser realizada por *risers* flexíveis. Estes são dutos com características especiais e compostos por diversas camadas. Esses componentes operam em condições ambientais e operacionais extremas sendo necessária sua inspeção periódica, incluindo inspeções de sua superfície externa, que tradicionalmente é realizada por escaladores industriais na região emersa. Recentemente, estão sendo utilizadas técnicas de inspeção visual remotas com auxílio de câmeras e veículos *Remotely Piloted Aircraft System* (RPAS), popularmente conhecidos como drones, foram realizados e existe um esforço para desenvolvimento de técnicas ópticas de medição 3D para a realização de inspeção dimensional destes *risers*. A técnica de medição fotogramétrica pode ser utilizada para inspeção industrial, onde a cena a ser medida é preparada com escalas de comprimento conhecido possibilitando definir a escala nas medições. Devido a impossibilidade de preparar as cenas na inspeção *offshore*, a posição e orientação da câmera portada pelo RPAS pode ser utilizada para definir a escala das medições de forma indireta, que reduz a qualidade das medições. Com o objetivo de realizar a inspeção dimensional de forma remota utilizando um RPAS e melhorar a definição da escala das medições foi desenvolvido e integrado um sistema de visão estéreo onde a distância entre as duas câmeras do sistema (baseline) é utilizado como referência de escala para as medições. A solução proposta é analisada em comparação com a técnica fotogramétrica com as informações de posição e orientação fornecidas pelo sistema de navegação do RPAS com base no sistema GNSS ou RTK. A análise metrológica do sistema é baseada na medição de corpos de prova e artefatos calibrados. Os resultados experimentais apontam a viabilidade de se utilizar um sistema estéreo embarcado em RPAS para inspeção quantitativa fotogramétrica com definição de escala em locais de difícil acesso, como plataformas de extração *offshore*.

Palavras-chave: Fotogrametria, Sistema estéreo, Escala em malha 3D, Fotogrametria de curta distância, RPAS.

ABSTRACT

In offshore oil and gas exploration, a connection between the structures on the seabed and the platform can be made by flexible risers. These are ducts with special characteristics and composed of several layers. These components operate under extreme environmental and operational conditions, requiring periodic circulation, including inspections of their external surface, traditionally carried out by industrial climbers in the emerged region. Recently, the first tests of remote visual visit using the Remote Piloted Aircraft System (RPAS), popularly known as drones, were carried out and there is an effort to develop optical 3D survey techniques for the realization of the dimensional realization of these risers. The photogrammetric measurement technique can be used to supply industrial, where the scene to be measured is prepared with scales of known length, making it possible to define the scale in the chosen ones. It obtains the impossibility of preparing the scenes in the offshore passage, the position and orientation of the camera carried by the RPAS can be used to define the scale of the options indirectly, with significant loss in the quality of the included ones. In order to perform a dimensional navigation remotely using an RPAS and improve a definition of the scale of the categories, a stereo vision system was developed and integrated where the distance between the two cameras of the system (baseline) is used as a scale reference for how the proposed solution is analyzed in comparison with a photogrammetric technique with the position and orientation information provided by the RPAS navigation system based on the GNSS or RTK system. A metrological analysis of the system is based on calibrated specimens and artifacts. The experimental results point to the feasibility of using a stereo system embedded in RPAS to perform the photogrammetric quantitative with definition of a local scale that is difficult to access, such as offshore extraction platforms.

Keywords: Photogrammetry. Stereo System. 3D mesh scale. Close range photogrammetry. RPAS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de inspeção externa em bancada de <i>risers</i> no costado de uma plataforma do tipo FPSO com a técnica de escalada industrial.....	16
Figura 2 – Estruturas utilizadas na extração de Petróleo.....	20
Figura 3 – (a) exemplo de unidade flutuante de produção. (b) exemplo de plataforma fixa.....	21
Figura 4 – Ilustração das regiões dos dutos utilizados em plataformas de extração <i>offshore</i>	22
Figura 5 – Detalhe das estruturas internas de um <i>riser</i>	22
Figura 6 – (a) colapso da carcaça; (b) torção ocasionada por rompimento de arame; (c) aumento da seção do riser.....	24
Figura 7 – Tipos de inspeção adotados nas diversas zonas em <i>riser</i>	24
Figura 8 - Técnicas, sensores e plataformas disponíveis para fins de medição 3D, de acordo com as dimensões e complexidade da cena.....	27
Figura 9 - Segmentos do sistema de posicionamento global GNSS.....	27
Figura 10 – Configuração básica de um sistema RTK.....	28
Figura 11 – Exemplo de orientação de um RPA em função das rotações <i>roll</i> , <i>pitch</i> e <i>yaw</i> , relacionados ao sistema de coordenadas do RPA (X_i , Y_i , Z_i), e ao sistema de coordenadas global.....	29
Figura 12 – RPA e local de medição.....	30
Figura 13 – RPAS utilizado e trajetória performada durante a inspeção.....	31
Figura 14 – RPAS realizando inspeção em fachada de edifício e câmera utilizada. .	31
Figura 15 – <i>Zenmuse P1</i>	32
Figura 16 – Exemplos de aplicações de sistema estéreo em RPAS.....	32
Figura 17 – Montagem do sistema e caminho realizado para inspeção.....	33
Figura 18 – Princípio de triangulação para fotogrametria.....	34
Figura 19 – Relação entre ângulo de aquisição das imagens e região de incerteza de triangulação de um ponto.....	36
Figura 20 - Configurações para o procedimento de aquisição de imagens para reconstrução fotogramétrica.....	36
Figura 21 - Exemplo de poses para aquisições ideais para fotogrametria.....	37

Figura 22 - Exemplo de modo de aquisição de imagens, onde as seções com diferentes cores representam as imagens sobreposta pela seguinte e a área comum entre elas.	37
Figura 23 – Projeção de pixels vizinhos na cena representando a resolução espacial.	38
Figura 24 – Exemplo de distorção gerada por um sensor tipo <i>rolling shutter</i>	39
Figura 25 – Ilustração da forma de gravação dos sensores.	39
Figura 26 – Modelo computacional da câmera <i>pinhole</i>	40
Figura 27 - Exemplo de um padrão de calibração 2D visualizado pela câmera.	41
Figura 28 – Conceito de posição e orientação de imagens através de triangulação e georreferenciadas.	43
Figura 29 – Exemplo de aquisições de ângulos diferentes da mesma cena, onde é possível visualizar diferentes texturas, superfície reflexiva e superfície monótona.	44
Figura 30 – Exemplo de regiões correspondentes extraídos através de detectores.	45
Figura 31 – Exemplos de alvos utilizados na fotogrametria	46
Figura 32 – Exemplo de objetos com tamanhos diferentes fotografados de distância distintas resultam em imagens muito próxima uma da outra.	46
Figura 33 – Exemplo de escalas que utilizam alvos codificados.	47
Figura 34 – Sistema de medição estéreo com projeção de franjas GOM Atos Scan Box.	48
Figura 35 – Relações de um sistema estéreo contendo: parâmetros intrínsecos, extrínsecos e geometria epipolar.	50
Figura 36 – Exemplo de duas técnicas de triangulação: ponto médio a esquerda e correção ótima a direita.	51
Figura 37 – SV3D e computador embarcado montado no RPA.	54
Figura 38 – Diagrama de comunicação entre as câmeras, o computador embarcado e o tablet.	55
Figura 39 – Conjunto RPAS e controle utilizado nos experimentos.	56
Figura 40 - RPAS DJI M210 RTK v2 com o sistema estéreo acoplado, composto por: haste, suportes, câmeras, lentes e computador de bordo DJI <i>Manifold 2</i>	57
Figura 41 – Detalhes do projeto mecânico do suporte do sistema estéreo e da câmera.	58
Figura 42 – Vista superior da configuração de câmeras do sistema estéreo.	58
Figura 43 - Uma das aquisições do padrão 2D tipo xadrez durante a calibração.	59

Figura 44 - Posições calculadas do padrão após a calibração.	60
Figura 45 – Fluxo de dados na comunicação entre RPA e SV3D, MF2G e Estação de processamento off-line.	61
Figura 46 – Esquema de portas da comunicação entre o MF2G e o M 210 V2.....	62
Figura 47 – Escala composta por dois alvos codificados e perfil de alumínio.	65
Figura 48 – Da esquerda para a direita, guia linear com o laser interferométrico montado e escala sendo calibrada, resultado de uma das calibrações e câmera visualizando o centro do alvo.	66
Figura 49 – Padrão de calibração contendo 19 x 14 divisões com lado nominal de 25 mm.....	67
Figura 50 – Simulacro de <i>riser</i> . Na sequência: foto, malha 3D com textura, artefato piramidal e região dos defeitos artificiais da malha adquirida com o Gom Atos.....	68
Figura 51 – Padrão de avaliação construído em forma de pirâmide com 4 esferas. ..	68
Figura 52 – Distância máxima de busca ao redor do ponto.	71
Figura 53 - Exemplo do processo de avaliação dos resultados de medição.....	71
Figura 54 – Resultado de medição com o sistema proposto.	73
Figura 55 - Nuvem de pontos e postura das imagens da cena reconstruída.....	74
Figura 56 – Mapa de distorção radial e tangencial e completo para a câmera.....	76
Figura 57 - Histograma de frequência do erro de reprojeção (em pixel) da calibração das câmeras do SV3D.....	77
Figura 58 - Posições calculadas do padrão após a calibração.	77
Figura 59 – Montagem e testes do SV3D em laboratório.	78
Figura 60 – Fluxograma dos processos realizados para avaliações.	79
Figura 61 – Mapas de desvios das medições realizadas com o SV3D com a definição da escala de duas maneiras diferentes, onde: (a) escalas na cena e (b) escala definida pelo baseline do sistema estéreo.....	80
Figura 62 – Comparação do resultado de medição entre a medição através das barras de escala e o método proposto definindo a escala através do <i>baseline</i>	80
Figura 63 – Trajetórias de aquisição realizadas.	82
Figura 64 – Na sequência, os resultados do mapa de desvios de superfícies.....	82
Figura 65 – Nuvem de pontos do artefato piramidal e resultado das avaliações de PE e SSE	83

Figura 66 - Principais fontes de erros de um sistema de medição por fotogrametria através de RPAS.	85
Figura 67 – Fluxograma de dados GNSS e RTK. Os dados de posição e orientação através do RTK são disponibilizados no EXIF da imagem. Os dados de posição do GNSS e o offset para a câmera são extraídos do LOG de voo combinados gerando a postura pelo GNSS que por sua vez pode ser comparada com a postura fornecida pelo RTK.	89
Figura 68 – Posição indica pela RPA com a aeronave estática em solo.	90
Figura 69 - RPAS com SV3D durante ensaio. A cena de interesse inclui: simulacro de <i>riser</i> , padrão de esferas com escalas e padrão 2D para calibração de câmera.	91
Figura 70 – Fluxograma do processo de medição e avaliação da cena.	92
Figura 71 – Desvio padrão do <i>probing error</i> (PE) no artefato de esferas.	92
Figura 72 – Erro de espaçamento entre as esferas para os seis pares do artefato piramidal.	93
Figura 73 – Mapa de desvios entre a medição realizada com informações do (a) GNSS, (b) RTK, (c) Baseline, (d) barras de escala e a malha de referência.	94
Figura 74 – Mapa de desvios entre a medição realizada com informações do (a) GNSS, (b) RTK, (c) Baseline, (d) Barras de escala e a malha de referência.	94
Figura 75 – Avaliação do erro de escala em comparação dos respectivos processamentos e o valor de referência.	96
Figura 76 – RPAS realizando o voo para aquisição e cena montada para medição.	97
Figura 77 – Erro de espaçamento entre as esferas da medição realizada com o conjunto X5S e lente de 45mm.	97
Figura 78 – Padrão de calibração de câmeras do tipo tabuleiro de xadrez (SCP).	115
Figura 79 - SCC determinado através da calibração do sistema estéreo SV3D.	116
Figura 80 - Relação entre sistemas de coordenadas.	116
Figura 81 – Relação de SC da X5S para a Câmera esquerda.	118
Figura 82 – Relação de SC da X5S para a Câmera esquerda.	118
Figura 83 – Relação de SC da X5S para a Câmera esquerda.	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações do DJI Manifold 2-G.	62
Tabela 2 – Especificações do computador para processamento.....	64
Tabela 3 – Resultado calibração das escalas contendo média e desvio padrão da medição. Dados em mm.	66
Tabela 4 - Distância entre esferas.....	69
Tabela 5 - Comprimento das Barra de escala.....	69
Tabela 6 – Parâmetros intrínsecos das câmeras e de distorção da lente obtidos na calibração.....	75
Tabela 7 – Relação estéreo – Matriz de transformação do sistema de coordenadas da câmera esquerda para a câmera direita.	75
Tabela 8 – Erro de espaçamento entre as esferas (escala inserida pelo <i>baseline</i>).	84
Tabela 9 – Erro de espaçamento entre as esferas (escalas em cena).	84
Tabela 10 – Resultados das avaliações das escalas em cena reconstruída pelo SV3D.	86
Tabela 11 – Balanço de incerteza do sistema proposto.....	88
Tabela 12 – Média do erro de posicionamento da câmera (mm). Onde os eixos X, Y e Z correspondem respectivamente a: Longitude, Latitude e Altitude.....	95
Tabela 13 – Compilação dos resultados apresentados. Onde: \sphericalangle artefato piramidal; ξ região com defeitos artificiais.....	99
Tabela 14 - Características principais da câmera <i>Blackfly</i> BFS-U3-123S6C-C.	123
Tabela 15 - Características principais da lente Xenon Topaz 2.0/50 Ruggedized. ...	124
Tabela 16 - Características principais da câmera DJI Zenmuse X5S.....	124
Tabela 17 - Características principais da lente Olympus M.Zuiko Digital.	125

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

SCC - Sistema de coordenadas da câmera

VANT3D - Projeto de pesquisa para medição tridimensional de *risers* em estruturas *offshore* com a utilização de Veículo aéreo não tripulado

SV3D - Sistema de visão estéreo para medição 3D

P&D - Pesquisa e desenvolvimento

DECEA - Departamento de controle do espaço aéreo

ZVM - Zona de variação da maré

PDIF - Planos de inspeção para dutos flexíveis

ATM - *Air traffic Management*

GCP - *Ground Control Points*

MF2G - *DJI Manifold 2-G*

Payload – Carga útil

SUMÁRIO

1 Introdução	15
1.1 Contextualização	16
1.2 Motivação	17
1.3 Objetivo Geral	18
1.4 Objetivos Específicos	18
1.5 Estrutura do documento	19
2 Revisão bibliográfica	20
2.1 Exploração <i>offshore</i> de petróleo e gás	20
2.2 <i>Risers</i> 21	
2.2.1 Aplicação e classificação	23
2.2.2 Defeitos apresentados na seção externa em <i>risers</i>	23
2.2.3 Inspeção de <i>risers</i> na região do PDIF/R-4	24
2.3 <i>Veículos aéreos não tripulados</i>	26
2.3.1 <i>Global Navigation Satellite System</i> (GNSS)	27
2.3.2 <i>Real Time Kinematic</i> (RTK).....	28
2.3.3 Sistema de navegação inercial	29
2.4 Medições fotogramétricas com a utilização de RPAS.....	30
2.5 Câmera específica para fotogrametria	31
2.6 Visão estéreo embarcada em RPAS	32
2.7 Fotogrametria	33
2.7.1 Fotogrametria de curta distância.....	34
2.7.2 Aquisição das imagens	35
2.7.3 Modelo de câmera <i>pinhole</i>	39
2.7.4 Calibração de câmera <i>pinhole</i> e distorções	41
2.7.5 Identificação de pontos correspondentes	43
2.7.6 Triangulação entre pontos (<i>bundle adjustment</i>) e alinhamento das imagens	48
2.7.7 Visão estéreo	49
2.7.8 Reconstrução de superfícies	52
3 Descrição do sistema de medição proposto	53
3.1 Aplicação proposta	53
3.2 Funções a serem atendidas pelo sistema.....	53
3.3 Características metrológicas	53
3.4 Materiais e métodos.....	55
3.5 Aeronave utilizada.....	55
3.6 Sistema de visão estéreo para medição 3D (SV3D)	56
3.6.1 Calibração de câmeras do SV3D	58
3.6.2 Calibração entre o SV3D e o RPAS	59
3.7 Comunicação entre o RPAS e o SV3D	60
3.7.1 <i>DJI Manifold 2-G</i>	62
3.7.2 <i>Robot operating system</i> (ROS).....	63
3.8 Software e hardware	63
3.8.1 Software e hardware de processamento fotogramétrico.....	64

3.8.2 Comandos para parametrização através do SV3D	64
3.9 Elementos utilizados para aplicação de escala	65
3.10 Padrões e corpos de prova	66
3.10.1 Padrão de calibração da câmera.....	67
3.10.2 Simulacro de <i>riser</i> com defeitos artificiais.....	67
3.10.3 Estrutura piramidal com três esferas	68
3.11 Comparação entre superfícies.....	70
4 Validação experimental.....	73
4.1 Calibração das câmeras	74
4.2 Aquisição com SV3D em laboratório.....	78
4.3 Avaliação da configuração de aquisição	81
4.4 Avaliação metrológica com base no guia VDI/VDE 2634	83
4.5 Avaliação da incerteza do sistema.....	85
4.5.1 Componentes sistemáticas.....	86
4.5.2 Componentes aleatórias.....	87
4.5.3 Balanço de incertezas	87
4.6 Erro de posicionamento com o RPAS estático.....	88
4.7 Comparação entre métodos convencionais e o sistema proposto.....	90
4.7.1 <i>Probing error</i>	92
4.7.2 Erro de espaçamento entre as esferas (SSE).....	93
4.7.3 Comparação entre superfícies.....	93
4.7.4 Erro de posicionamento da câmera.....	95
4.7.5 Erro de escala.....	95
4.8 Medição fotogramétrica com a utilização da câmera X5S	96
4.9 Discussão	98
5 Conclusões.....	100
5.1 Principais resultados	100
5.2 Principais limitações.....	101
5.3 Sugestões para trabalhos futuros	102
Referências	103
Apêndice A – SCRIPT para gerar pares estéreo no Metashape	109
Apêndice B – Script extração postura GPS	110
Apêndice C – Rotina para aquisição de imagens e posturas no ambiente ROS	113
Apêndice D – calibração extrínseca – matriz de transformação do SV3D.....	115
Apêndice E – Especificações dos conjuntos ópticos.....	123

1 INTRODUÇÃO

Na indústria de petróleo e gás, a existência de falhas em diferentes equipamentos pode levar a situações críticas como o comprometimento da integridade dos operários, desastres ambientais, paradas inesperadas na produção ou danos irreversíveis de ativos. Portanto, a busca pelo desenvolvimento de sistemas mais eficientes de inspeção é de grande importância para a segurança e o desenvolvimento econômico e tecnológico do setor (MARTINS, 2008).

Em plataformas *offshore* de extração de petróleo e gás, utilizam-se *risers* flexíveis, que são dutos compostos por camadas metálicas e de polímero. Estes dutos interligam a plataforma às estruturas submarinas servindo tanto para transporte de fluidos como acondicionamento de cabos e sistemas de conexão, *riser* é a parte que não toca o solo marítimo, a partir deste ponto a seção do duto é denominada *flowline*.

A seção de duto acima da linha da água (trecho emerso dos *risers*), entre a zona de variação de maré até o conector de topo, opera em ambiente altamente corrosivo, sujeito as condições ambientais extremas. Para que se mantenha um controle sobre a integridade do duto, é necessário a realização de inspeções regulares, inclusive na parte externa dos *risers*.

O procedimento para prevenção de falhas em *risers* adotado atualmente consiste na inspeção visual através de escalada industrial (Figura 1), realizada por operários experientes, com o objetivo de adquirir imagens e realizar medições manuais para detecção de defeitos, como por exemplo: abrasão; rompimento e/ou deformações na camada externa; enrugamento ou ondulações; torções; ovalização e ângulo de catenária. Devido ao elevado consumo de tempo (média de um *riser* por dia), custo e periculosidade, atualmente são tomadas iniciativas com o objetivo de otimizar o processo e reduzir o risco de segurança ao operador.

Figura 1 - Exemplo de inspeção externa em bancada de *risers* no costado de uma plataforma do tipo FPSO com a técnica de escalada industrial.



Fonte: projeto VANT3D.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Atualmente vem se tornando cada vez mais comum a utilização de *Remotely Piloted Aircrafts* (RPA), também conhecidos como drones, em soluções industriais. O avanço tecnológico dessas aeronaves possibilitou a utilização de sensores embarcados e podem contar com sistema de posicionamento através do *global navigation satellite system* (GNSS), *real time kinematic* (RTK) e *inertial navigation system* (INS). Recentemente, aeronaves tipo RPA estão sendo utilizados em diversos setores da indústria, dentre eles: Óleo e Gás, Energia, Telecomunicação, Edificações e Infraestruturas (MAZUR; WIŚNIEWSKI; MCMILLAN, 2016)(MCMANAMON, 2019)(JOSHI, 2019). Em (WORKSWELL, 2016) é apresentada uma inspeção visual de dutos baseada em câmeras térmicas. Além desse tipo de inspeção, realiza-se também aquisições quantitativas, sendo mais comum a fotogrametria (PIX4D, 2016) e tecnologia *Light Detection and Ranging* (LiDAR) (DJI, 2021)(TENG et al., 2017).

Nos últimos anos tem-se utilizado RPAS para realizar a inspeção visual em plataformas, com ensaios pilotos realizados pela Petrobras, para a inspeção de *flares* (MARINHO et al., 2012), mais recentemente (BUSCHINELLI et al., 2020) demonstrou a viabilidade da utilização de RPAS para inspeção quantitativa dos *risers* flexíveis.

Utilizando uma série de procedimentos adequados, é possível realizar medições através do processamento das imagens adquiridas de uma cena ou objeto, o conjunto desses procedimentos é denominado fotogrametria. Através da técnica de fotogrametria gera-se um modelo virtual 3D, de uma determinada cena ou objeto de medição, possibilitando a inspeção a partir de aquisições de diversas imagens. No entanto, a fotogrametria clássica utiliza apenas uma câmera para a reconstrução 3D, portanto, existe a necessidade de adicionar informações à

cena para que seja possível inferir medições. Neste sentido, considerando-se uma aplicação da fotogrametria clássica embarcada em uma unidade RPA, para que seja possível reconstruir e realizar medições dimensionais há a necessidade de se adicionar elementos à cena, como escalas calibradas e alvos. Logo, há a necessidade da preparação prévia da cena, o que nem sempre é possível, principalmente considerando-se uma inspeção *offshore*.

A utilização de um sistema estéreo integrado a uma unidade RPA, para medição fotogramétrica traz a vantagem de ser possível realizar uma calibração prévia do sistema, o que permite utilizar a informação do *baseline* (distância entre os centros ópticos das câmeras do sistema estéreo) como alternativa para dar escala à cena. Uma das aplicações possíveis do sistemas estéreo embarcado em RPA é a detecção de objetos e obstáculos para auxiliar o voo, podendo ser embutido na própria aeronave (BARRY et al., 2015)(MCGUIRE et al., 2017), ou combinado com outros sensores para mapeamento de ambientes (GARCÍA CARRILLO et al., 2012).

O trabalho proposto nesta dissertação buscou o desenvolvimento de metodologias e construção de um sistema estéreo para inspeção geométrica de *risers* flexíveis, voltadas à medição de superfície através da técnica de fotogrametria aplicada em curtas distâncias, até 20 metros (VEITCH-MICHAELIS, 2016), sem a preparação prévia da cena. Desta forma, desenvolveu-se um sistema estéreo, composto por duas câmeras industriais do fabricante FLIR com resolução de 12 megapixels, embarcado em uma unidade RPA para aplicações industriais modelo Matrice 210 V2 RTK do fabricante DJI. A unidade RPA integra um sistema *Global Navigation Satellite System* (GNSS) com a correção de posicionamento através da técnica *Real Time Kinematic* (RTK).

1.2 MOTIVAÇÃO

Este trabalho faz parte do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento - P&D “Inspeção Óptica Tridimensional por Veículo Aéreo não Tripulado – VANT3D” financiado pela PETROBRAS através do CENPES – Petrobras S/A. O projeto visa realizar a inspeção 3D de estruturas industriais denominadas *risers* utilizando um veículo aéreo tipo RPA com diferentes sistemas e procedimentos desenvolvidos.

Convém destacar que o Laboratório de Metrologia e Automação (Labmetro) conta com um grande histórico de desenvolvimento de sistema de medição ópticos voltados a

inspeção industrial, sempre voltado às contribuições acadêmicas bem como aplicações práticas das soluções tecnológicas direcionadas à área industrial.

Usualmente, na utilização de fotogrametria de curta distância utiliza-se elementos adicionais para aplicação de escala à cena. *Risers* são tipicamente estruturas instaladas em locais de difícil acesso, necessitando o uso de escaldores para a instalação de alvos e escalas, o que vai diretamente contra o objetivo da inspeção com RPAS, que é a redução da necessidade da realização de alpinismo industrial.

Portanto, considerando os procedimentos e aspectos relacionados a inspeção de *risers* em plataforma *offshore*, a grande motivação deste trabalho de mestrado, está voltada a contribuição no sentido de melhorar os seguintes aspectos: redução de custos, redução do tempo de inspeção, melhoria da qualidade da medição e principalmente reduzir os riscos de acidentes decorrentes da inspeção em plataformas *offshore*.

1.3 OBJETIVO GERAL

Desenvolvimento de um método para medição em cenas não preparadas utilizando técnicas de fotogrametria à curtas distâncias, através de um sistema de visão estéreo para medição 3D (SV3D) integrado a um RPAS.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo geral contempla os seguintes objetivos específicos:

- Realizar revisão bibliográfica de técnicas relacionadas a calibração de câmeras; sistemas de visão estéreo na fotogrametria; sistemas de visão estéreo integrados à RPAS;
- Desenvolvimento e avaliação teórica e prática de métodos existentes para calibração de câmera;
- Montagem em laboratório de sistema de visão estéreo;
- Integração do sistema ao RPA;
- Realizar comparações entre medições utilizando diferentes definições de escala em cena, assim como a presença ou não de alvos em cena;
- Avaliação metrológica do sistema estéreo desenvolvido baseado na norma VDI/VDE-2634 e com objetos calibrados.

1.5 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

No capítulo 1 é apresentado a contextualização, motivação e objetivos do trabalho.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica da exploração offshore de petróleo e gás, *risers*, veículos aéreos não tripulados, medições fotogramétricas com a utilização de RPAS, visão estéreo embarcada em RPAS, fotogrametria: modelagem de câmera *pinhole*, calibração, sistema estéreo e técnicas de correspondência de pontos para triangulação.

No capítulo 3 é apresentado a descrição do sistema proposto, com sua aplicação, funções a serem atendidas e características metrológicas.

A validação experimental juntamente com os resultados é apresentada no capítulo 4.

Por fim apresenta-se as conclusões e análises dos resultados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

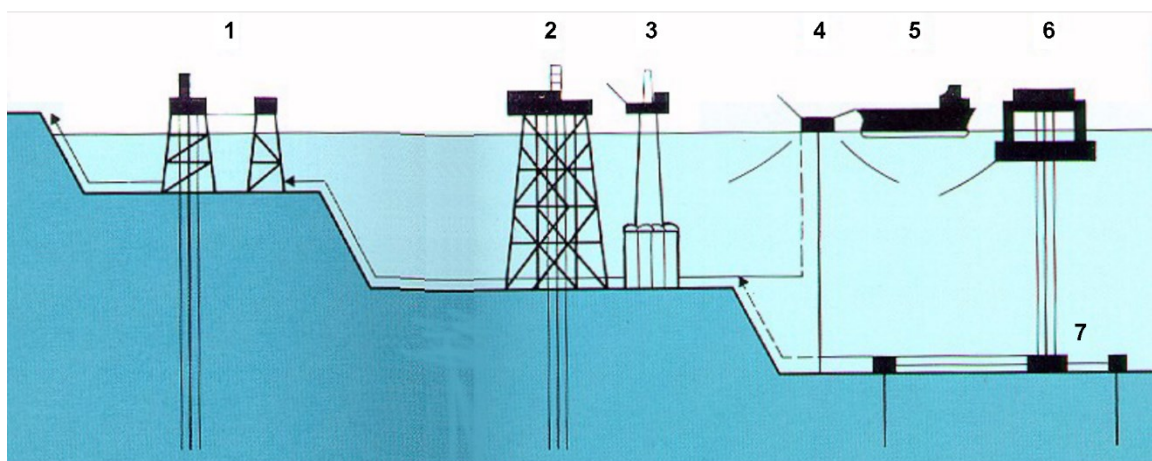
As próximas seções apresentam a revisão do estado da arte dos princípios e técnicas relacionadas ao trabalho, incluindo: Inspeção industrial *Offshore*, RPAS, fotogrametria, modelagem da câmera *pinhole*, calibração de câmera, distorções de lentes, sistemas de visão estéreo, geometria epipolar, sistemas de medição com RPAS e correspondência de pontos.

2.1 EXPLORAÇÃO *OFFSHORE* DE PETRÓLEO E GÁS

O Brasil produz em média 2,7 milhões de barris de petróleo por dia, isso o torna o 10º maior produtor de petróleo do mundo e terceiro nas Américas, atrás dos EUA e do Canadá, sendo que aproximadamente 97% dessa produção é proveniente da exploração *offshore* (ANP, 2020). Considerando as descobertas de grandes reservatórios *offshore* decorrentes do pré-sal, a expectativa é que esse número continue a crescer significativamente, atingindo 5,2 milhões de barris por dia até 2026 (FAVARET CAVALCANT, 2020).

A Figura 2 apresenta os principais tipos de estruturas utilizadas na produção de petróleo e gás *offshore*, onde: (1) Multiplataforma fixa, (2) Plataforma fixa autônoma, (3) Plataforma gravitacional de concreto autônoma, (4) Plataforma flutuante com ancoragem de único ponto, (5) Tanque de armazenamento e transporte, (6) plataforma flutuante de pernas tensionadas e (7) Coletores submarinos (DEVOLD, 2000).

Figura 2 – Estruturas utilizadas na extração de Petróleo.



Fonte: Adaptado de (DEVOLD, 2000)

Estruturas *offshore* são usadas em todo o mundo em uma variedade de profundidades e ambientes. Por definição uma estrutura *offshore* não tem acesso à terra firme e consegue permanecer posicionada em qualquer condição meteorológica, ela pode ser fixa ao fundo do

mar ou ser flutuante, que por sua vez pode ser amarrada ao fundo do mar ou dinamicamente posicionadas por propulsores (CHAKRABARTI, 2005).

Instalações de exploração e extração de petróleo *offshore* normalmente são instaladas no mar a grandes distâncias da costa, onde estão sujeitas a diversidade de condições físicas e ambientais. Essas condições de operações tem incentivado a busca por melhorias nesses processos, culminando em parceria com universidades e centros de Pesquisa e desenvolvimento P&D, que vem resultando na conquista de grandes avanços tecnológicos (ÁGUAS; MORAIS, 2013).

Atualmente, os tipos de plataforma mais utilizados no Brasil na produção de petróleo *offshore* são: fixas utilizadas em lâmina rasas de água; semissubmersíveis e as flutuantes (Figura 3), denominadas *Floating production storage and offloading* (FPSO), que são utilizadas na região do pré-sal, onde são demandadas maiores profundidades para extração (PETROBRAS, 2020).

Figura 3 – (a) exemplo de unidade flutuante de produção. (b) exemplo de plataforma fixa.

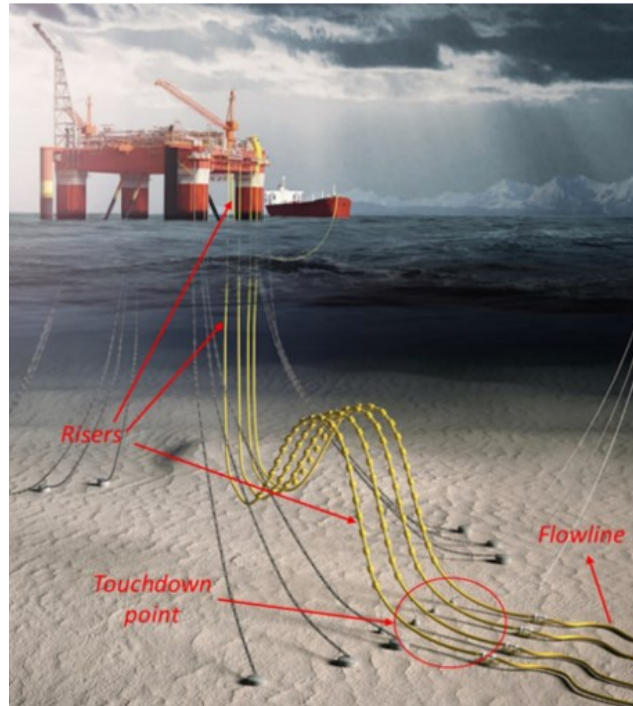


Fonte: (PETROBRAS, 2020)

2.2 RISERS

As plataformas de extração são interligadas aos poços no subsolo submarino através de dutos (Figura 4), que podem ser rígidos ou flexíveis. A região do duto compreendida entre a conexão com a plataforma até o ponto que toca no leito oceânico (*touchdown point*, TDP) é conhecida como *riser*, a partir deste ponto até a cabeça do poço o tubo passa a ser denominado *flowline* (BAI, 2001).

Figura 4 – Ilustração das regiões dos dutos utilizados em plataformas de extração *offshore*.



Fonte: (MARCELINO, 2019)

O *riser* deve ser capaz de resistir as mudanças de temperatura, reações químicas com o fluido no seu interior e a corrosão marítima. É composto por diversas camadas de materiais e geometrias diferentes (Figura 5). As camadas de aço são responsáveis por suportar os carregamentos mecânicos, pressão interna de trabalho e externa do ambiente que o duto e submetido, as camadas de polietileno trabalham como barreira estanque do fluido interno e da água do mar além de oferecer proteção contra corrosão e abrasão (API RP 17B, 1998).

Figura 5 – Detalhe das estruturas internas de um *riser*



Fonte: (VARGAS-LONDOÑO et al., 2014)

2.2.1 Aplicação e classificação

Os *risers* são utilizados em diversas etapas e aplicações, sendo elas: extração e transporte de petróleo e gás; transporte de água; acomodação de cabos; dentre outros. No campo da extração *offshore*, segundo (API RP 17B, 1998), podem ser classificadas em:

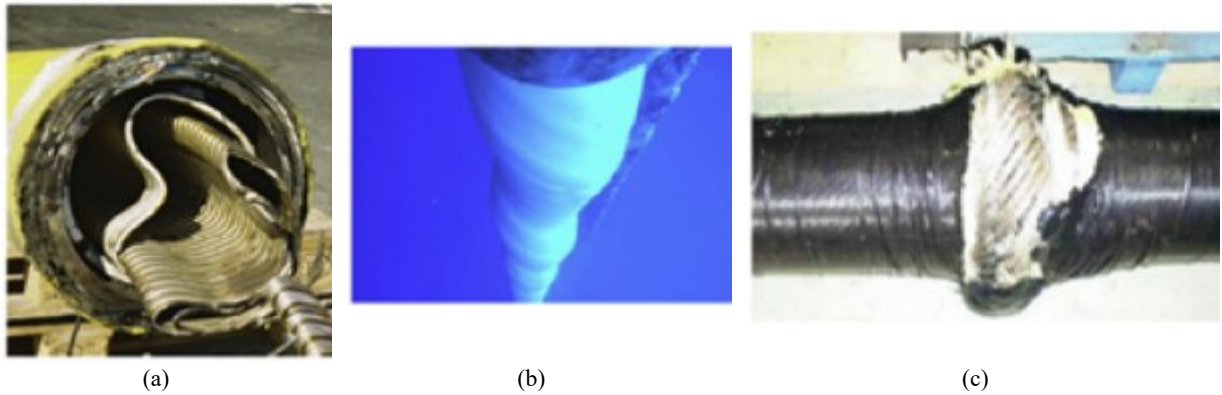
- Produção/Injeção – Os *risers* de produção transportam fluídos produzidos a partir do reservatório. Os *risers* de injeção transportam fluídos químicos de topo de poço e de controle para o reservatório de produção;
- Exportação – Geralmente incluem equipamentos semelhantes aos *risers* de injeção de produto. É utilizado para conduzir o fluído para unidade terrestre ou outra unidade. Os diâmetros do *riser* podem ser maiores, de modo a acomodar a produção;
- Completação – inicia a produção de um poço para produção de óleo ou gás podendo ser utilizado para a passagem de acessórios e ferramentas;
- Perfuração - São responsáveis pelo transporte de fluido de perfuração para o poço, apoiar linhas auxiliares e servir de guia para colunas de perfuração.

2.2.2 Defeitos apresentados na seção externa em *risers*

Os *risers* estão sujeitos a danos durante sua instalação e utilização, podem ocorrer na estrutura interna ou capa externa de proteção, o que pode afetar sua operação, impactando em risco aos operadores, danos monetários e ambientais, quando ocorre a perda de contenção do duto (MARINHO; DOS SANTOS; CARNEVAL, 2006).

Segundo (DE STEFANI; CARR, 2010) os defeitos que ocorrem em dutos flexíveis que levam a vazamentos são: dano mecânico (resultante de qualquer impacto externo), corrosão interna, defeito de construção, falha mecânica ou de material. Algumas falhas que ocorrem podem alterar a geometria externa dos *risers*, que normalmente se manifestam da seguinte forma: furo, fenda, alterações de diâmetro; ovalizações, amassamentos e ruptura (API RP 17B, 1998). Alguns exemplos são apresentados na Figura 6.

Figura 6 – (a) colapso da carcaça; (b) torção ocasionada por rompimento de arame; (c) aumento da seção do riser.

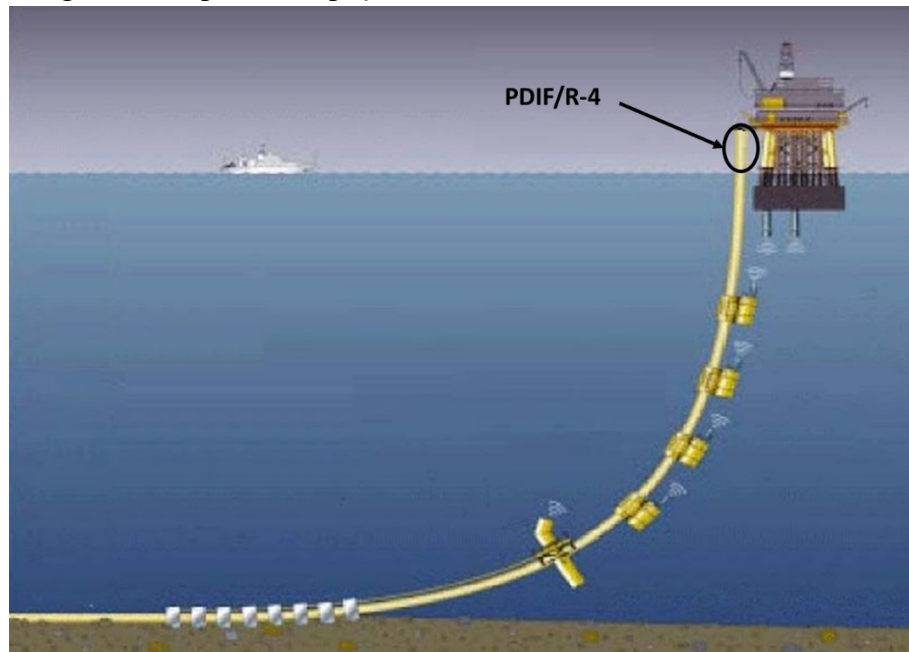


Fonte: (DRUMOND et al., 2018).

2.2.3 Inspeção de *risers* na região do PDIF/R-4

A Petrobras adota procedimentos que norteiam a realização dos processos, sendo que a inspeção de *risers* é especificada nos planos de inspeção de duto flexível (PDIF). A região 4, objeto de interesse deste trabalho é a zona emersa, compreendida entre a Zona de Variação da Maré (ZVM) e o conector de topo, flange, junta soldada ou válvula posicionada em deck da plataforma.

Figura 7 – Tipos de inspeção adotados nas diversas zonas em *riser*.



Fonte: (DEFORME, 2015).

Tipicamente o processo de inspeção da região PDIF-4 de *risers* flexíveis é realizado através da técnica de escalada industrial, técnica de progressão utilizando cordas e equipamentos mecânicos para acesso ao local de trabalho (ABNT, 2008).

Realiza-se medições por contato da geometria do duto com o auxílio de trena, escala graduada, paquímetro e inclinômetro, identificando e sinalizando possíveis defeitos aparentes, usualmente os defeitos encontrados são da ordem de dezenas de milímetros, e segundo (PETROBRAS, 2013) seguem as seguintes classificações:

- Danos na capa externa (passantes ou não), como abrasões e rasgos, desde a ZVM até a traseira do conector de topo do *riser*;
- Deformação radial da capa externa (capa inflada);
- Torção do corpo tubular;
- Ovalização do corpo tubular;
- Protuberância no corpo tubular;
- Enrugamento ou ondulação do corpo tubular;
- Escorregamento (deslocamento axial) da capa externa;
- Presença de furo de alívio;
- Interferências do duto inspecionado com outras estruturas;
- Entrelaçamento de duto;
- Presença de corpos estranhos;
- Ângulo de catenária estimado em desacordo com os limites de projeto;
- Vazamento de hidrocarbonetos, inclusive sob acessórios (enrijecedor de curvatura, vértebra, proteção antiabrasivo);
- Rompimentos da armadura de tração (no caso de danos passantes);
- Janela com exposição das armaduras com ou sem presença de corrosão dos arames;
- Afastamento dos arames;
- Arames sobrepostos;
- Presença de reparos.

2.3 VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS

Os Veículos aéreos não tripulados ou *Remotely Piloted Aircraft* (RPA), também conhecidos por drone, são aeronaves não tripuladas e pilotadas a partir de uma estação remota. Essas aeronaves fazem parte de um sistema mais complexo denominado *Remotely Piloted Aircraft System* (RPAS), que é composto pelo controle e comando; canal de comunicação; e a aeronave RPA propriamente dita. Possuem a capacidade de se integrar e interagir com o ambiente *Air Traffic Management* (ATM), em tempo real, de acordo com o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA, 2020).

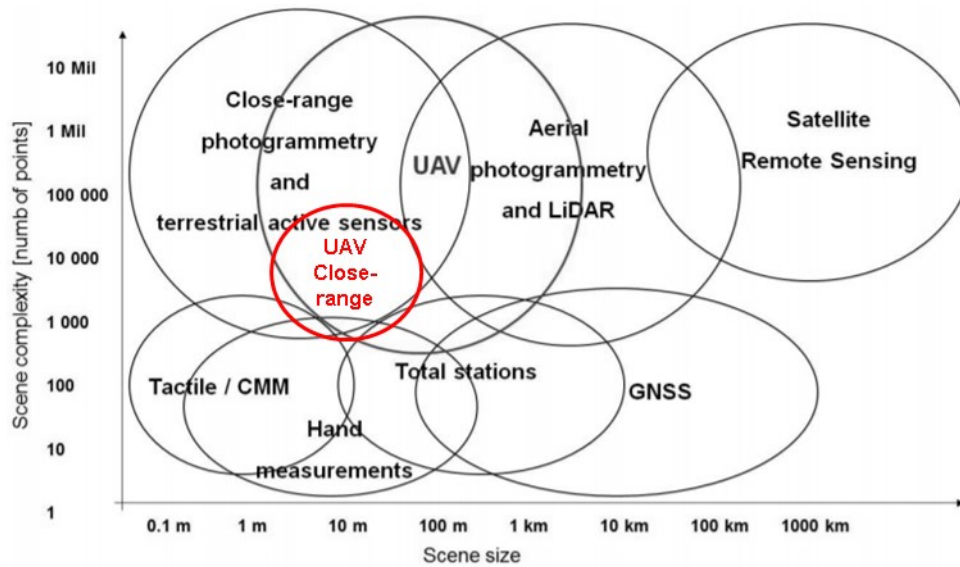
Os dois principais tipos de concepções são os de asas fixas ou rotativas. Ambas as categorias podem voar nos modos manual, semiautomatizado e autônomo, dependendo da instrumentação de bordo, carga útil, autonomia de voo, tipo de plataforma e grau de automação necessários. Entre diversos instrumentos a bordo, o sistema de navegação incorporado fornece controle aéreo de posição, orientação e velocidade a partir de medições de GNSS e Sistemas de medição inercial (IMU) (ZHOU, 2020).

Existem diversos tipos e modelos de RPA atualmente, os quais são utilizados para diferentes tarefas, desde os mais simples, voltados para atividades recreativas até os mais complexos e sofisticados adotados em serviços de filmagens profissionais e inspeções, que podem utilizar a técnica de posicionamento GNSS integrada com o RTK (*Real Time Kinematic*). (SHAKHATREH et al., 2018)(BUDIYONO, 2008).

O avanço no desenvolvimento de aeronaves não tripuladas com tecnologias embarcadas, como sensores e técnicas de baixa incerteza de medição de posicionamento, possibilitou a utilização destes sistemas como uma ferramenta valiosa na aquisição de dados voltados à inspeção, vigilância, mapeamento e modelagem 3D (NEX; REMONDINO, 2014).

A Figura 8 apresenta uma relação entre complexidade e tamanho da cena através de diversas técnicas de medição, sendo que o círculo em vermelho delimita a região de aplicação deste trabalho de mestrado.

Figura 8 - Técnicas, sensores e plataformas disponíveis para fins de medição 3D, de acordo com as dimensões e complexidade da cena.

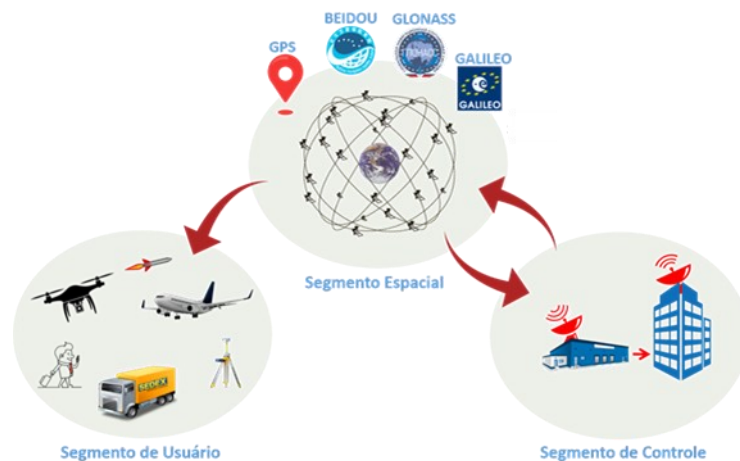


Fonte: Adaptado de (NEX; REMONDINO, 2014).

2.3.1 Global Navigation Satellite System (GNSS)

O *Global Navigation Satellite System* (GNSS) é um sistema de posicionamento global que utiliza a técnica de trilateração entre os satélites para cálculo da coordenada do receptor no globo terrestre, é constituído basicamente por três segmentos: segmento espacial ou conjunto de satélites; segmento de controle em terra e segmento de usuário. Três sistemas GNSS podem ser destacados e fornecem serviços globais, o *Global Positioning System* (GPS) dos Estados Unidos, o GALILEO da Europa, o Sistema de Satélite de Navegação Global (GLONASS) da Rússia e o sistema de navegação por satélite BeiDou (BDS ou COMPASS) da China (BARROCA; ALVES, 2008).

Figura 9 - Segmentos do sistema de posicionamento global GNSS.



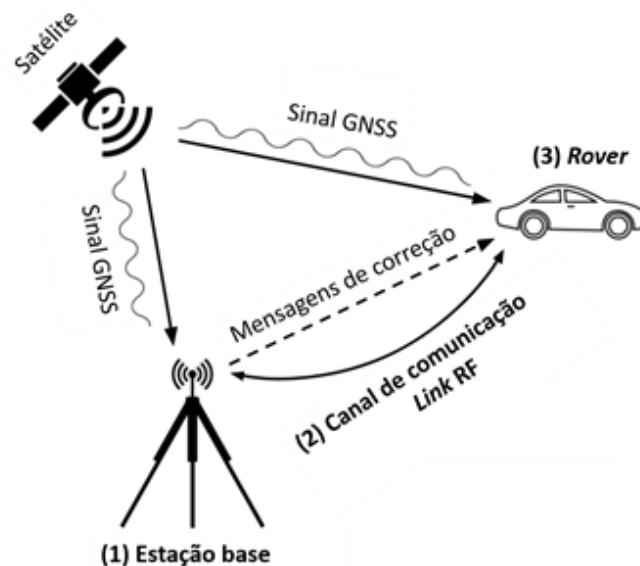
Fonte: Autor.

O GNSS disponibiliza a coordenada de um ponto em relação ao um sistema de coordenadas global denominado *World Geodetic System 1984 – WGS-84*, que adota o centro de massa da terra como origem do sistema de referencia (GREWAL; WEILL; ANDREWS, 2007). Os dados disponibilizados pelo GNSS são fortemente dependentes das condições de operação, como localização do receptor, condições atmosféricas, reflexões e interferências no sinal recebido (LIMA, 2005). Essas variações podem influenciar a qualidade da navegação de um veículo, sendo necessário a adoção de técnicas adicionais para redução no erro de posicionamento.

2.3.2 Real Time Kinematic (RTK)

O RTK é uma técnica que pode ser adotada para reduzir o erro de posicionamento em RPAS. O sistema permite reduzir o erro de posicionamento do GNSS da ordem de metros para milímetros. Adotando uma estação base fixa, é possível transmitir através de um *link* de rádio em tempo real as correções de posicionamento para a unidade *rover*. A Figura 10 apresenta um exemplo de funcionamento de um sistema RTK, onde: (1) a estação base; (2) canal de comunicação e (3) unidade *rover*, que recebe correções em tempo real. O *rover* pode ser um veículo terrestre ou aéreo (WEGENER, 2005).

Figura 10 – Configuração básica de um sistema RTK.

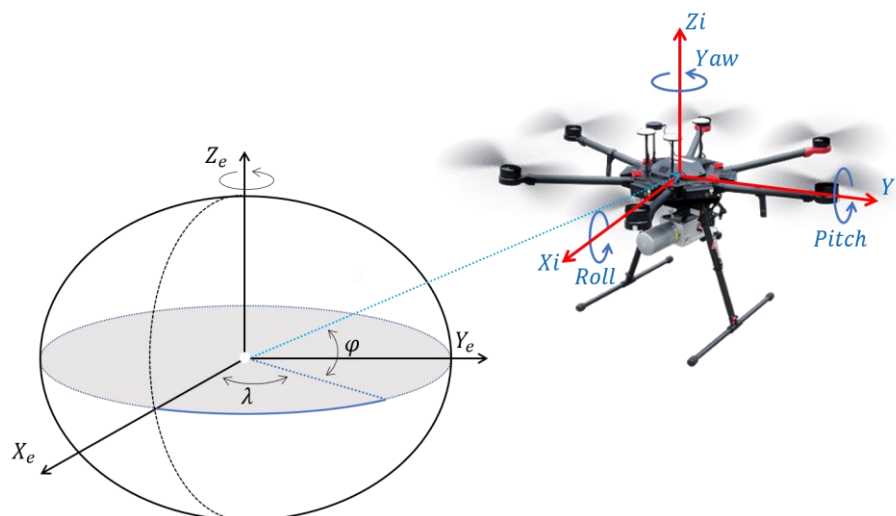


Fonte: (INERTIALSENSE, 2020).

2.3.3 Sistema de navegação inercial

Normalmente uma unidade RPA já vem equipada com um sistema de navegação inercial para auxílio do voo denominados *Inertial Navigation System* (INS). Esses sistemas efetuam a fusão dos dados provenientes do GNSS, e dos sensores da *Inertial Measurement Unit* (IMU). A partir desta fusão de dados, a unidade INS determina a posição e orientação, resolvendo o problema da navegação da unidade RPA. Esta técnica de navegação também é utilizada, por exemplo, em smartphones, foguetes e aeronaves tripuladas e não tripuladas (BUTTERFLYGYRO, 2011). A trajetória do RPA é determinada em 6 graus de liberdade, sendo 3 de rotação e 3 de translação, uma forma de apresentar a orientação de um RPA no espaço é através dos ângulos de Euler α , β , e γ , que utiliza a combinação das três rotações em torno dos eixos com relação a um sistema de coordenadas. É atribuído: *roll*; *pitch* e *yaw* para as três rotações, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Exemplo de orientação de um RPA em função das rotações *roll*, *pitch* e *yaw*, relacionados ao sistema de coordenadas do RPA (X_i, Y_i, Z_i), e ao sistema de coordenadas global.



Fonte: Autor.

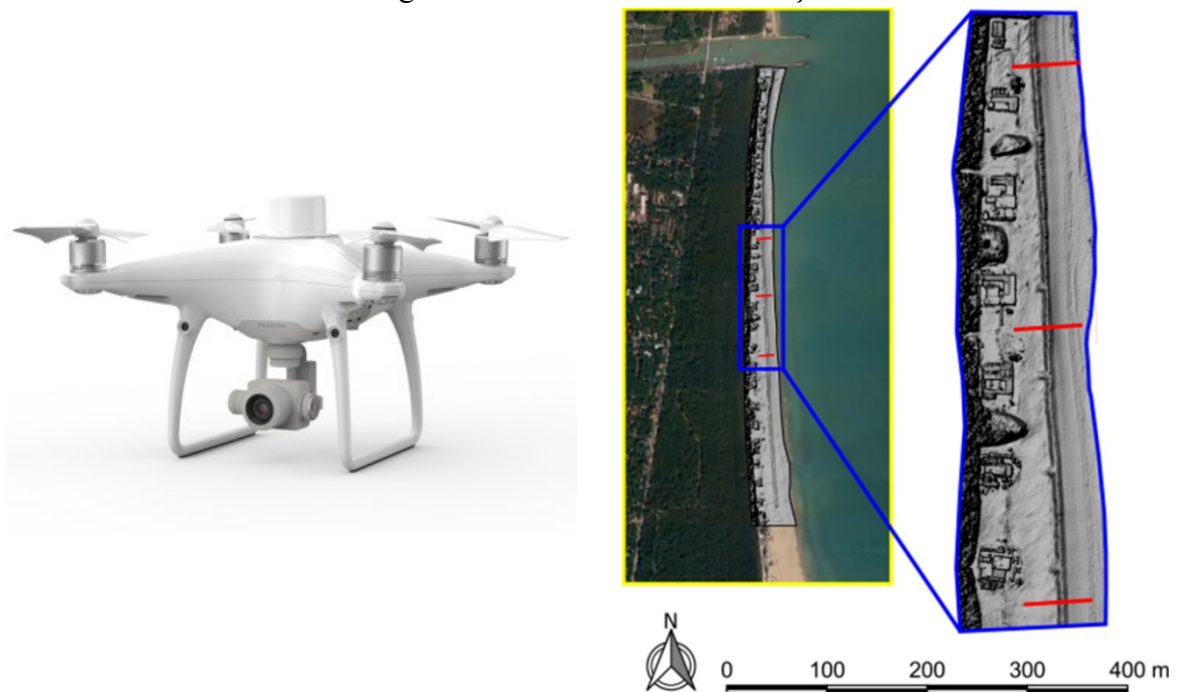
A *Inertial measurement unit* (IMU) é um dispositivo constituído de vários sensores, como: magnetômetros; acelerômetros; giroscópios; barômetro; dentre outros. O INS calcula a velocidade, posição e orientação da aeronave a partir das equações de movimento através da aceleração angular, linear e dos dados provenientes da IMU. Os dispositivos de navegação inercial (INS) tem seu princípio de funcionamento baseado no método *dead reckoning*, que é um método de posicionamento relativo e autocontido, ou seja, o posicionamento e orientação atual é determinado a partir do posicionamento e orientação obtidos anteriormente. No

entanto, os erros se acumulam rapidamente, em decorrência dos erros sistemáticos internos e dos algoritmos de integração. A solução é atualizar o INS periodicamente através dos dados GNSS por exemplo utilizando a técnica RTK. (AHMAD et al., 2013).

2.4 MEDIÇÕES FOTOGRAMÉTRICAS COM A UTILIZAÇÃO DE RPAS

A aplicação mais difundida adota a utilização de RPAS para fotogrametria aérea, por exemplo em (TADDIA; STECCHI; PELLEGRINELLI, 2020) um RPAS com sistema RTK para georreferenciamento de modelos fotogramétricos, reconstruídos a partir do software Agisoft Metashape, de uma área costeira.

Figura 12 – RPA e local de medição.



(a) DJI *Phantom 4* RTK utilizado para a medição fotogramétrica.

(b) Área de medição e modelo digital da superfície reconstruído.

Fonte: (TADDIA; STECCHI; PELLEGRINELLI, 2020).

Outra aplicação consiste na inspeção das lâminas, hélices, de turbinas eólicas com auxílio de RPAS equipado com uma câmera térmica, como ilustrado na Figura 13. Esta técnica possibilita a detecção de trincas, amassamentos e delaminações das hélices a partir da variação da temperatura do local (GALLEGUILLLOS et al., 2015).

Figura 13 – RPAS utilizado e trajetória performada durante a inspeção.



(a) RPAS equipado com uma câmera IR FLIR 650 realizando o voo.

Fonte: (GALLEGUILLOS et al., 2015).



(b) Trajetória do voo realizado para inspeção.

Em (SANKARASRINIVASAN et al., 2015) apresenta-se um sistema para inspeção qualitativa em fachadas de prédios, neste trabalho foi utilizada uma câmera de baixa resolução embarcada em RPAS, conforme apresentado na Figura 14

Figura 14 – RPAS realizando inspeção em fachada de edifício e câmera utilizada.



(a) RPAS realizando as aquisições.



(b) Detalhe da montagem da câmera utilizada.

Fonte: (SANKARASRINIVASAN et al., 2015).

2.5 CÂMERA ESPECÍFICA PARA FOTOGRAMETRIA

A empresa DJI disponibilizou recentemente uma câmera voltada às aplicações de fotogrametria embarcada em uma unidade RPA, esta câmera é equipada com um sensor de alta resolução, 45 MPixel, com técnica *global shutter* e sincronismo de tempo da ordem de microssegundos com o hardware controlador de voo e com o sistema RTK, ver Figura 15.

Figura 15 – *Zenmuse P1*

Fonte: (DJI, 2020a).

2.6 VISÃO ESTÉREO EMBARCADA EM RPAS

Alguns trabalhos adotam a utilização de sistema de visão estéreo embarcados em veículos tipo RPA, possibilitando a navegação autônoma e identificação de obstáculos. Usualmente são adotados processamento em tempo real, aplicando técnicas de identificação da profundidade a partir da disparidade, o que possibilita o reconhecimento do ambiente e consequentemente a redução dos riscos de colisões conforme apresentado em (WU; SUI; WANG, 2017), (CIGLA; THAKKER; MATTHIES, 2018) e (GARCÍA CARRILLO et al., 2012). A Figura 16 apresenta exemplos de sistemas estéreo utilizados em RPAS.

Figura 16 – Exemplos de aplicações de sistema estéreo em RPAS.



(a) RPAS com câmeras estéreo montadas para auxílio em voo autônomo.



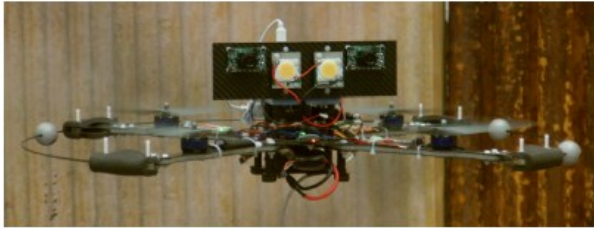
(b) Exemplo de sistema estéreo integrado ao RPAS DJI M210 V2 para detecção de obstáculos.

Fonte: (a) (GARCÍA CARRILLO et al., 2012) e (b) (DJI, 2019a).

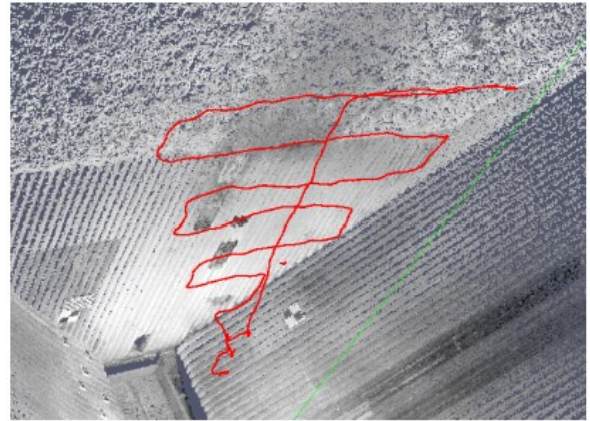
Em (NIKOLIC et al., 2013) apresenta-se um aplicação típica de sistema estéreo embarcado em um veículo tipo RPA, voltado à medição de ambientes internos confinados. Neste trabalho o autor apresentou um sistema voltado à medição da superfície interna de uma

caldeira, com o RPA seguindo uma trajetória pré-programada, com uma velocidade de 0,25 m/s, com uma distância de segurança de 1 m entre a aeronave e a parede, conforme apresentado na Figura 12 (NIKOLIC et al., 2013).

Figura 17 – Montagem do sistema e caminho realizado para inspeção.



Sistema estéreo acoplado em RPAS para medição



Caminho realizado durante as aquisições.

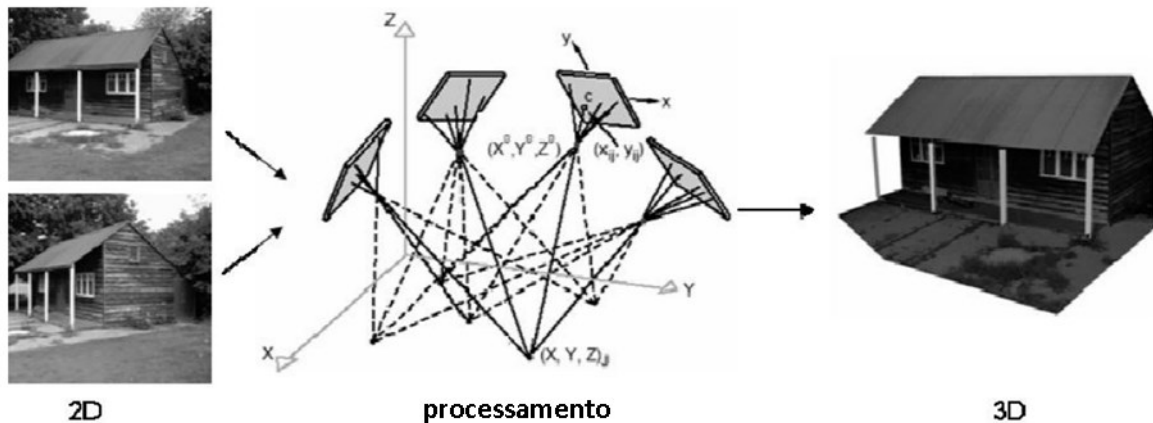
Fonte: (NIKOLIC et al., 2013).

2.7 FOTOGRAMETRIA

A fotogrametria pode ser descrita como um conjunto de métodos para reconstrução tridimensional de um modelo digital de uma cena ou objeto. A qual possibilita a extração de informações tridimensional de um objeto, como forma e localização, utilizando como referência duas ou mais imagens adquiridas de ângulos distintos da mesma cena. (LUHMANN, 2010).

A técnica de fotogrametria baseia-se na triangulação dos pontos homólogos, identificados em imagens de posições distintas, considerando um determinado modelo de câmera, por exemplo o modelo *pinhole*. A Figura 18 ilustra as três etapas básicas que compõem a técnica de fotogrametria, a saber: aquisição de imagens; triangulação de pontos e construção do modelo 3D, (ATKINSON, 1996)(MALLISON; OLIVER WINGS; WINGS, 2014)(ROBSON et al., 2018).

Figura 18 – Princípio de triangulação para fotogrametria.



Fonte: (DE LIMA, 2006).

2.7.1 Fotogrametria de curta distância

No ambiente de inspeção industrial, a fotogrametria de curta distância pode ser caracterizada por efetuar medições de objetos que estejam posicionados entre 1m e 20m de distância do sensor, conforme (VEITCH-MICHAELIS, 2016). Considerando que a aquisição das imagens pode ser realizada de diversas posições e diferentes orientações, e a incerteza da medição pode chegar a décimos de milímetros (LUHMANN, 2010).

Normalmente as câmeras utilizadas em fotogrametria, voltadas a inspeção industrial, são do tipo *Digital Single Lens Reflex* (DSLR) ou industriais com resolução da ordem de 20 Megapixel ou superior. Podem ser citados os sistemas das empresas GSI¹, AICON² e GOM³, que são praticamente automatizados e podem ser operados por pessoal não especializado, com a facilidade de se realizar a aquisição e o processamento dos dados em locais e tempos distintos (LUHMANN, 2010).

Após aquisição das imagens é realizado a calibração ou autocalibração da câmera e lente, que serve para determinação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera, efetua-se a correspondência entre pontos através da utilização de detectores, realiza-se então a triangulação entre os pontos obtidos gerando assim o posicionamento dos pontos 3D e alinhamento das imagens no espaço resultando na construção da nuvem de pontos, a qual pode ser submetida a diversas análises metrológicas. A seguir apresenta-se as principais

¹ GSI <https://tecnimexgroup.com/sistema-de-fotogrametria/>

² AICON <https://www.aeroexpo.online/pt/prod/hexagon-metrology-sas/product-169916-34046.html>

³ GOM <https://www.gom.com/en/products/3d-measuring-machines>

etapas do processo de inspeção industrial de curta distância a partir de técnicas de medição fotogramétrica:

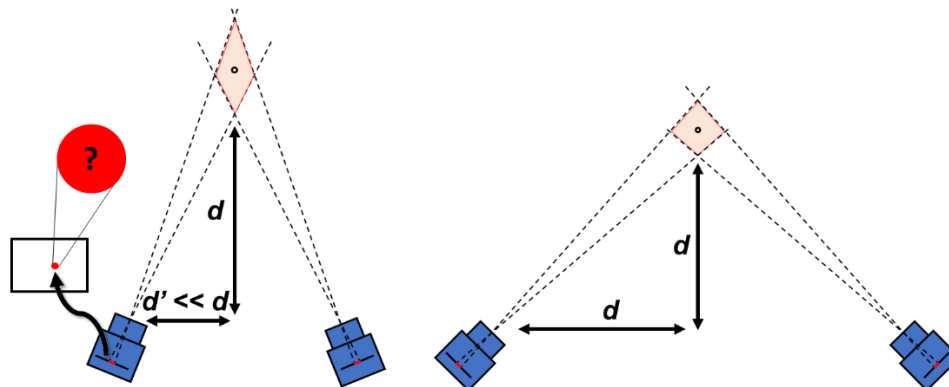
- Aquisição das imagens
- Definição do modelo do sensor (parâmetros intrínsecos e extrínsecos)
- Correspondência entre pontos (Detectores)
- Calibração de câmera *pinhole* e distorções
- Triangulação entre pontos e alinhamento das imagens
- Bundle adjustment
- Nuvem de pontos e malhas
- Avaliação de superfície

2.7.2 Aquisição das imagens

Diversos parâmetros influenciam a incerteza de uma medição por fotogrametria, dentre eles destacam-se: configuração da trajetória das aquisições, percentual de sobreposição das imagens, resolução da câmera, iluminação e textura da cena.

Um aspecto relacionado ao procedimento de aquisição, é a distância de medição, sabe-se que a incerteza na medição da profundidade, distância, é inversamente proporcional à distância entre os centros de projeção das câmeras, denominado *baseline*. Neste contexto, conforme apresentado na Figura 19, observa-se que ao adotar o *baseline*, ou seja, distância entre centros ópticos, maior do que a distância até o mensurando, o resultado é uma região de incerteza menor do que utilizar a distância até o objeto maior que o *baseline* entre as câmeras. Este fenômeno é resultado de um maior ângulo de triangulação para um mesmo ponto (WENHAO, 2001).

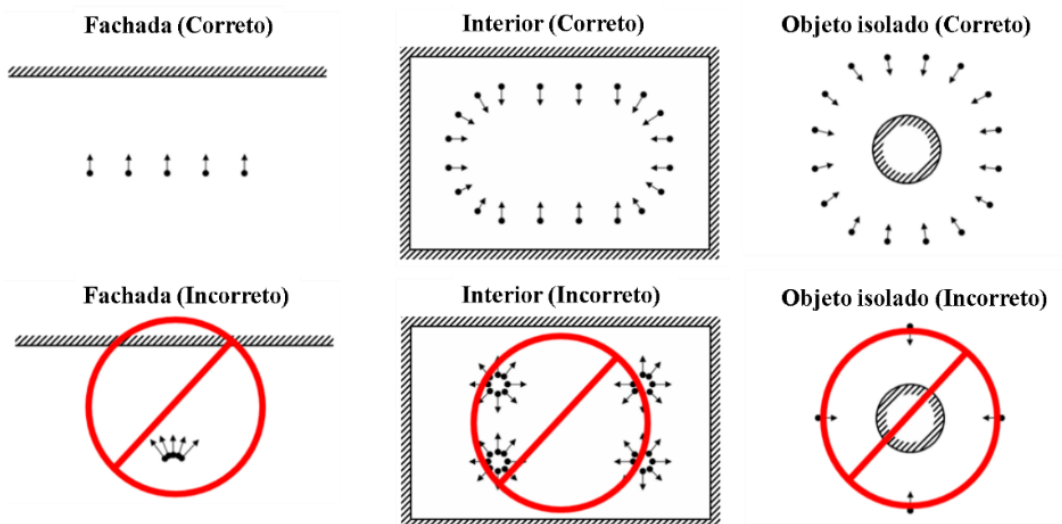
Figura 19 – Relação entre ângulo de aquisição das imagens e região de incerteza de triangulação de um ponto.



Fonte: Adaptado de (BUSCHINELLI et al., 2020).

Para obter-se uma reconstrução satisfatória, existem boas práticas que orientam a maneira adequada de aquisição, que geralmente consideram as diferentes formas de objeto a ser medido. É importante que exista uma boa disposição das aquisições da cena, conforme apresentado na Figura 21 (AGISOFT, 2019). A configuração relacionada a forma de aquisição da cena pode afetar o resultado da medição, ou seja, cada cena demanda uma forma adequada de aquisição conforme apresentado na Figura 20.

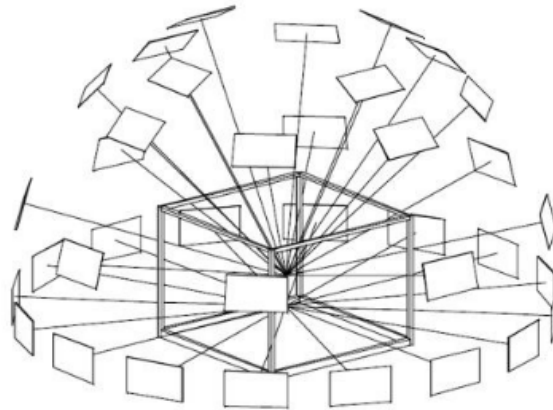
Figura 20 - Configurações para o procedimento de aquisição de imagens para reconstrução fotogramétrica.



Adaptado de (AGISOFT, 2019).

A Figura 21 ilustra um exemplo de aquisições ideal para um objeto semelhante a um cubo, onde precisam ser realizadas de diversas posições e orientações da câmera, considerando um elevado grau de convergência, sobreposição e redundância em relação ao objeto (DE LIMA, 2006) (REMONDINO; FRASER, 2006).

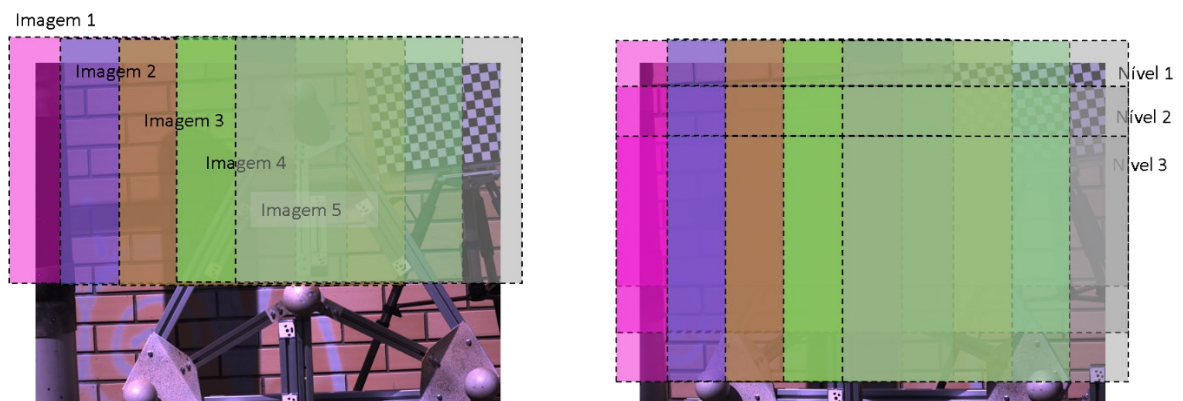
Figura 21 - Exemplo de poses para aquisições ideais para fotogrametria.



Fonte: (ZUGE; AG, 2002).

É importante que as aquisições sejam realizadas em sequência e com 65 a 80% de sobreposição entre a imagem anterior e posterior, para que exista uma quantidade de pontos correspondente entre as imagens suficiente. A Figura 22 ilustra um exemplo de aquisição com sobreposição entre as imagens representadas pelas camadas em cores diferentes para cada sequência de aquisição, onde é possível observar por exemplo, que a imagem 2 tem informação da parte da cena da imagem anterior e posterior (LUHMANN, 2010).

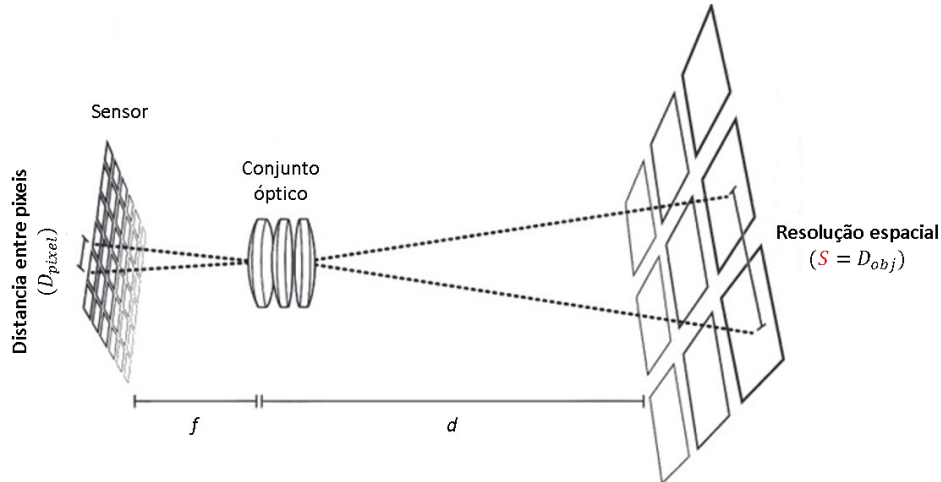
Figura 22 - Exemplo de modo de aquisição de imagens, onde as seções com diferentes cores representam as imagens sobreposta pela seguinte e a área comum entre elas.



Fonte: Autor.

Um parâmetro importante, indicador da qualidade da medição em fotogrametria, é a resolução espacial. Ela é definida como a relação entre uma dimensão na cena e sua projeção no sensor da câmera em pixel, ou simplesmente a distância entre pixels vizinhos, projetada na cena, conforme ilustra a Figura 23 (LUHMANN, 2010).

Figura 23 – Projeção de pixels vizinhos na cena representando a resolução espacial.



Fonte: Adaptado de (UNIVERSITY, 2019).

A equação da resolução espacial pode ser escrita como:

$$S = D_{pixel} \frac{d}{f} \quad (1)$$

Sendo D_{pixel} o tamanho do pixel, d é a distância entre a posição do centro de projeção no modelo *pinhole* e o objeto e f é o comprimento focal.

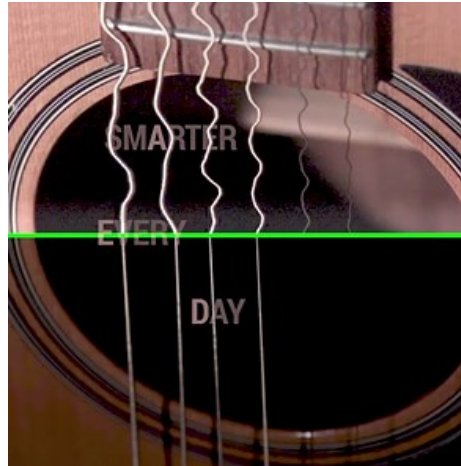
Estendendo este conceito e considerando a incerteza de detecção no plano imagem u_{pixel} é possível estimar a incerteza de medição no espaço objeto uS . Considerando fatores adicionais de incerteza pode-se adicionar o fator q conhecido como o *design factor*, assim, é possível reescrever a equação (1) da seguinte maneira:

$$uS = q \left(u_{pixel} \frac{d}{f} \right) \quad (2)$$

Os valores práticos adotados para o *design factor* q variam entre 0,4 e 0,8 para excelentes configurações de aquisição e 1,5 a 3,0 para configurações médias, podendo chegar a valores maiores para configurações ruins (LUHMANN, 2010).

Em aquisições dinâmicas, quando existe movimentação relativa entre a câmera e a cena, podem ocorrer distorções nas imagens em decorrência da tecnologia adotada pelo sensor, podendo ser *rolling shutter* ou *global shutter*. A Figura 24 apresenta um exemplo deste fenômeno em uma imagem.

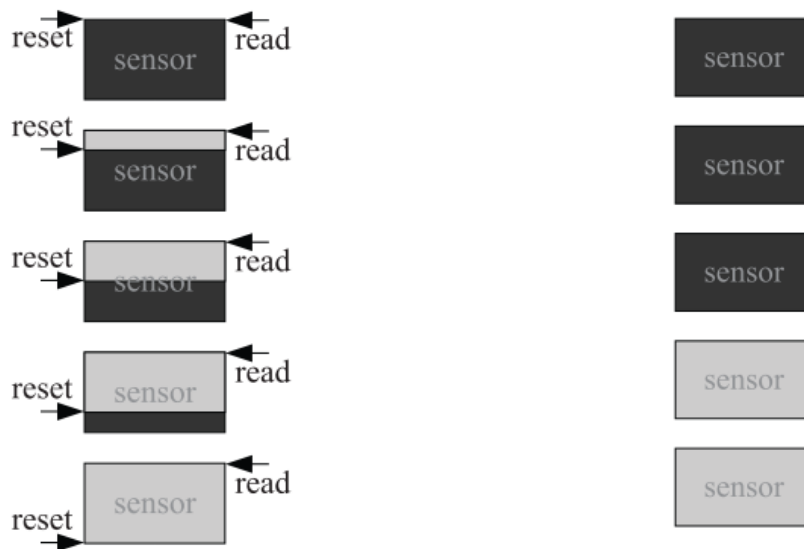
Figura 24 – Exemplo de distorção gerada por um sensor tipo *rolling shutter*.



Fonte : (DPREVIEW, 2017).

Os sensores do tipo *rolling shutter* geram as imagens linha a linha, com atraso entre elas, o que acarreta distorção nas imagens adquiridas em movimento. Os sensores com a tecnologia de gravação *global shutter* por sua vez realizam a leitura dos dados simultaneamente de todos os pixels, minimizando assim os efeitos de distorção nas imagens. A Figura 25 ilustra a forma de gravação dos sensores.

Figura 25 – Ilustração da forma de gravação dos sensores.



(a) Modo de leitura do sensor *rolling shutter*

(b) Modo de gravação do sensor *Global shutter*

Fonte : (SCH et al., 2009).

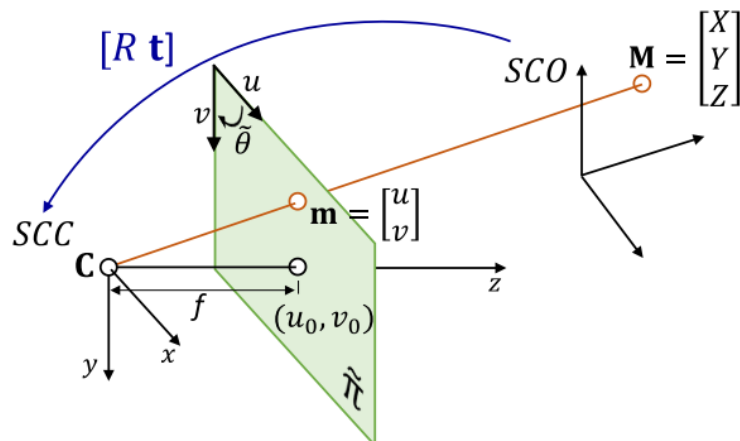
2.7.3 Modelo de câmera *pinhole*

Câmera *pinhole*, ou também denominada câmera escura, consiste em uma estrutura fechada onde existe apenas um furo como entrada de luz. A luz da cena exterior é projetada

para o interior da estrutura passando pelo furo, obedecendo a um relacionamento cruzado entre os dois raios, de modo que a imagem gerada no interior se apresenta rotacionada em 180° . O conjunto sensor e lente das câmeras modernas pode ser representado por esse modelo após a compensação das distorções da lente (DANIILIDIS; KLETTE, 2006).

A modelagem matemática deste tipo de câmera é conhecida como modelo *pinhole*, câmera central, ou ponto único de visão (SVP, *Single View Point*). Para simplificar a representação e os cálculos, utiliza-se o modelo computacional de câmera *pinhole*, no qual o sensor é representado entre o centro de projeção e o objeto. A Figura 26 ilustra o plano imagem $\tilde{\pi}$ posicionado entre um ponto $M = [X Y Z]^T$ no espaço 3D e o centro óptico C , como resultante a intersecção da reta com o plano imagem gera o ponto $m = [u, v]^T$ no plano imagem (ZHANG, 2004).

Figura 26 – Modelo computacional da câmera *pinhole*.



Fonte: (BUSCHINELLI, 2017) adaptado de (ZHANG, 2004)

Este modelo pode ser representado na forma matricial, conforme a equação abaixo:

$$m = K[R \ t]M = PM, \quad (3)$$

Onde:

$$K = \begin{bmatrix} f_u & \gamma & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\gamma = f_u \cot(\tilde{\theta}). \quad (5)$$

Nas expressões acima, a matriz K define os parâmetros intrínsecos da câmera, (f_u , f_v) correspondem aos fatores de escala da imagem nos eixos X e Y respectivamente; γ representa a diferença de alinhamento angular entre os eixos u e v . Normalmente, quando se trata de pixels quadrados, considera-se $f_u = f_v$ e $\gamma = 0$, devido o ângulo entre eixos, $\tilde{\theta}$, ser 90° (ZHANG, 2004).

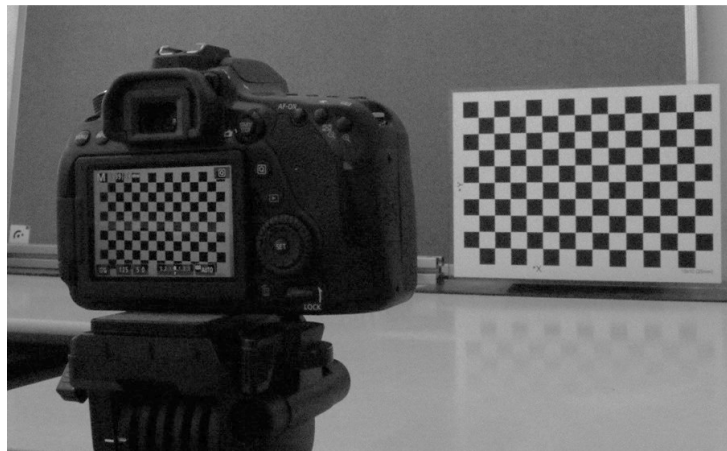
Os parâmetros extrínsecos definem a orientação e posição da câmera. Os parâmetros extrínsecos da câmera são regidos pela matriz de rotação R e o vetor de translação t . Representam a transformação do sistema de coordenadas global do objeto (SCO) para o da câmera (SCC). P é a matriz de projeção, que contempla os parâmetros intrínsecos e extrínsecos.

2.7.4 Calibração de câmera *pinhole* e distorções

Para extração de informações geométricas (ângulos, distâncias, comprimento etc.), de uma cena através de imagens, é necessário que se conheça muito bem os parâmetros da câmera. O levantamento desses parâmetros é feito através de uma calibração, que pode ser realizada a priori, a posteriori ou então durante a medição (autocalibração), onde dados da própria cena são utilizados.

Os primeiros algoritmos de calibração utilizavam padrões 3D (TSAI, 1987), e normalmente estes padrões de calibração são compostos por dois planos ortogonais com um padrão de quadrados bem conhecidos em suas faces. Em sequência novos métodos de calibração foram propostos, entre eles, com a utilização de padrões 2D (ZHENGYOU ZHANG, 1999). Alternativamente foram propostos alguns algoritmos de calibração que utilizam objetos de uma única dimensão (1D) para realizar a calibração de sistemas monoculares (ZHANG, 2004), ou sistemas estéreo (DE FRANÇA, 2005). A Figura 27 demonstra um exemplo de padrão 2D utilizado para calibração de câmeras.

Figura 27 - Exemplo de um padrão de calibração 2D visualizado pela câmera.



Fonte: Autor.

A calibração de câmeras consiste na aquisição de imagens de um padrão e posterior processamento, onde aplica-se as relações de correspondência entre os pontos do padrão e suas respectivas projeções no plano imagem, tornando assim possível determinar os parâmetros da câmera.

O modelo *pinhole* é muito utilizado pelo fato de ser bastante simples, e permite a utilização de equações para ajuste de distorções. A modelagem consiste em uma simplificação matemática do raio proveniente do objeto para um ponto no sensor da câmera. A modelagem matemática clássica para a compensação das distorções radiais e tangenciais na lente é a descrita em (BROWN, 1971). O mapeamento das coordenadas distorcidas (x_d, y_d) , que são captadas pelas câmeras, para as coordenadas corrigidas (x_c, y_c) , de acordo com as equações abaixo (HEIKKILA; SILVEN, 2002)(HERNIOU, [s.d.]):

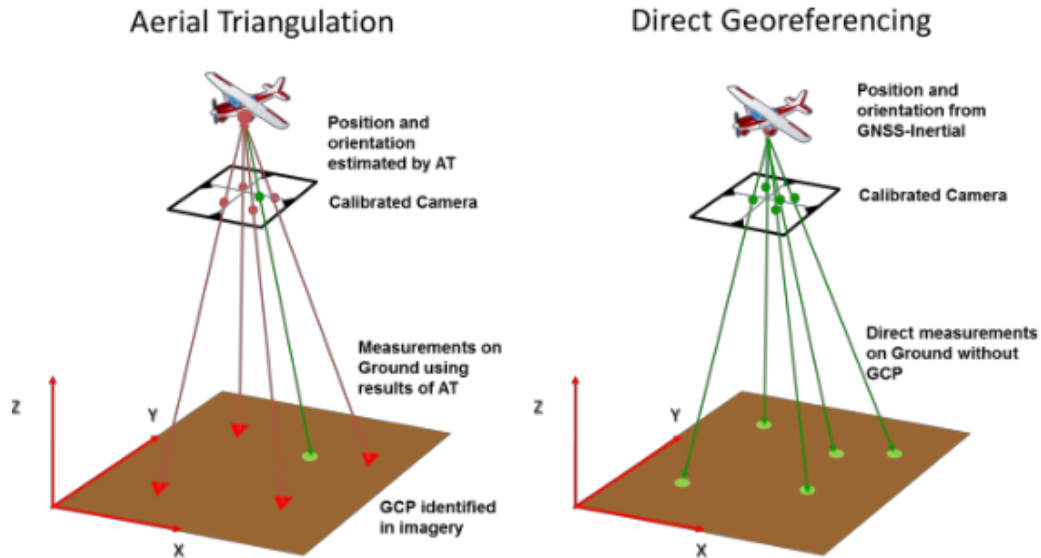
$$\begin{aligned} x_c &= x_d + \bar{x}_d(k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + k_3 r_d^6) + (p_1(r_d^2 + 2\bar{x}_d^2) + 2p_2 \bar{x}_d \bar{y}_d) \\ y_c &= y_d + \bar{y}_d(k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + k_3 r_d^6) + (p_1(r_d^2 + 2\bar{x}_d^2) + 2p_2 \bar{x}_d \bar{y}_d), \end{aligned} \quad (6)$$

Onde: $\bar{x}_d = x_d - u_0$, $\bar{y}_d = y_d - v_0$, $r_d^2 = \bar{x}_d^2 + \bar{y}_d^2$ e k_1, k_2, k_3 são coeficientes da distorção radial, p_1 e p_2 coeficientes da distorção tangencial e r_d o raio do ponto na imagem em relação ao ponto principal $p_0 = (u_0, v_0)$.

Em tarefas realizadas com RPAS, o método tradicional utilizado para determinação da orientação indireta do sensor é o *self-calibrating bundle adjustment*, o qual permite realizar uma estimativa dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos de cada imagem a partir de pontos notáveis da textura da cena ou pontos de controle *Ground Control Points* (GCPs) localizados na cena. Portanto, a quantidade de GCPs, e a forma como e realizada sua distribuição na cena influenciam fortemente a precisão de reconstruções fotogramétricas (REMONDINO et al., 2012).

Com a utilização de RPAS, que disponibilizam sistema GNSS e INS embarcados, é possível determinar a posição e orientação da câmera, e cada ponto da imagem é georreferenciado ao objeto. Esta orientação direta do sensor pode eliminar a necessidade de GCPs quando estão disponíveis dados de GNSS e RTK com erro de posicionamento da ordem de dezenas de milímetros (MIAN et al., 2015).

Figura 28 – Conceito de posição e orientação de imagens através de triangulação e georreferenciadas.



Fonte: Adaptado de (MIAN et al., 2015).

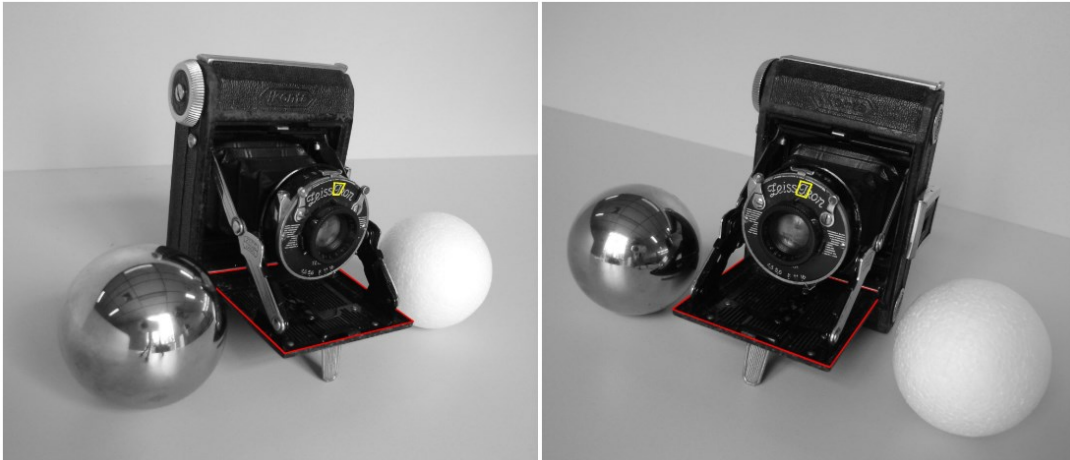
A Autocalibração apresenta a vantagem de eliminar os erros provenientes das diferenças entre o local de aquisição, iluminação ou temperatura do local da calibração (LUHMANN, 2010).

2.7.5 Identificação de pontos correspondentes

A identificação de pontos correspondentes é considerada um problema clássico na fotogrametria. A Figura 29 ilustra duas imagens de ângulos diferentes da mesma cena, onde é possível identificar regiões com características homogêneas que dificultam a correspondência de pontos, são elas: as duas esferas, uma com superfície reflexiva e outra branca fosca, além de regiões oclusas, como por exemplo a base da câmera destacada em vermelho.

A imagem também contém regiões que apresentam características ideais para correspondência, um exemplo de uma região com boa textura é a letra na parte superior da lente destacada em amarelo. Existem diversas técnicas para identificação de pontos correspondentes na fotogrametria, algumas delas estão descritas em (SCHARSTEIN, DANIEL; SZELISKI, 2003) e são apresentadas na sequência.

Figura 29 – Exemplo de aquisições de ângulos diferentes da mesma cena, onde é possível visualizar diferentes texturas, superfície reflexiva e superfície monótona.



Fonte: (HOFMANN, 2006).

Identificação de pontos correspondentes sem projeção (técnica passiva)

A identificação de pontos correspondentes de forma passiva depende da textura heterogênea existente na cena, ou seja, regiões que contém detalhes que apresentam uma assinatura própria, possibilitando a utilização de técnicas de detecção de bordas e correlação (HARRIS, C.;STEPHENS, 1988) (CHU; RANSON; SUTTON, 1985).

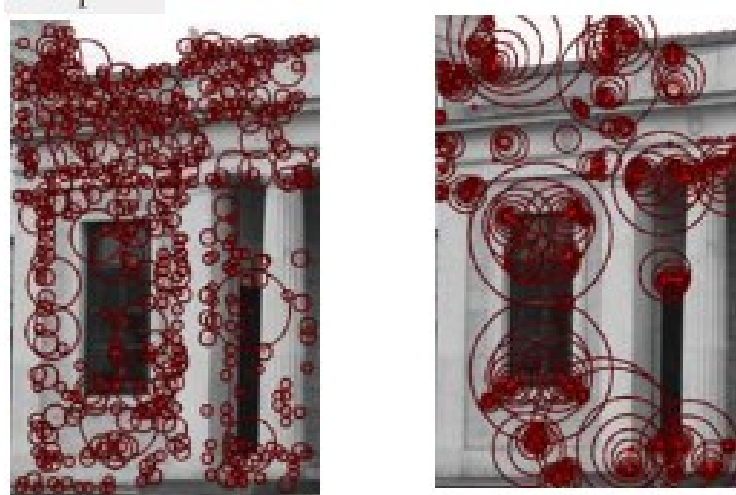
Usualmente a correlação espacial de pontos em duas imagens consiste na definição de uma janela de referência em uma imagem e de um valor de limiar prévio para correspondência, realizando a busca em uma janela de procura na imagem seguinte, a região que corresponder a um valor superior ao limiar pré-estabelecido é adotada como equivalente. Existem limitações que influenciam o processo de correlação espacial, entre os principais podem ser citados: problema da parede branca ou homogeneidade na cena; superfícies reflexivas; transformações geométricas; oclusões e ruídos (CHU; RANSON; SUTTON, 1985).

Identificadores de regiões

Mais recentemente surgiu a técnica SIFT (*Scale-invariant feature transform*), que é um algoritmo usado em softwares de visão computacional, e comunidades de processamento de imagem digital, para detectar e descrever as características de locais em imagens. O algoritmo é composto pelo detector que utiliza cálculos de diferenças gaussianas e o descritor que adota histogramas de gradiente orientados. É executado em quatro etapas: detecção de extremos, localização de pontos-chave, definição da orientação e descrição dos pontos-chave. SIFT *key points* são invariantes para escala, rotação e até mesmo parcialmente invariável para

diferenças de iluminação (YOUSEF et al., 2015). Normalmente um detector de pontos é utilizado para identificação de pontos de interesse e posteriormente uma região invariante elíptica é extraída em torno de cada ponto (REMONDINO, 2011).

Figura 30 – Exemplo de regiões correspondentes extraídos através de detectores



(a) Extração de regiões invariantes a escala com os detectores DoG

(b) regiões afins invariantes com Harris-affine

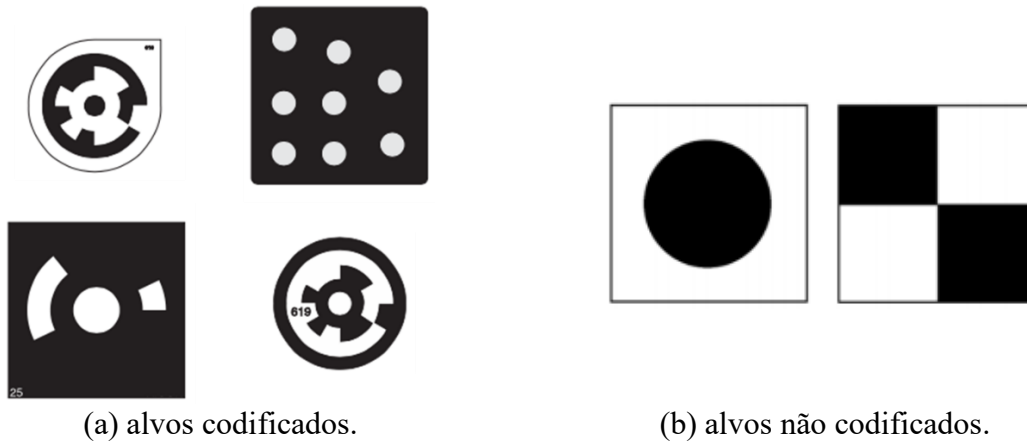
Fonte: Adaptado de (REMONDINO, 2011).

Alvos e escalas

Um método muito utilizado em medições fotogramétricas para auxiliar na correspondência de pontos consiste na utilização de alvos distribuídos pela cena, que são figuras com textura e contraste quase ideais, com fácil identificação por software.

Podem conter geometria específica estabelecendo assim códigos que permitem identificação automática através de software ou não apresentar um código específico. A Figura 31 apresenta exemplos de alvos codificados e não codificados.

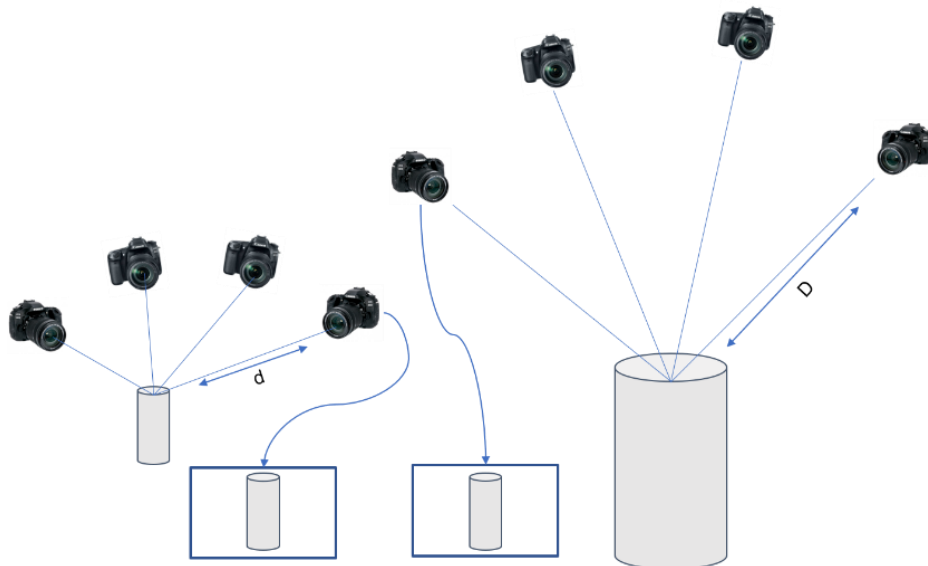
Figura 31 – Exemplos de alvos utilizados na fotogrametria



Fonte: (WNBC, 2020) (AGISOFT, 2019).

Destaca-se que em sua essência a fotogrametria é uma técnica adimensional, um exemplo que explica esta condição é apresentado na Figura 32, onde dois objetos de tamanho distintos são fotografados de distâncias diferentes, fazendo com que as imagens adquiridas de ambos aparentemente tenham o mesmo tamanho.

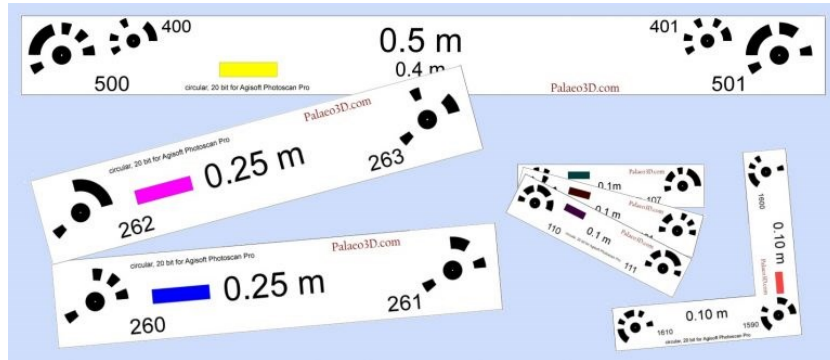
Figura 32 – Exemplo de objetos com tamanhos diferentes fotografados de distância distintas resultam em imagens muito próxima uma da outra.



Fonte: Autor.

Desta forma, para quantificar e conseqüentemente efetuar medições a partir da fotogrametria, é necessário adicionar informações para que medidas possam ser extraídas do processo. Uma forma de adicionar informações à cena é utilizar escalas calibradas, normalmente constituídas de alvos cujas distâncias entre os centros são muito bem conhecidas. A Figura 33 apresenta um exemplo de escala montada com alvos codificados (DE LIMA, 2006) (PINTO, 2010).

Figura 33 – Exemplo de escalas que utilizam alvos codificados.



Fonte: (PALAEO3D, 2020).

Normalmente são utilizadas mais de uma escala na cena, sendo que uma parte é utilizada para atribuir escala e outra serve para avaliar o erro da medição, comparando a dimensão calibrada da escala com o valor de medição obtida na reconstrução. É recomendado no mínimo duas escalas na cena, dispostas em mesmo sentido para análise e que os alvos estejam presentes em pelo menos quatro imagens. (BARAZZETTI, 2017).

É possível determinar o centro do alvo através da identificação do centroide quadrático em níveis de cinza, que pode ser realizado através das seguintes equações:

$$i_c = \frac{\sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^k I(i,j)^2 \cdot i}{\sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^k I(i,j)^2} \quad (7)$$

$$j_c = \frac{\sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^k I(i,j)^2 \cdot j}{\sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^k I(i,j)^2} \quad (8)$$

onde (i_c, j_c) são as coordenadas do centro do alvo inserido na imagem, $I(i, j)$ a intensidade do pixel i, j e (k, s) o tamanho das janelas em análise (SHORTIS, M; CLARKE, T; SHORT, 1994) (PINTO, 2010).

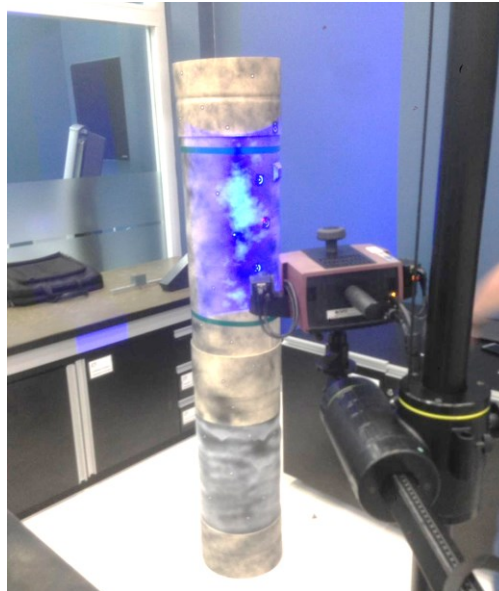
Identificação com projeção (ativa)

Para contornar as limitações que a identificação passiva enfrenta, por exemplo, regiões com pouca ou nenhuma textura, é possível adicionar informações à cena através da projeção de uma fonte de luz externa, laser ou projetor. Um exemplo típico é a técnica de projeção de franjas, que permite a identificação de pontos correspondentes pela fase, otimizando assim o processo de busca por pontos homólogos (FANTIN, 1999)(G. MAAS, 1992).

Os padrões projetados através de projetores podem ser do tipo *Speckle*, padrões aleatórios ou ter alguma geometria específica, como por exemplo pontos. Lasers com elementos difrativos podem ser utilizados formando assim padrões em linha ou pontos (LUHMANN et al., 2014).

Existem sistemas comerciais que adotam este princípio, entre eles pode-se citar o *ATOS SCAN BOX*⁴, um equipamento de medição de superfícies que utiliza projeção de franjas aliado a configuração de visão estéreo. Esta técnica necessita que a posição relativa entre objeto e sistema de medição permaneça imóvel durante a projeção das franjas e aquisição das imagens. Um exemplo deste tipo de medição pode ser observado na Figura 34.

Figura 34 – Sistema de medição estéreo com projeção de franjas GOM Atos Scan Box.



Fonte: Autor.

2.7.6 Triangulação entre pontos (*bundle adjustment*) e alinhamento das imagens

A partir da detecção dos pontos homólogos no plano imagem do sensor da câmera, é feita a triangulação para determinar a coordenada 3D do ponto no espaço através da projeção desses pontos.

No processo de aquisição de uma imagem ocorre um mapeamento da cena tridimensional em um plano, imagem, bidimensional, acarretando a perda da informação tridimensional da cena, assim, com apenas uma imagem não é possível projetar os pontos 3D

⁴ GOM Atos - Digitalizadores Industriais que fornece digitalizações precisas com resolução detalhada em altas velocidades (GOM, 2020).

no espaço. Portanto, é necessário no mínimo duas imagens para realização da triangulação entre pontos (DE LIMA, 2006).

No entanto, erros provenientes de ruídos presentes no processo de aquisição impactam no encontro das duas linhas de projeção, e conseqüente posicionamento do ponto. A partir de uma estimativa inicial da posição dos pontos tridimensionais da cena e os parâmetros intrínsecos e extrínsecos de cada ponto, efetua-se o cálculo das coordenadas tridimensionais do objeto através de uma otimização simultânea, denominada de *bundle adjustment* (TRIGGS, 1982).

Estes feixes correspondem às linhas de projeção que partem de pontos do objeto, passam pelo centro óptico da lente e são projetados no sensor da câmera para cada aquisição, permitindo assim, realizar um ajuste simultâneo dos raios, solucionando um problema de otimização, minimizando a função erro (HARTLEY, 2004)(PINTO, 2010).

Este processo permite estabelecer que, para j pontos 3D no espaço \mathbf{M}_j captados por diferentes posições da câmera i , e conhecendo a matriz de projeção da câmera \mathbf{P}_i , pode ser escrito da seguinte forma:

$$\mathbf{m}_{ji} = \mathbf{P}_i \mathbf{M}_j, \quad (9)$$

Onde, \mathbf{m}_{ji} são as coordenadas da imagem do j -ésimo ponto tridimensional na i -ésima imagem. Portanto, as soluções ótimas das matrizes \mathbf{P}_i e das coordenadas 3D \mathbf{M}_j são encontradas pela mínima soma dos quadrados dos erros através da equação abaixo: (ATKINSON, 1996)(HARTLEY, 2004).

$$\min_{\mathbf{P}_i, \mathbf{M}_j} = \sum_i \sum_j d(\mathbf{P}_i, \mathbf{M}_j, \mathbf{m}_{ij})^2, \quad (10)$$

2.7.7 Visão estéreo

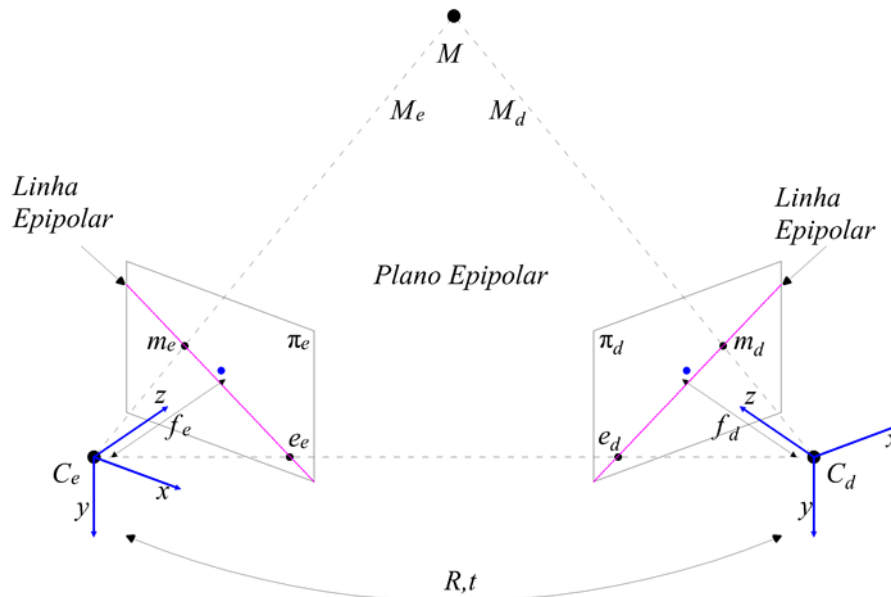
A visão estéreo pode ser considerada um caso particular da fotogrametria também denominada estereofotogrametria, onde as informações são extraídas e processadas a partir de pares de imagens. Esta técnica tem seu princípio de funcionamento inspirado na percepção de tridimensionalidade dos seres humanos, uma vez que os dois olhos observam uma mesma cena, a partir de ângulos distintos, e o cérebro infere a distância ou a profundidade (PINTO, 2010).

Através de aquisições simultâneas de duas imagens é possível ter a percepção de profundidade de um ponto, isto é realizado considerando que a profundidade é inversamente

proporcional a disparidade, que pode ser calculada através da diferença da coordenada no sensor de cada câmera de um mesmo ponto no objeto (KOHLENER, 2012)

Em um sistema estéreo, utiliza-se duas câmeras, modeladas como *pinhole*, adotando os parâmetros intrínsecos, que podem ser observados na Figura 35. Os parâmetros extrínsecos, estabelecem uma relação de transformação que relaciona o sistema de coordenadas das duas câmeras, isto é definido por um vetor de translação $\mathbf{t} = (C_d - C_e)$, e uma matriz de rotação \mathbf{R} . Esses parâmetros tipicamente representam a transformação do SCC esquerda para o da direita. A Figura 35 representa as relações de um sistema estéreo onde é possível observar os centros de projeção em C_e e C_d e seus planos imagem π_e e π_d . Assim cada câmera possui um sistema de coordenadas tridimensional, onde a sua origem tem coincidência com o centro de projeção e o eixo Z é perpendicular a imagem e passa pelo centro de projeção (RICHARD HARTLEY, 2003).

Figura 35 – Relações de um sistema estéreo contendo: parâmetros intrínsecos, extrínsecos e geometria epipolar.



Adaptado de (ATKINSON, 1996).

Os vetores $\mathbf{M}_e = [X_e, Y_e, Z_e]^T$ e $\mathbf{M}_d = [X_d, Y_d, Z_d]^T$, são estabelecidos para o mesmo ponto \mathbf{M} , nos sistemas de coordenadas das câmeras pela equação:

$$\mathbf{M}_d = \mathbf{R}(\mathbf{M}_e - \mathbf{t}) \quad (11)$$

Sendo: \mathbf{t}_e , \mathbf{R}_e e \mathbf{t}_d , \mathbf{R}_d os parâmetros extrínsecos de ambas as câmeras do sistema, os parâmetros extrínsecos do sistema podem ser obtidos pelas equações: (PINTO, 2010)(STIVANELLO, 2008).

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_d \mathbf{R}_e^T \quad (12)$$

$$\mathbf{t} = \mathbf{t}_e - \mathbf{R}^t \mathbf{t}_d \quad (13)$$

É possível realizar uma otimização estéreo, onde os parâmetros intrínsecos e extrínsecos são ajustados, considerando que a posição relativa entre as câmeras é fixa. No entanto, a posição que adota-se como referência é arbitrária, existem algoritmos que adotam posicionamento da câmera esquerda como referência e posicionam a direita em relação a esta, como e o caso da *toolbox* clássica de calibração de câmeras para o Matlab (BOUGUET, 2019).

A geometria epipolar pode ser utilizada para auxiliar a correspondência de pontos em pares de imagens, pois ela restringe a busca pelos pares homólogos de pontos a apenas uma linha (RICHARD HARTLEY, 2003).

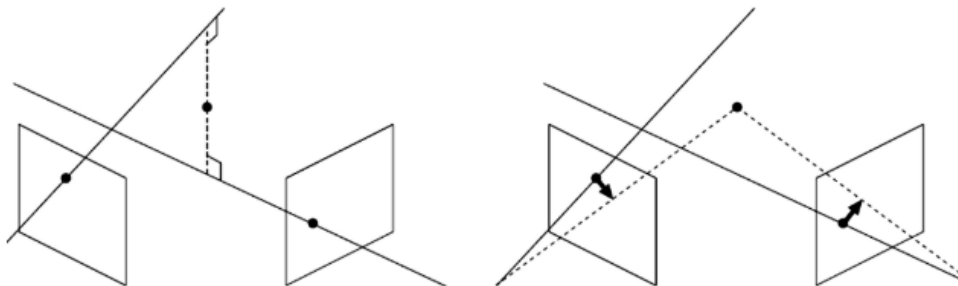
No entanto, devido às não idealidades, as linhas de projeção nem sempre se interceptam. Uma solução é através da combinação de duas equações $\mathbf{m}_e = \mathbf{P}_e \mathbf{M}$ e $\mathbf{m}_d = \mathbf{P}_d \mathbf{M}$, o que retorna quatro equações lineares em \mathbf{M} que podem ser descritas por $\mathbf{B} \cdot \mathbf{M} = 0$. Onde \mathbf{B} é uma matriz 4x4. Assim o ponto \mathbf{M} , torna-se um problema, pois não se enquadra nas restrições epipolares, não sendo uma estimativa ótima (RICHARD HARTLEY, 2003) (PINTO, 2010).

É possível então adotar uma estimativa inicial linear, imputá-la em um método não-linear e encontrar um ponto \mathbf{M}' que satisfaça as restrições epipolares $\mathbf{m}_e' = \mathbf{P}_e \mathbf{M}'$ e $\mathbf{m}_d' = \mathbf{P}_d \mathbf{M}'$. Ou seja, utilizando os pontos \mathbf{m}_e e \mathbf{m}_d , é possível determinar \mathbf{m}_e' e \mathbf{m}_d' que minimizam a função:

$$C(\mathbf{m}_e, \mathbf{m}_d) = d(\mathbf{m}_e, \mathbf{m}'_e)^2 + d(\mathbf{m}_d, \mathbf{m}'_d)^2 \quad (14)$$

Sendo d a distância euclidiana entre os pontos. Assim, existe uma equivalência na minimização dos erros de reprojeção de \mathbf{M}' , resultando em uma solução ótima, representado na Figura 36 (KANATANI; SUGAYA; NIITSUMA, 2008) (PINTO, 2010).

Figura 36 – Exemplo de duas técnicas de triangulação: ponto médio a esquerda e correção ótima a direita.



Fonte: (PINTO, 2010).

2.7.8 Reconstrução de superfícies

O processo de reconstrução de superfícies é realizado através dos dados (pontos) extraídos a partir da forma da superfície real. As superfícies reconstruídas podem ser representadas da seguinte forma (PINTO, 2010):

- Nuvem de pontos: quanto maior o número de pontos, maior é a semelhança entre a representação e o objeto original.
- Malhas ou *mesh*: os pontos da representação podem ser ligados através de segmentos de retas ou curvas, originando uma visão facetada numa *wireframe* (estrutura de “arames”).
- Segmentos de superfícies: os pontos da superfície que não estão sobre o *wireframe* também são representados, interpolando informação sobre todos os pontos amostrados, gerando uma representação não ambígua.
- Sólidos: possibilita a distinção das propriedades de dentro e fora do objeto, fornecendo uma visão volumétrica do objeto.

Considerando a necessidade da indústria de melhoria em um processo de inspeção, as técnicas e tecnologias apresentadas, a seguir, apresenta-se a proposta deste trabalho para a realização da medição de cenas não preparadas para a aplicação a curta distância com a utilização de RPAS.

3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO PROPOSTO

Neste capítulo discute-se a aplicação proposta e as funções a serem atendidas pelo sistema desenvolvido.

3.1 APLICAÇÃO PROPOSTA

A técnica proposta neste trabalho visa o estudo e avaliação de um sistema para medição e reconstrução 3D, embarcado em RPAS, de cenas em locais de difícil acesso que inviabilizam a aplicação de escalas ou alvos na cena ou objeto da medição.

3.2 FUNÇÕES A SEREM ATENDIDAS PELO SISTEMA

O sistema apresentado neste trabalho incorpora diversas funções que buscam viabilizar a medição de cenas, não preparadas, utilizando sistema estéreo embarcado em um veículo tipo RPA. A ideia fundamental é utilizar a informação da distância entre as câmeras do sistema estéreo, *baseline*, que é determinada através de um procedimento de calibração prévia, como uma informação adicional para a definição de escala na reconstrução fotogramétrica. Esta técnica busca utilizar as vantagens do *bundle adjustment* do *software* comercial adotado e a informação de escala proveniente da distância entre as câmeras do sistema estéreo.

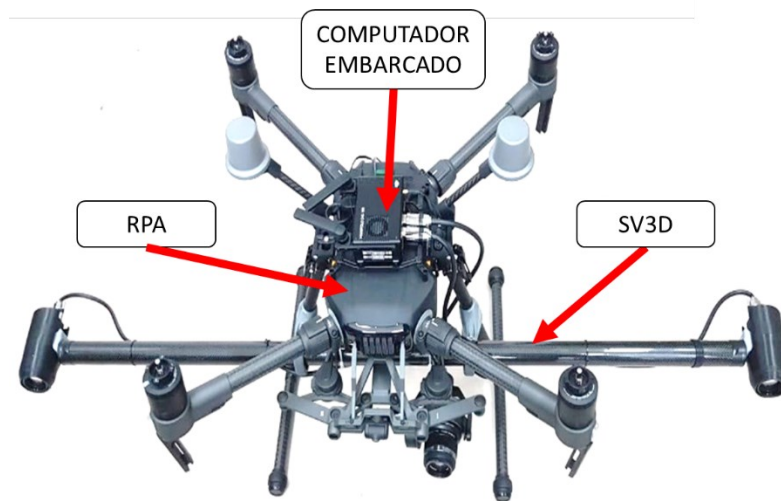
3.3 CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS

A técnica desenvolvida busca realizar medições fotogramétricas com a utilização de RPAS que permitam a quantificação de defeitos típicos em superfície de *riser* em ambiente externo. A magnitude típica dos defeitos encontrados nestes componentes é da ordem de 10 mm x 10 mm x 7 mm ou maiores.

A inspeção de *risers* em estruturas *offshore* apresenta um requisito de segurança relacionado a distância mínima de aproximação, *standoff*, entre o RPA e a estrutura, correspondente a aproximadamente 5 metros. Em um sistema de visão estéreo, a incerteza na medição da distância é função da razão entre o quadrado da distância a ser medida e o comprimento do *baseline*. No entanto, as características do RPAS limitam o comprimento do *baseline*, que foi construído com uma distância próxima a 1m.

O sistema desenvolvido foi projetado e construído de forma a obedecer a um compromisso entre a melhor qualidade de medição, maior resolução de câmera, aquisições em um curto período de exposição e gravação além de ser construído com materiais leves que permitam se adequar ao limite do *payload* do RPA permitindo assim uma maior durabilidade da bateria. A Figura 37 apresenta o sistema montado no RPA.

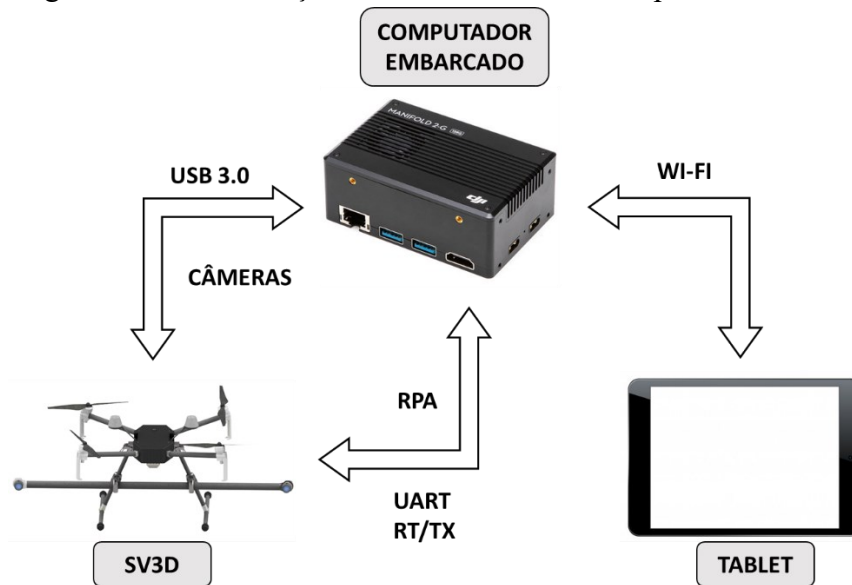
Figura 37 – SV3D e computador embarcado montado no RPA.



Fonte: Autor.

Durante o voo as aquisições são realizadas através de comandos enviados por um tablet ao computador embarcado. A Figura 38 apresenta o fluxograma geral de comunicação entre os subsistemas, onde é detalhado a comunicação via USB 3.0 entre as câmeras e o computador embarcado e via Wi-Fi entre o tablet e o computador embarcado.

Figura 38 – Diagrama de comunicação entre as câmeras, o computador embarcado e o tablet.



Fonte: Autor.

O processo de medição é realizado conforme as etapas a seguir:

- Inicia-se o RPA e o computador embarcado;
- Realiza-se a conexão entre o tablet ao computador embarcado via WI-FI;
- Inicia-se o sistema que permite as aquisições;
- Inicia-se o voo e realiza-se as aquisições;
- Processa as imagens em laboratório.

3.4 MATERIAIS E MÉTODOS

As próximas seções apresentam as especificações e configurações do sistema, características metrológicas, comunicação entre o RPAS e o SV3D, barras de escalas, padrões e corpos de prova utilizados além das técnicas e algoritmos desenvolvidos os materiais, fabricação, montagem e calibração de padrões, e métodos utilizados nas avaliações.

3.5 AERONAVE UTILIZADA

O RPAS utilizado no trabalho foi o *Matrice 210 RTK V2* produzido pela DJI, uma plataforma da série *Enterprise*, com *payload* de 1,23 kg e tempo de voo de aproximadamente 22 minutos. O *Payload* corresponde a massa de todos os acessórios embarcados na aeronave, não necessários à operação desta. O RPAS é dotado de sensores internos que auxiliam na

navegação e posicionamento, sendo: Receptores GNSS com incertezas da ordem de $\pm 0,5$ m na vertical e $\pm 1,5$ m na horizontal, podendo chegar a $\pm 0,1$ m e $\pm 0,3$ m com o sistema de visão inferior ligado. Com a utilização da técnica de RTK habilitada a incerteza de posicionamento é da ordem de $\pm 0,1$ m em ambas direções (DJI, 2019b). A aeronave é controlada através do controle remoto DJI Cendence S para Matrice série 200. No entanto, o aumento do *payload* reduz o tempo de duração das baterias em voo desta plataforma e são considerado limitações para algumas aplicações industriais. No trabalho foi utilizado a tela DJI *Crystal Sky*, porém o controle é compatível com dispositivos com sistema operacional Android ou IOS. A Figura 39 apresenta o (a) RPAS e o (b) controle utilizado.

Figura 39 – Conjunto RPAS e controle utilizado nos experimentos.



(a) RPAS Matrice 210 RTK V2 da DJI.



(b) Controle *Cendence* com *Crystal Sky* da DJI.

Fonte: (DJI, 2019b).

Dentre as principais características do controle pode-se citar (DJI, 2019b):

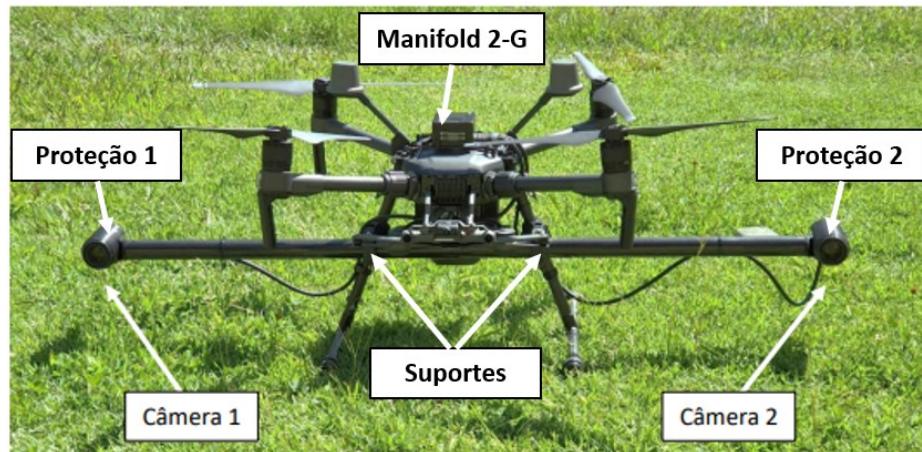
- Frequência de operação de 2.400-5.850GHz.
- Distância máxima de transmissão em ambiente livre de interferência de 8 km.
- Permite a utilização de dispositivos com sistema operacional Android ou IOS como tela.
- Tela utilizada: Crystal Sky Monitor da DJI com 7,85 polegadas, resolução de 2048x1536 e sistema operacional Android 5.1.

3.6 SISTEMA DE VISÃO ESTÉREO PARA MEDIÇÃO 3D (SV3D)

A Figura 40 apresenta o SV3D desenvolvido para o trabalho, onde é possível identificar: as duas câmeras *Global shutter*, suportes do sistema estéreo e capa de proteção das

câmeras. Por se tratar de um sistema acoplado a uma unidade RPA, o sistema de medição está sujeito as vibrações provenientes da aeronave e outras fontes. A resolução espacial teórica para o conjunto adotado corresponde a 0,35 mm/pixel @5m, com um campo de visão de aproximadamente 1403 mm x 1035 mm.

Figura 40 - RPAS DJI M210 RTK v2 com o sistema estéreo acoplado, composto por: haste, suportes, câmeras, lentes e computador de bordo DJI *Manifold 2*.



Fonte: Autor.

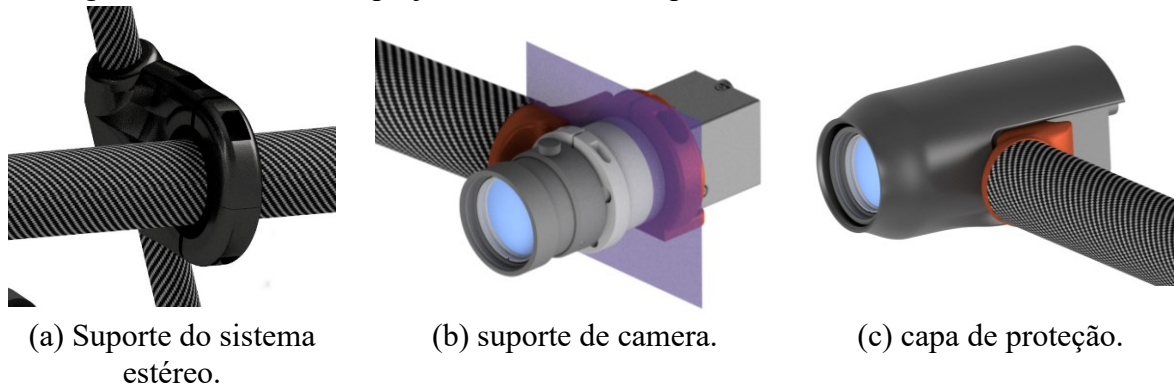
As câmeras utilizadas são modelo FS-U3-123S6C-C com sensor *global shutter* com resolução de 4096 x 3000 pixels produzida pela FLIR (FLIR, 2018) e lentes Schneider com comprimento focal de 50 mm e abertura máxima de 2.0. A conexão entre a câmera e o computador embarcado é realizada através de dois cabos USBs 3.0, com aproximadamente 600 mm de comprimento.

O projeto mecânico foi desenvolvido de modo a permitir a integração do sistema ao RPAS. Realizou-se as montagens e testes preliminares até chegar à configuração adequada. Na concepção da estrutura de fixação dos componentes buscou-se a configuração que oferecia baixos custos de fabricação e massa reduzida, além de minimizar as vibrações proveniente do RPAS.

A estrutura desenvolvida em conjunto com a equipe do projeto VANT3D é composta por um tubo de fibra de carbono e elementos em ABS⁵ construídos com o auxílio de impressora 3D, são eles: suporte do sistema estéreo, suporte e capa de proteção das câmeras além de elementos de fixação. A Figura 41 apresenta as imagens do projeto mecânico.

⁵ Acrilonitrila butadieno estireno (ABS) – Polímero termoplástico utilizado para manufatura 3D.

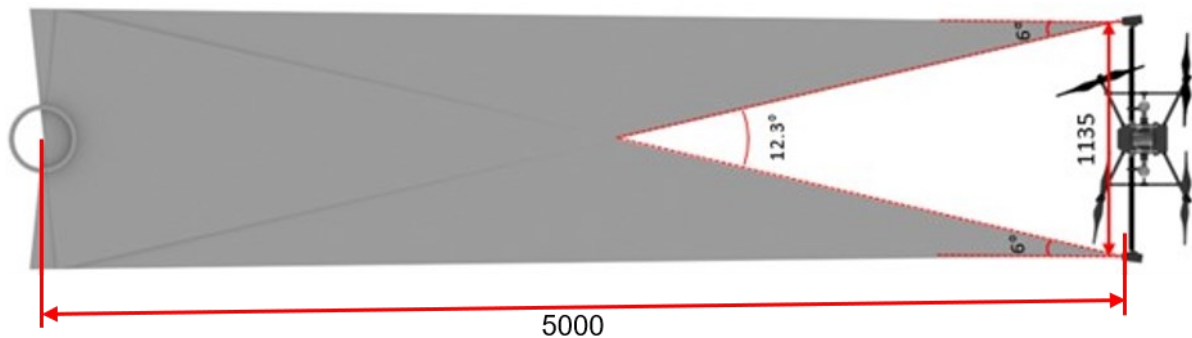
Figura 41 – Detalhes do projeto mecânico do suporte do sistema estéreo e da câmera.



Fonte: Projeto VANT3D.

A partir das especificações do sensor e lente, desenvolveu-se o projeto óptico que permitiu determinar o ângulo das câmeras em relação à distância do objeto, alvo da medição, conforme mostra a Figura 42.

Figura 42 – Vista superior da configuração de câmeras do sistema estéreo.



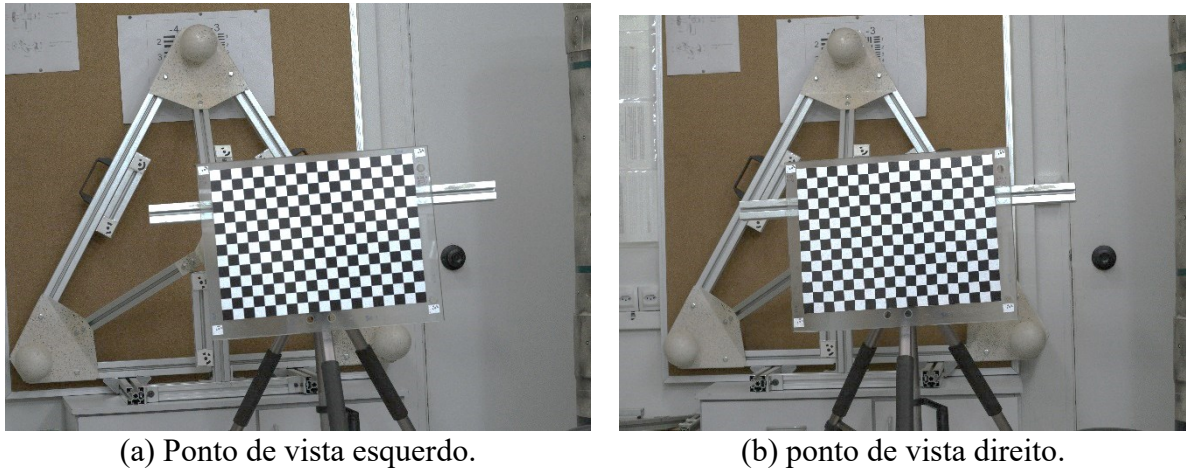
Fonte: Projeto VANT3D.

3.6.1 Calibração de câmeras do SV3D

Para uma boa calibração de câmeras o procedimento adotado é fundamental para um bom desempenho, assim adotou-se os seguintes procedimentos: efetua-se a aquisição de várias imagens; um *network* com alta convergência e redundância; efetua-se a variação em *roll* entre as aquisições; com o comprimento focal fixo (FRASER, 2018).

Foi realizada a aquisição de 27 pares de imagens para a calibração. As imagens foram adquiridas com o volume de medição estabelecido a uma distância aproximada de 5 metros do SV3D. Os parâmetros de calibração foram obtidos com a *toolbox* para Matlab, de Jean-Yves Bouguet, disponível *online* (BOUGUET, 2019). Um par de imagem estéreo pode ser visualizado na Figura 43, sendo (a) ponto de vista esquerdo; (b) ponto de vista direito.

Figura 43 - Uma das aquisições do padrão 2D tipo xadrez durante a calibração.



(a) Ponto de vista esquerdo.

(b) ponto de vista direito.

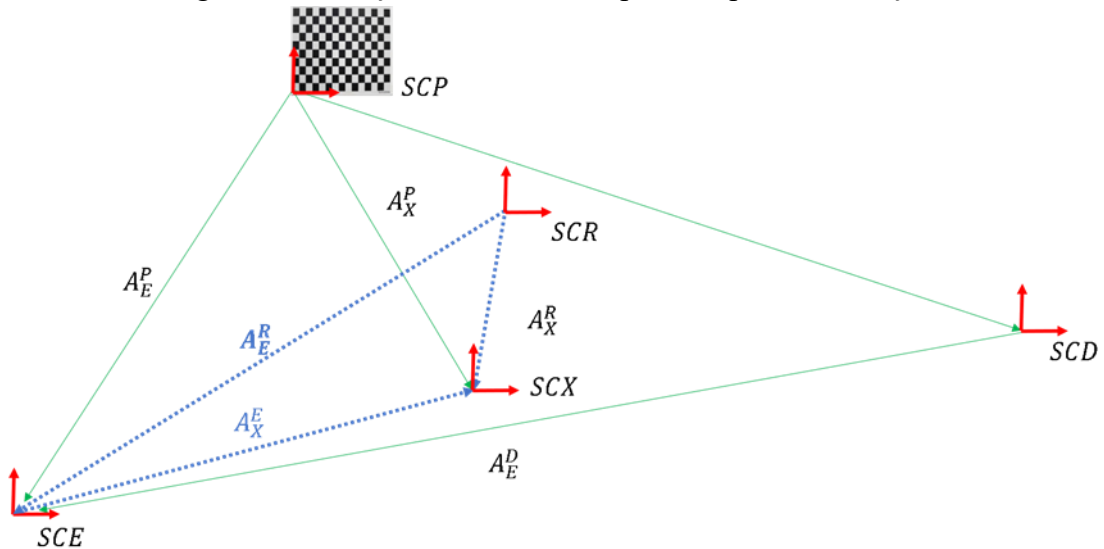
Fonte: Autor.

3.6.2 Calibração entre o SV3D e o RPAS

Para relacionar o sistema desenvolvido com o drone comercial que foi acoplado, tornou-se necessário realizar uma calibração entre ambos. A calibração do SV3D em relação ao RPAS foi realizada com o auxílio da câmera comercial da fabricante do RPAS, X5S com lente de 45mm, conforme detalhado no Apêndice D. A transformada da posição do receptor GNSS para o centro da câmera X5S é conhecida e acessada em um arquivo CSV disponibilizado através do LOG de voo com o software *DJI Assistant* para cada aquisição realizada.

Na Figura 46 as setas verdes representam as transformações encontradas através da calibração de câmeras com o padrão 2D (A^{SCP}). As setas azuis representam a posição relativa entre o RPAS e as câmeras do SV3D, através das transformações determinadas, para uma mesma pose do padrão visto pelas câmeras do SV3D e da X5S. O apêndice D apresenta em detalhes o processo de calibração.

Figura 44 - Posições calculadas do padrão após a calibração.



Fonte: Autor.

Aplicou-se esta transformada entre a posição do receptor GNSS e as câmeras do SV3D de forma a possibilitar a utilização das informações de postura do RPAS nas reconstruções.

3.7 COMUNICAÇÃO ENTRE O RPAS E O SV3D

Uma das características do equipamento, que contribuiu para a realização do trabalho, é sua compatibilidade com o computador de bordo através da disposição de portas USB, alimentação e terminais digitais de comunicação I/O tipo TTL (interface RX/TX).

Para tornar possível a utilização do SV3D integrado ao RPAS utiliza-se o DJI *Manifold 2-G* (MF2G), que será apresentado nos próximos tópicos e é composto por uma placa de desenvolvimento que possibilita a execução de programas integrados ao RPAS.

A operação do computador embarcado no momento do voo é realizada através de acesso SSH⁶, e pode ser realizada através de um dispositivo com sistema Android.

Desenvolveu-se em conjunto com a equipe do projeto VANT3D um software em C++, utilizando funções do OpenCV para rodar em ambiente ROS Kinetic, Xenial (Ubuntu 16.04), sendo que o fluxo do programa é realizado da seguinte forma:

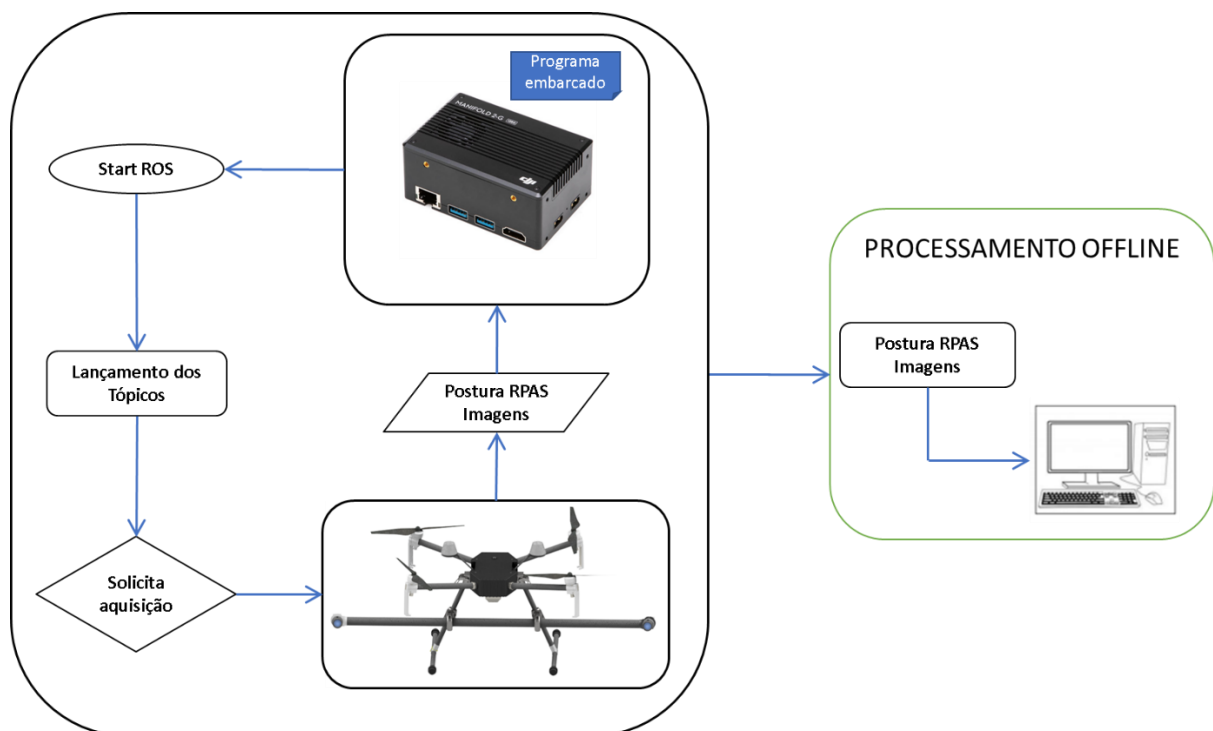
- Inicia-se o lançador do ROS que publica os tópicos (*link* para recebimento de dados) de câmeras e sensores de posição e orientação;

⁶ SSH (Secure Socket shell) é um protocolo de rede que permite aos usuários acessar e gerenciar servidores pela internet

- Após o comando do usuário, é executado um serviço para aquisição simultânea através dos tópicos;
- Retorna e armazena os dados das imagens juntamente com a postura do RPAS.

No esquema da Figura 45 as setas indicam o sentido do fluxo de dados na comunicação.

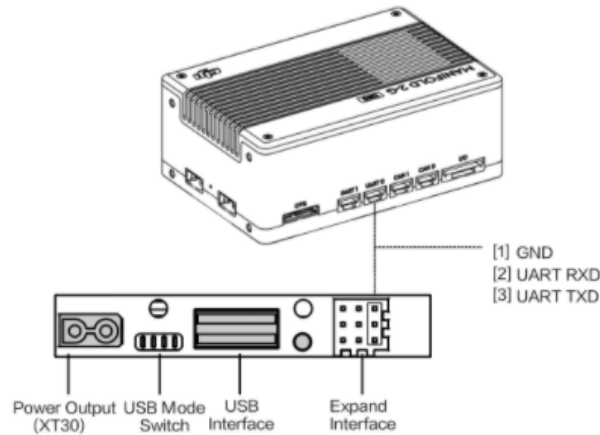
Figura 45 – Fluxo de dados na comunicação entre RPA e SV3D, MF2G e Estação de processamento off-line.



Fonte: Autor.

A comunicação é realizada através de porta USB 3.0, alimentação e interface UART RX/TX disponíveis no MF2G e no M 210 V2, conforme apresenta a Figura 46.

Figura 46 – Esquema de portas da comunicação entre o MF2G e o M 210 V2.



Fonte: (DJI, 2020b).

3.7.1 DJI Manifold 2-G

O *Manifold 2-G* é um computador de bordo compatível com as plataformas *enterprise* da empresa DJI, incluindo os modelos *Matrice 210*, *Matrice 300* e o *Matrice 600*. Possibilita a integração aos sensores internos do RPAS através do kit de desenvolvimento *onboard SDK ROS* (DJI, 2020b). Composto por uma placa NVIDIA® Jetson™ TX2, que disponibiliza portas USB, UART e CAN. A Tabela 1 demonstra as especificações do equipamento.

Tabela 1 – Especificações do DJI Manifold 2-G.

Especificações técnicas	
GPU	Pascal™ GPU arquitetura com 256 NVIDIA CUDA cores
CPU	Dual-Core NVIDIA Denver 2 64-Bit ARM® Cortex®-A57 MPCore
Memória	8 GB 128-bit LPDDR4 Memory 1866 MHz – 59,7 GB/s
Armazenamento	32GB eMMC 5.1 + 128GB
Massa	230 g
Potência	7.5W / 15W

Fonte: (DJI, 2019c).

3.7.2 Robot operating system (ROS)

O *Robot Operating System* (ROS), é um *framework* de código aberto para o desenvolvimento de softwares voltados à robótica. Apresenta uma diversidade de bibliotecas e coleções de ferramentas que possibilitam a padronização da comunicação entre o software desenvolvido e os componentes do robô, sendo: sensores; câmeras; atuadores e recursos de computação distribuídos. O conceito visa simplificar a tarefa de criar um comportamento robusto e complexo de robôs em uma ampla variedade de plataformas robóticas (QUIGLEY; GERKEY; SMART, 2015).

O ROS apresenta os principais serviços esperados de um sistema operacional, incluindo: abstração de hardware; controle de dispositivo de baixo nível; implementação de funcionalidades comumente usadas; troca de mensagens entre processos e gerenciamento de pacotes. Ele descreve um sistema que executa processos utilizando camadas de virtualização entre aplicativos e recursos de computação distribuída com diferentes sistemas operacionais (YOONSEOK PYO, HANCHEOL CHO, LEON JUNG, 2017).

Com a utilização do ROS é possível realizar o lançador do pacote OpenCV (ALLEVATO, 2017) de aquisição das câmeras FLIR juntamente com a *onboard* SDK. Estes softwares estabelecem a comunicação com os diversos sensores e disponibilizam os dados a partir de tópicos no ambiente, é possível publicar e assinar os tópicos dos sensores. Os tópicos são mecanismos de comunicação do tipo *publisher/subscriber* que permitem, por exemplo, a transmitir e receber dados dos sensores.

Para aquisição com o SV3D e armazenamento no *Manifold* utiliza-se um *script* que assina os tópicos relevantes para a aquisição, sendo:

- Imagem esquerda (grava os dados do frame da imagem esquerda);
- Imagem direita (grava os dados do frame da imagem direita);
- Posição GNSS (grava os dados da última posição do sensor GNSS);
- Posição RTK (grava os dados da última posição corrigida pelo RTK);
- Orientação RPAS (grava a última orientação fornecida pela IMU).

3.8 SOFTWARE E HARDWARE

A fase *offline* do processo, ou pós-processamento, é a fase de processamento das imagens e dados para geração da nuvem de pontos 3D e malha. Existem vários softwares,

comercial e *Open Source* que permitem a geração de nuvem de pontos através do processamento fotogramétrico de imagens. O laboratório tem disponível licenças do PIX4D e Agisoft Metashape Professional.

Após testes realizados para um mesmo conjunto de aquisições realizadas a curta distância, os resultados apontaram o Agisoft Metashape como uma ferramenta mais eficaz que o PIX4D, gerando uma nuvem de pontos com maior qualidade. Para reconstrução fotogramétrica, utilizou-se o software comercial Agisoft Metashape Professional V1.5.5⁷, com o auxílio de um script para processamento estéreo, os quais são descritos a seguir.

3.8.1 Software e hardware de processamento fotogramétrico

Os equipamentos, hardware e software utilizados na construção do aparato para a calibração, medição e avaliação foram fornecidos pelo Projeto VANT3D, além de materiais e equipamentos disponíveis no Labmetro. Para avaliação das medições, utilizou-se o software Agisoft Metashape, A Tabela 2 apresenta as configurações do hardware utilizado para o processamento das reconstruções fotogramétricas.

Tabela 2 – Especificações do computador para processamento.

Especificações técnicas	
GPU	NVIDIA Geforce GTX 1080 8GB VRAM
CPU	Intel® Core™ i7-9700K CPU @ 3.60GHz 3.60 GHz
Memória	64GB 128-bit LPDDR4 Memory 1866 MHz – 59.7 GB/s
Armazenamento	512 GB SSD + 3 TB HDD

Fonte: (“Placas de vídeo GTX 1080 Ti | NVIDIA GeForce”, 2017)(“Processador Intel® Core™ i7-9700K (12 M de cache, até 4,90 GHz)”, 2017).

3.8.2 Comandos para parametrização através do SV3D

O software de reconstrução utilizado apresenta um módulo de compatibilidade que permite a execução de comandos, *scripts*, em linguagem Python com o objetivo de otimizar e automatizar os processos. Portanto, devido à realização de várias aquisições de imagens para processamento, utilizou-se um *script baseline* (apresentado no apêndice B), para separação

⁷ **Agisoft Metashape** – Software de processamento de imagens digitais gerando dados espacial 3D (AGISOFT, 2021).

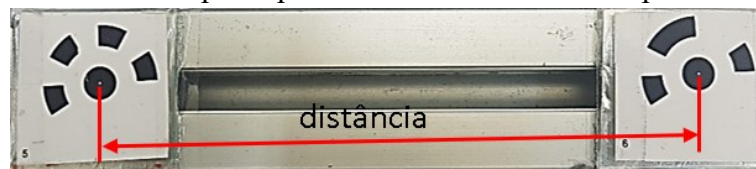
das imagens em pares, criação de escala entre elas e reconstrução, que trabalha da seguinte maneira:

- Carrega par de imagens;
- Define distância entre centros;
- Processa nuvem de pontos;

3.9 ELEMENTOS UTILIZADOS PARA APLICAÇÃO DE ESCALA

Escalas utilizadas em cena foram confeccionadas em barras de alumínio com alvos codificados aplicados nas extremidades e variam entre 158 mm e 1153 mm, aproximadamente. Os alvos são impressos em papel de alta gramatura e aplicados sobre uma superfície de vidro que é colada no perfil.

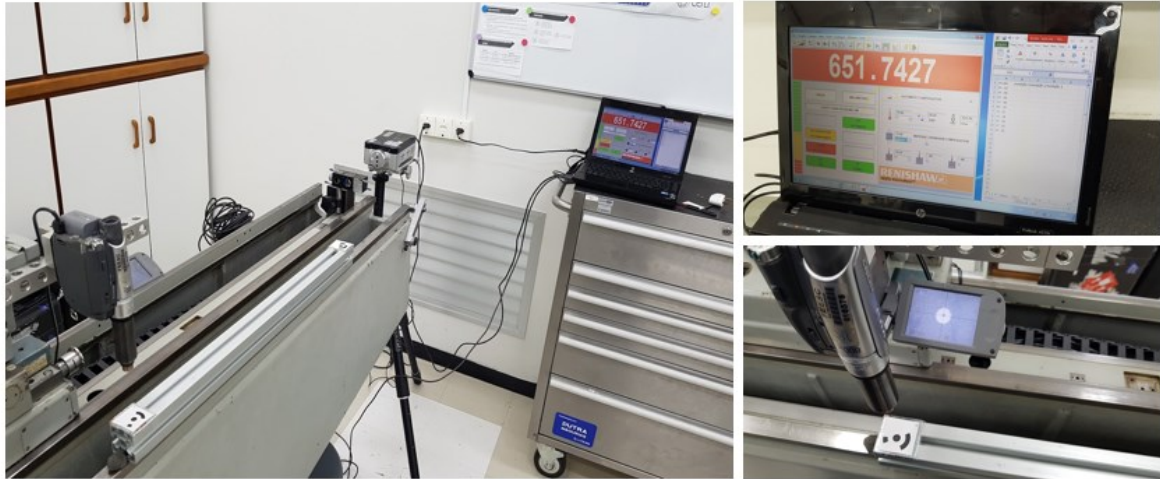
Figura 47 – Escala composta por dois alvos codificados e perfil de alumínio.



Fonte: (MARCELINO, 2019).

A calibração consistiu na medição das distâncias entre os centros dos alvos, utilizando-se um laser interferométrico Renishaw XL-80, com incerteza da ordem de centésimos de milímetros, a Figura 48 demonstra a calibração das escalas onde observa-se o centro do alvo através de uma câmera e lente com aumento de 10 vezes e realiza-se o deslocamento do conjunto juntamente com o refletor do laser até o centro do próximo alvo.

Figura 48 – Da esquerda para a direita, guia linear com o laser interferométrico montado e escala sendo calibrada, resultado de uma das calibrações e câmera visualizando o centro do alvo.



Fonte: Autor.

Devido o posicionamento da câmera em cima do alvo ser manual, adota-se como fonte de incerteza mais significativa do processo de medição apenas o desvio padrão entre as medições. Realizou-se três medições para cada uma das escalas e a Tabela 3 apresenta a média e o desvio padrão das medições.

Tabela 3 – Resultado calibração das escalas contendo média e desvio padrão da medição.
Dados em mm.

Escala	Média (mm)	Desvio padrão (mm)
01 -02	195,096	0,005
03 - 04	193,913	0,008
05 – 06	158,346	0,002
07 – 08	189,789	0,004
09 – 10	195,174	0,003
11 – 12	652,653	0,009
13 – 14	651,055	0,009
15 – 16	654,543	0,006
17 – 18	1152,157	0,007
19 - 20	1153,704	0,009

Fonte: Autor.

3.10 PADRÕES E CORPOS DE PROVA

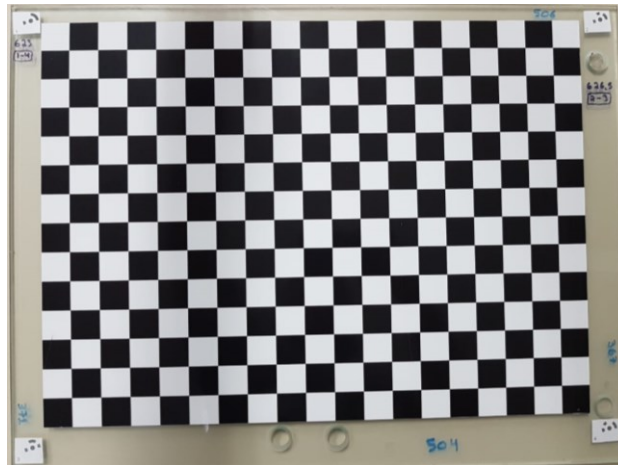
Para realizar as avaliações necessárias deste trabalho foram construídos padrões e corpos de prova, sendo eles: padrão de calibração de câmera; simulacro de *riser* com defeitos artificiais e estrutura com quatro esferas em disposição piramidal.

3.10.1 Padrão de calibração da câmera

Para a calibração das câmeras utilizou-se um padrão do tipo tabuleiro de xadrez, impresso em 1200 DPI em papel de gramatura 210g/m² e colado em uma superfície de vidro de aproximadamente 6 mm de espessura. O padrão foi calibrado com o auxílio de um microscópio e possui 19 retângulos na horizontal e 14 retângulos na vertical e os valores médios encontrados para a distâncias são, respectivamente (475,30 ±0,95) mm e (350,20 ±1,32) mm.

Este tipo de padrão é bem difundido na área de visão computacional, sua fabricação é relativamente simples, de baixo custo e existem diversas bibliotecas disponíveis para seu processamento(ZHENGYOU ZHANG, 1999)(HEIKKILA; SILVEN, 2002)(TSAI, 1987).

Figura 49 – Padrão de calibração contendo 19 x 14 divisões com lado nominal de 25 mm.

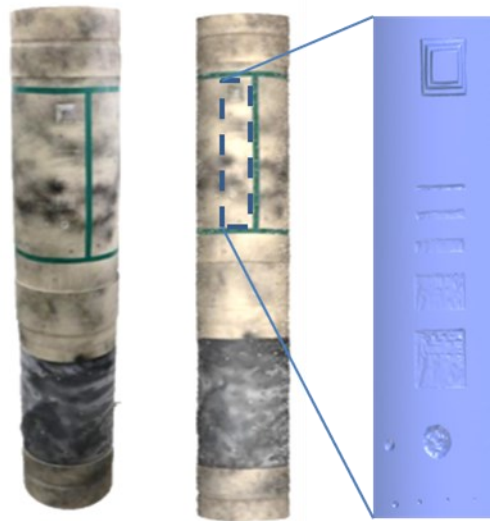


Fonte: Autor.

3.10.2 Simulacro de *riser* com defeitos artificiais

Construiu-se um simulacro de *riser* utilizando um tubo de PVC com diâmetro nominal de 300 mm e comprimento de aproximadamente 1600 mm, que contém em sua superfície alguns artefatos colados e defeitos artificiais. O simulacro de *riser* foi calibrado com o sistema de medição de referência Gom Atos Scan Box (GOM, 2020) e com procedimentos fotogramétricos. Os arquivos CAD gerados foram utilizados para avaliar os resultados. Esses arquivos de referência também permitem a comparação com os defeitos artificiais para avaliar a capacidade de resolução do processo de medição. A Figura 50 apresenta o simulacro de *riser* utilizado.

Figura 50 – Simulacro de *riser*. Na sequência: foto, malha 3D com textura, artefato piramidal e região dos defeitos artificiais da malha adquirida com o Gom Atos.

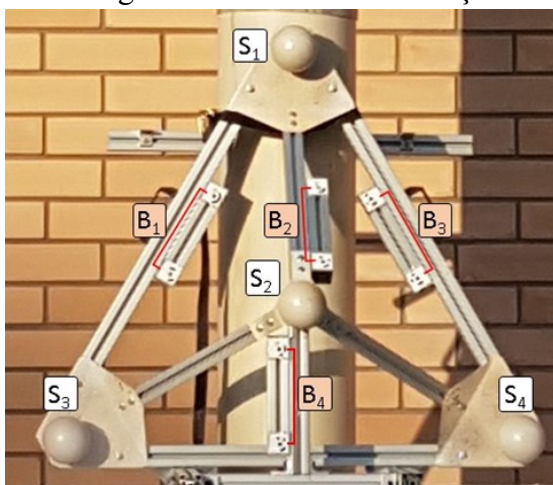


Fonte: Autor.

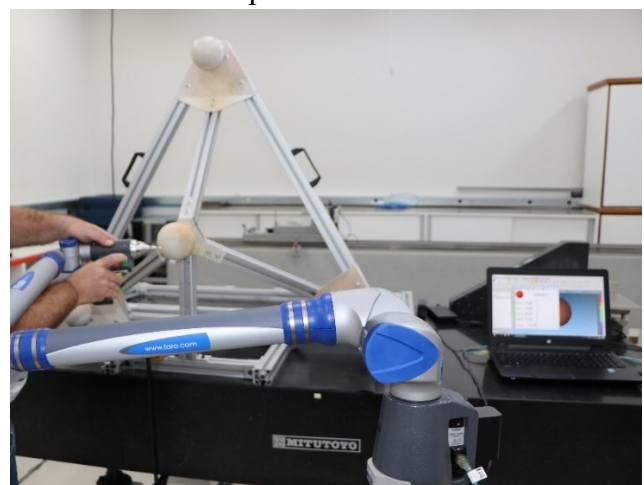
3.10.3 Estrutura piramidal com três esferas

Construiu-se um artefato composto por uma estrutura piramidal em perfis estruturais de alumínio, elementos de fixação, chapas e quatro esferas de aço com aplicação de textura em sua superfície. As esferas possuem 150 mm de diâmetro. O desvio de esfericidade máximo foi de 0,27 mm. Montou-se na estrutura três barras de escala permitindo assim a avaliação em níveis distintos do volume de medição. A estrutura obtida pode ser vista na Figura 51 (a). O componente foi calibrado com a utilização do braço de medição FARO com uma incerteza de medição da ordem de centésimos de milímetros Figura 51 (b).

Figura 51 – Padrão de avaliação construído em forma de pirâmide com 4 esferas.



(a) Artefato piramidal contendo quatro esferas ($S_{\#}$) e quatro escalas



(b) Calibração do artefato piramidal de esferas

Fonte: Autor.

No mesmo padrão foram fixadas quatro barras de escala. Realizou-se três ciclos de medições e adotou-se a média dos valores encontrados. As distâncias entre os centros das esferas são listadas na Tabela 4 e o comprimento das escalas na Tabela 5.

Tabela 4 - Distância entre esferas

Par de esferas	Distância [mm]
S₁ – S₂	608,16
S₁ – S₃	950,21
S₁ – S₄	952,15
S₂ – S₃	609,01
S₂ – S₄	618,64
S₃ – S₄	958,34

Fonte: Autor.

Tabela 5 - Comprimento das Barra de escala

Barra de escala	Comprimento [mm]
B₁*	189,79
B₂*	195,10
B₃	195,17
B₄	193,91

Fonte: Autor.

Para avaliação da incerteza de medição do sistema baseou-se nas orientações do guia para sistemas ópticos de medição 3D VDI/VDE 2634 (VDI/VDE 2634, 2002). Conforme o guia, as esferas do artefato de avaliação devem ter a distância entre seus centros e diâmetros calibrados, com erro de forma menor ou igual a 1/5 do erro a ser avaliado.

Através de posicionamentos específicos de um artefato de esferas dentro do volume de medição, o padrão de esferas adotado permite realizar avaliações de dois parâmetros, estimar as parcelas sistemáticas através do erro de espaçamento entre as esferas *Sphere Spacing Error (SSE)* e aleatórias, erro de “apalpação” *Probing Error (PE)* separadamente.

Os procedimentos adotados para a avaliação dos dois parâmetros são descritos a seguir:

1. Erro de espaçamento entre as esferas, ou *sphere-spacing error (SSE)*
 - O raio das esferas deve ser fixo conforme sua calibração;
 - Os três piores pontos (maior erro) a cada mil pontos são removidos;
 - A posição do centro é definida pelo ajuste de uma esfera com o raio fixo utilizando mínimos quadrados;
 - L_p é obtido pela distância dos centros das esferas ajustadas;
 - O SSE é dado pela diferença entre o valor obtido e o calibrado;
 - Se o erro máximo permitido é excedido em apenas uma medição, esta medição pode ser repetida.
2. Erro de apalpação ou *probing error (PE)*
 - O erro de apalpação é a diferença entre os pontos 3D medidos e o raio de uma esfera ajustada matematicamente aos pontos medidos;
 - Quando indicado como um único valor, PE é dado pela soma dos valores absolutos mínimo e máximo (distância pico-vale).

3.11 COMPARAÇÃO ENTRE SUPERFÍCIES

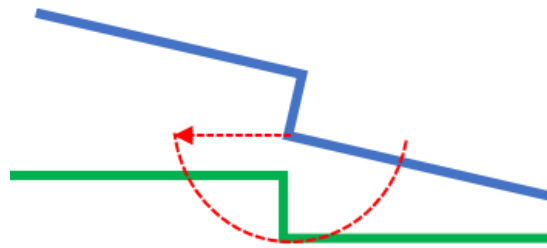
O resultado das medições realizadas também é avaliado por meio do método de comparação entre malhas. Adota-se como superfície de referência (GT) a malha reconstruída pelo ATOS Compact Scan. Realiza-se através do software *GOM Inspect V. 2019*⁸ a comparação entre a malha de referência e a malha reconstruída pela metodologia proposta.

O processo inicia-se com um pré-alinhamento entre as malhas baseado em regiões equivalentes da geometria, em sequência, realiza-se um alinhamento local por *best-fit* entre os pontos.

A comparação é realizada ponto a ponto entre as superfícies, onde é possível definir a distância máxima de busca ao redor do ponto (Figura 52). O software então atribui uma escala de cores referente à distância entre os pontos das duas superfícies em análise. Um exemplo pode ser visualizado na Figura 53.

⁸**GOM Inspect** - Software de análise de dados de medição 3D extraídos de scanners laser, MMC e outros sistemas de medições (GOM, 2019).

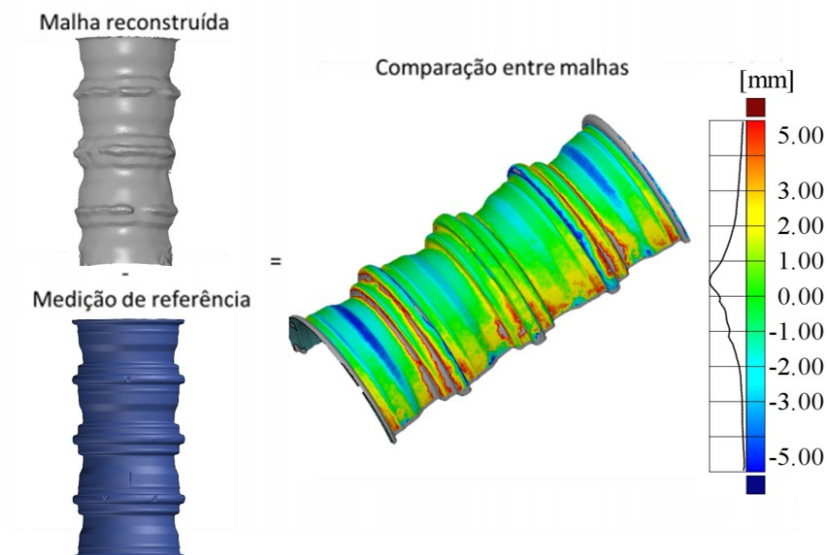
Figura 52 – Distância máxima de busca ao redor do ponto.



Fonte: Adaptado de (GOM, 2019)

As informações que são analisadas após a comparação consistem: na média das distâncias e o desvio padrão das distâncias entre pontos assim como o histograma que demonstra a distribuição dos erros. A Figura 53 ilustra um exemplo de inspeção de superfícies.

Figura 53 - Exemplo do processo de avaliação dos resultados de medição.



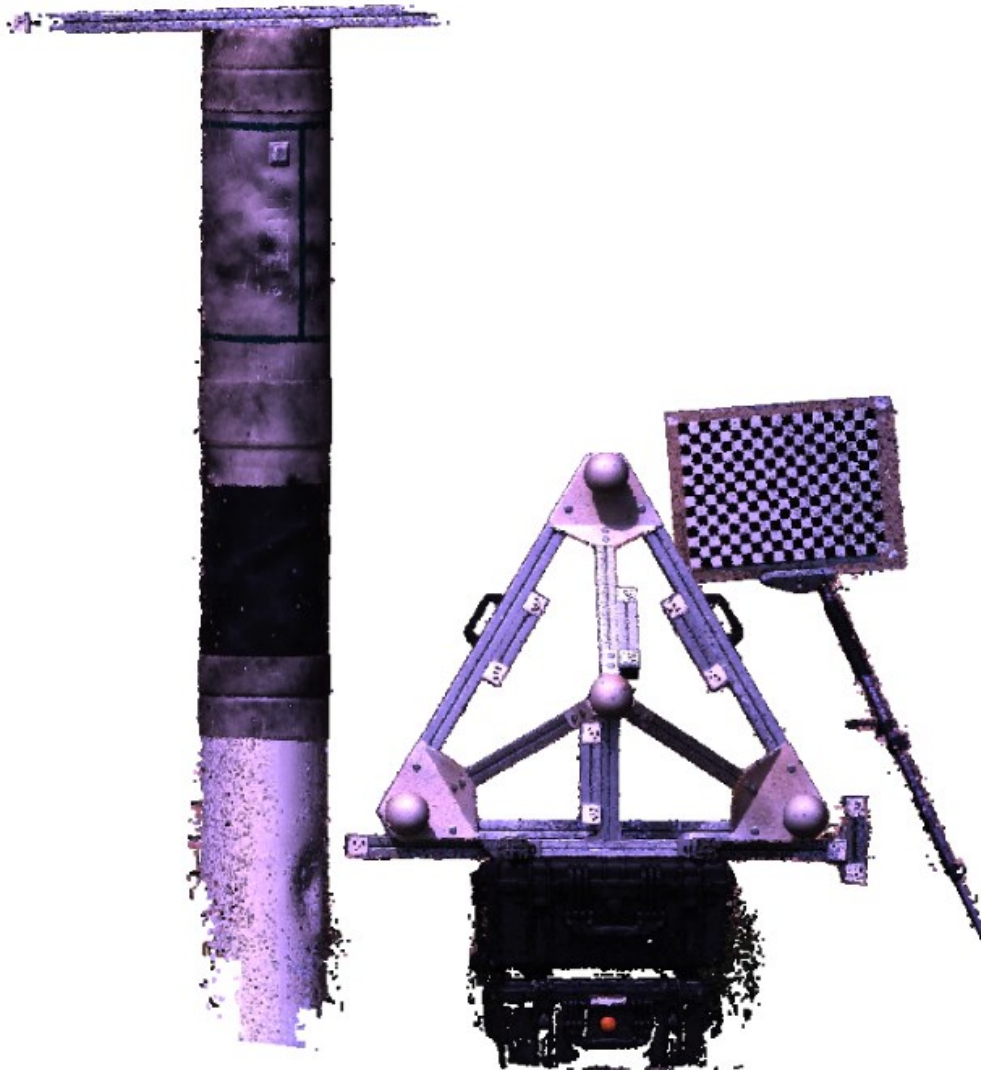
Fonte: Autor.

4 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta a validação experimental do sistema proposto, incluindo os resultados da calibração das câmeras, aquisição experimental com o SV3D em laboratório, avaliação da configuração de aquisição, avaliação metrológica com base nos guias VDI/VDE 2634, avaliação da incerteza de medição do sistema, avaliação do erro de posicionamento com o RPAS estático e comparação entre métodos convencionais de medição e o sistema proposto.

A Figura 54 apresenta o resultado da medição com o SV3D contendo a nuvem de pontos do tubo e PVC, o padrão de esferas e o padrão tabuleiro de xadrez.

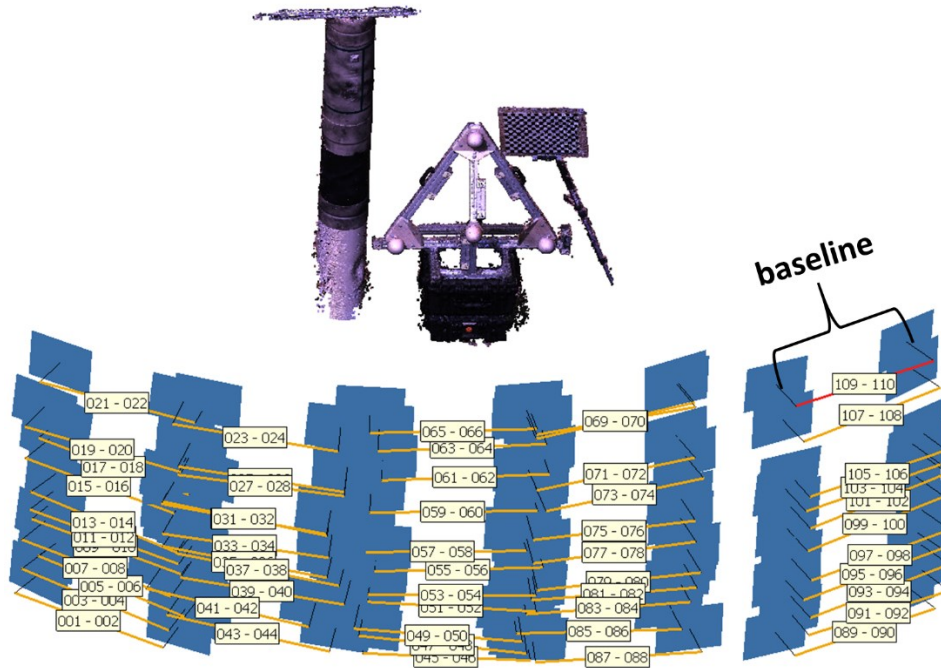
Figura 54 – Resultado de medição com o sistema proposto.



Fonte: Autor.

A Figura 55 apresenta a cena reconstruída com as posturas das imagens adquiridas, onde é possível observar a distância do baseline entre as câmeras.

Figura 55 - Nuvem de pontos e postura das imagens da cena reconstruída.



Fonte: Autor.

Para a realização do processo de medição fotogramétrica da geometria de *risers* realizou-se as etapas descritas nas próximas seções.

4.1 CALIBRAÇÃO DAS CÂMERAS

Nas seguintes subseções apresenta-se os resultados da calibração obtidos. A avaliação da calibração é realizada através dos mapas de distorções das lentes, poses de cada aquisição do padrão e erros de reprojeção.

Efetou-se a calibração das câmeras individualmente e na sequência, uma otimização estéreo, os parâmetros intrínsecos das câmeras são apresentados na Tabela 6, os valores estão em pixel. O comprimento focal foi obtido a partir da média do comprimento focal de todas as poses multiplicado pela dimensão do pixel. O valor obtido em milímetros foi próximo ao comprimento focal nominal da lente (50 mm).

A Tabela 6 apresenta a matriz de transformação do sistema de coordenadas (SCC) da câmera esquerda para a câmera direita. O *baseline* encontrado foi de aproximadamente 1066,67 mm.

Tabela 6 – Parâmetros intrínsecos das câmeras e de distorção da lente obtidos na calibração.

Item	Câmera esquerda (L)	Câmera direita (R)		
Dist.	$f_E = \begin{bmatrix} 14534,17 \\ 14526,45 \end{bmatrix}$	$f_D = \begin{bmatrix} 14420,20 \\ 14419,85 \end{bmatrix}$		
Focal	Distância focal média: 55 mm	Distância focal média: 55 mm		
Centro	$f_E = \begin{bmatrix} 1619,35 \\ 1453,69 \end{bmatrix}$	$f_D = \begin{bmatrix} 1564,53 \\ 1440,22 \end{bmatrix}$		
Matriz	K_E	K_D		
	$= \begin{bmatrix} 1292,35 & 0 & 1890,93 \\ 0 & 1234,34 & 1934,82 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$= \begin{bmatrix} 12306,72 & 0 & 1877,26 \\ 0 & 12286,14 & 1980,55 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$		
	k_1	$-2,9087 \times 10^{-1}$	k_1	$-3,1154 \times 10^{-1}$
	k_2	$9,0743 \times 10^{-1}$	k_2	1,2514
	k_3	0	k_3	0
	ξ_1	$2,03 \times 10^{-2}$	ξ_1	$2,31 \times 10^{-3}$
ξ_2	$1,40 \times 10^{-3}$	ξ_2	$1,57 \times 10^{-3}$	

Fonte: Autor.

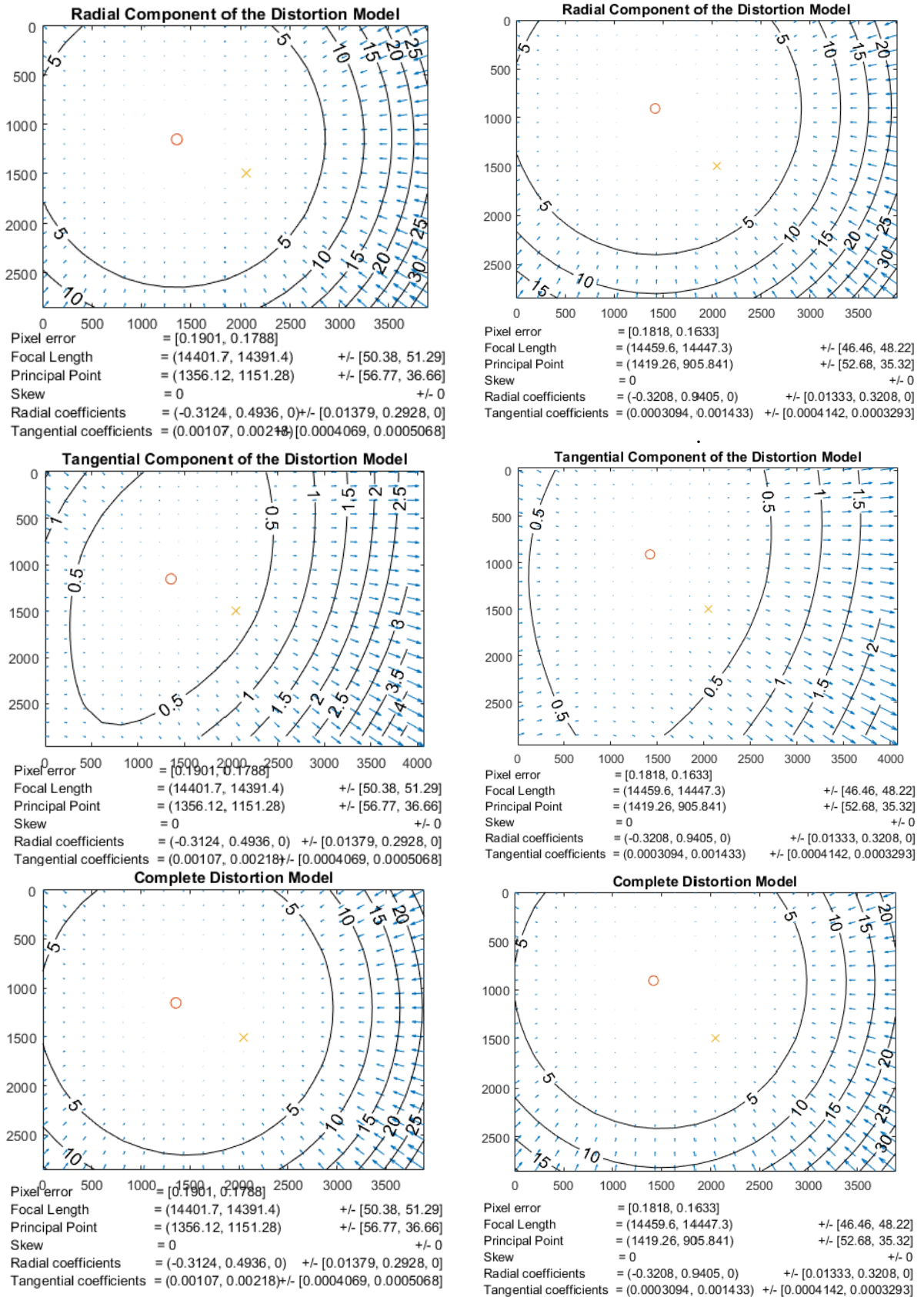
Tabela 7 – Relação estéreo – Matriz de transformação do sistema de coordenadas da câmera esquerda para a câmera direita.

Item	Câmera direita para a esquerda
Rotação	$K_{ED} = \begin{bmatrix} 0,9781 & 0,0114 & -0,2076 \\ -0,0067 & 0,9997 & 0,0233 \\ 0,2078 & -0,0214 & 0,9779 \end{bmatrix}$
Translação	$t_{ED} = \begin{bmatrix} -1060,69 \\ -3,76 \\ 112,69 \end{bmatrix}$
Distância	$\ t_{ED}\ = \mathbf{1066,67}$

Fonte: Autor.

Os mapas de distorção radial e tangencial e completo para ambas as câmeras pode ser visualizado na Figura 56.

Figura 56 – Mapa de distorção radial e tangencial e completo para a câmera.



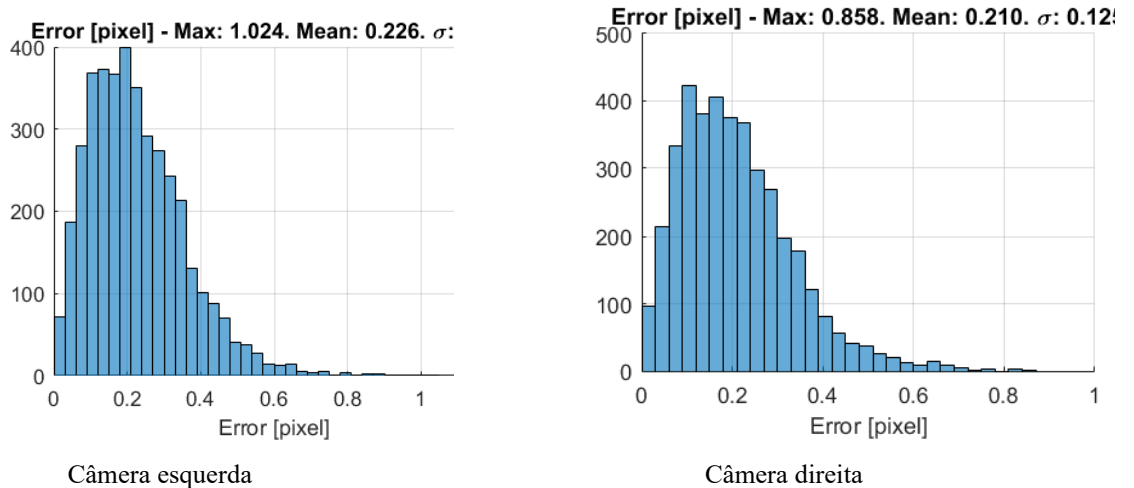
(a) Esquerda

(b) Direita

Fonte: Autor.

O erro de reprojeção é a diferença dos pontos detectados através da detecção de bordas e os pontos 3D reprojitados na imagem, obtidos com os dados de calibração calculados, em relação a cada pose do padrão 2D. A Figura 57 demonstra o erro de reprojeção das câmeras esquerda e direita.

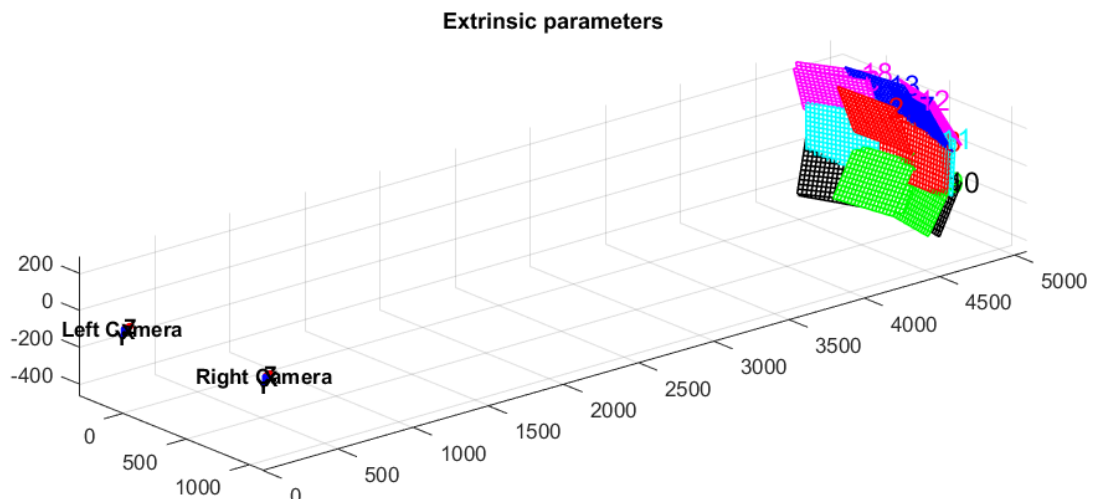
Figura 57 - Histograma de frequência do erro de reprojeção (em pixel) da calibração das câmeras do SV3D.



Fonte: Autor.

As posturas estimadas para o padrão de calibração no processo de aquisição são expostas na Figura 58.

Figura 58 - Posições calculadas do padrão após a calibração.



Fonte: Autor.

Os resultados encontrados no processo de calibração de câmera apresentaram erro de reprojeção máximo de aproximadamente 1,02 pixel, comprimento focal e distância do *baseline* próximos às dimensões físicas da montagem.

Os erros de reprojeção do sistema em milímetros no espaço do objeto correspondem a aproximadamente 0,35 mm. O que pode-se adotar como um resultado razoável para a distância de calibração de 5 m, considerando que sistemas configurados para uma distância menor (BUSCHINELLI, 2017), também apresentam erros desta ordem.

4.2 AQUISIÇÃO COM SV3D EM LABORATÓRIO

Esta seção apresenta os ensaios preliminares realizados com o SV3D montado em um tripé, apresentado na Figura 59 (a), com o objetivo de validação experimental em laboratório do processo de medição fotogramétrica e viabilidade do sistema para a medição da geometria de objetos 3D. Montou-se uma cena contendo o simulacro de *riser* juntamente com escalas posicionadas próximo ao objeto de medição, conforme ilustrado na Figura 59 (b).

Figura 59 – Montagem e testes do SV3D em laboratório.



(a) Sistema SV3D montado em tripé



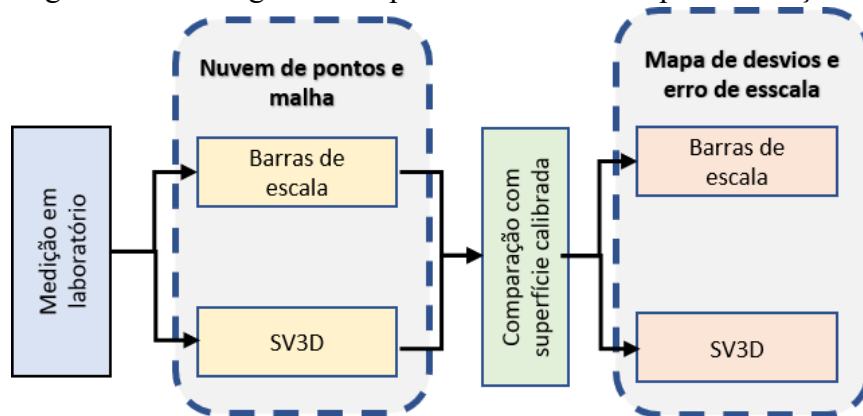
(b) Cena contendo simulacro de *riser* com defeitos e escalas para medição

Fonte: Autor.

Realizou-se a aquisição de 40 imagens do simulacro de *riser* a uma distância de aproximadamente 5 m com deslocamentos horizontais de 283 mm e verticais de 207 mm de forma a manter no mínimo 80% de sobreposição entre as imagens.

Para o processo de aquisição das imagens utilizou-se um notebook⁹, executando um script em *python* contendo os processos para as aquisições e armazenamento simultâneo das imagens. A Figura 60 ilustra as etapas de reconstrução e avaliação. Após o processamento das aquisições e reconstrução das malhas, realizou-se a comparação entre a malha de referência e a medição através do SV3D. A primeira avaliação corresponde a verificação do erro da medição da reconstrução com informação das barras de escala e a segunda reconstrução com informação do baseline.

Figura 60 – Fluxograma dos processos realizados para avaliações.

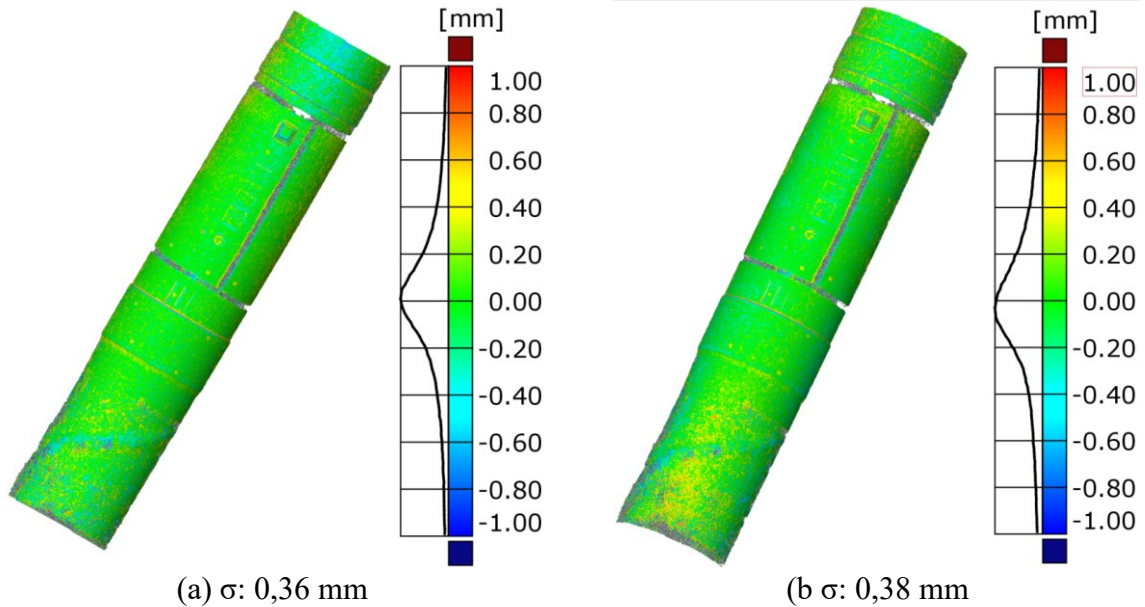


Fonte: Autor.

Após a realização das medições do simulacro de *riser* através dos dois processos, realizou-se a comparação de superfícies entre a malha de referência proveniente da digitalização através do Gom Atos Scan Box e as superfícies reconstruídas com os dois processamentos adotados. A Figura 61 ilustra a medição através das (a) barras de escala e (b) baseline.

⁹ Windows com 16 GB de Memória RAM e processador Intel Core i5-8300H 2,3 GHz

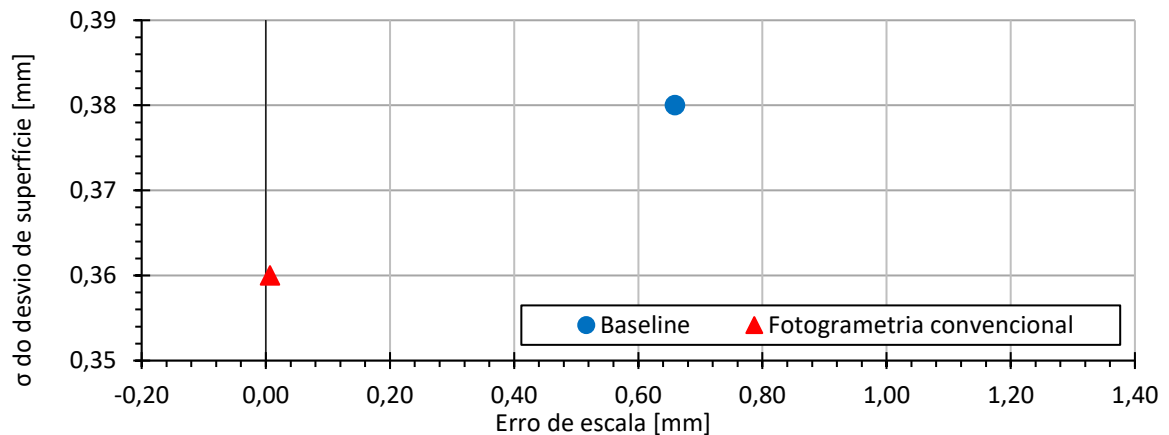
Figura 61 – Mapas de desvios das medições realizadas com o SV3D com a definição da escala de duas maneiras diferentes, onde: (a) escalas na cena e (b) escala definida pelo baseline do sistema estéreo.



Fonte: Autor.

A Figura 62 apresenta a comparação do erro de medição entre as duas técnicas utilizadas para aplicar escala à cena, no qual o eixo x corresponde ao erro de escala e o eixo y ao desvio padrão dos pontos da comparação de superfícies, onde é possível observar que a medição com fotogrametria convencional com escalas em cena apresentou um desvio padrão na comparação entre superfícies de 0,36 mm enquanto a técnica de aplicação de escala através do SV3D obteve 0,38 mm.

Figura 62 – Comparação do resultado de medição entre a medição através das barras de escala e o método proposto definindo a escala através do *baseline*.



Fonte: Autor.

Observando a diferença do desvio padrão dos erros utilizando o SV3D nota-se uma diferença de 0,02 mm entre a técnica convencional que utiliza escalas na cena e o sistema

composto pelo SV3D. Estes resultados preliminares indicam que existe potencial para adotar o sistema proposto para realizar medições com o sistema integrado ao RPAS. Esta etapa foi o ponto de partida para a realização de ensaios em condições de voo.

4.3 AVALIAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DE AQUISIÇÃO

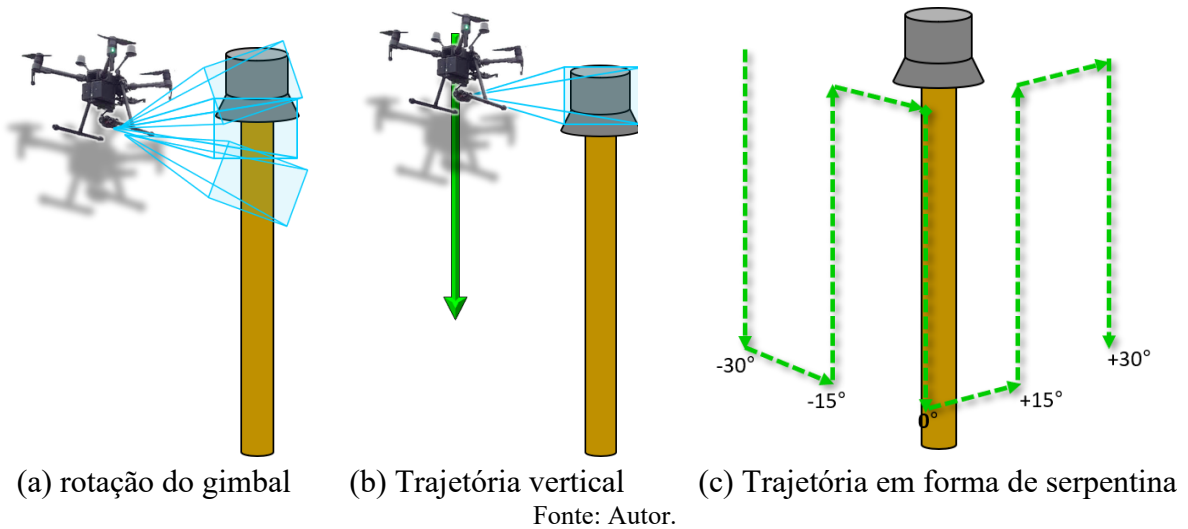
Conforme descrito em 2.7.2, para uma boa reconstrução fotogramétrica é necessário que exista um planejamento prévio do processo de aquisição de imagens. Um fator importante é a forma que as imagens são adquiridas em torno do objeto, permitindo uma boa intersecção geométrica.

Utilizando como base as características típicas de um *riser* em uma plataforma, como a geometria e o posicionamento na lateral do casco, realizou-se este experimento com o objetivo de avaliar a influência da configuração da trajetória de aquisição das imagens na reconstrução do modelo 3D.

Devido a este experimento ter sido realizado em uma etapa anterior a integração do SV3D ao RPAS, efetuou-se alguns voos com a utilização do RPAS M210 RTK v2 e a câmera DJI zenmuse X5S com lente de 45mm, efetuando os seguintes trajetos: rotação do *gimbal*, vertical único e serpentina, conforme ilustrado na Figura 63.

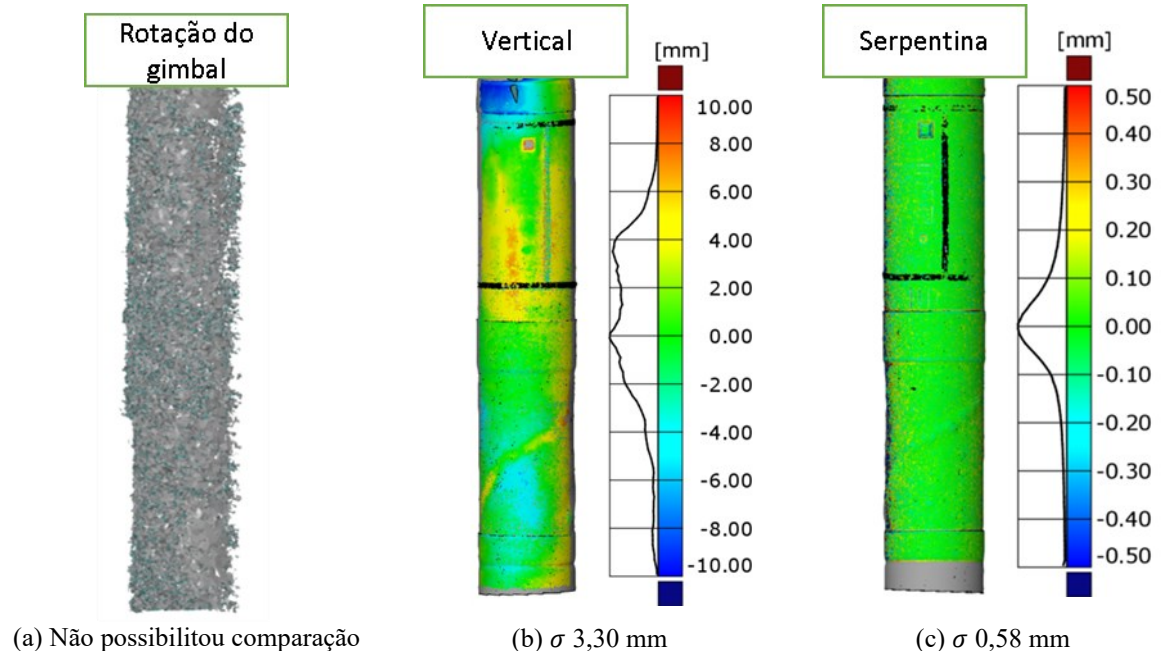
Uma das configurações avaliadas consiste na aquisição de 94 imagens com o RPAS parado em uma posição e um movimento de rotação do *gimbal* (pitch) durante as aquisições. Na próxima etapa de avaliação realizou-se a aquisição das imagens durante a realização de um deslocamento vertical com o RPAS. Este processo é mais simples de realizar em campo, as empresas realizaram teste piloto em plataforma, onde obtiveram imagens dessas maneiras, com o intuito de realizar apenas a inspeção visual. A última configuração avaliada neste experimento consiste na aquisição das imagens durante a realização de uma trajetória similar a uma serpentina, mantendo 80% de sobreposição entre as aquisições, que seria o processo que segue as diretrizes de boas práticas para medições fotogramétricas.

Figura 63 – Trajetórias de aquisição realizadas.



Processou-se, através do software Agisoft Metashape, os conjuntos das imagens obtidas a partir das três configurações de trajetória. Posteriormente efetuou-se a comparação entre as superfícies reconstruídas, medidas, e a de referência. Os resultados podem ser visualizados na Figura 64.

Figura 64 – Na sequência, os resultados do mapa de desvios de superfícies.



Fonte: Autor.

Os resultados apresentados na Figura 64 estão de acordo com o esperado, confirmando que a aquisição somente com a rotação em *pitch* do *gimbal* reconstruiu uma superfície ruidosa, impossibilitando a comparação com a referência. A trajetória na vertical

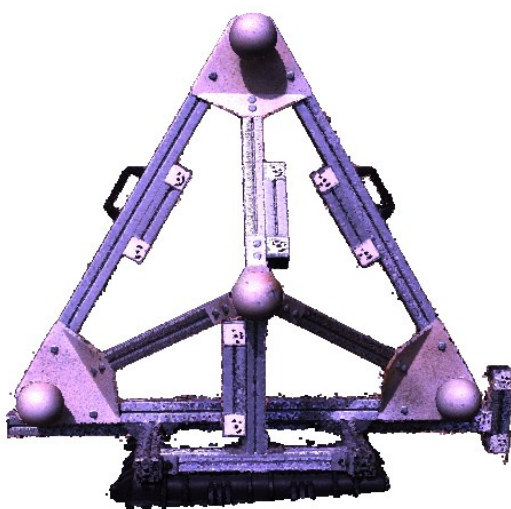
apresentou um desvio padrão de aproximadamente 3,30 mm, resultado que se deve muito provavelmente a poucas imagens, baixa sobreposição lateral e posições da câmera em ângulos com baixa convergência em relação ao objeto o que reduz as informações para reconstrução e aumenta a incerteza de medição. A trajetória em serpentina, por sua vez, pode ser apontada como a mais eficaz entre as três para a medição de *risers* em plataformas com a utilização de RPAS, apresentando um desvio padrão do erro de medição de 0,58 mm.

4.4 AVALIAÇÃO METROLÓGICA COM BASE NO GUIA VDI/VDE 2634

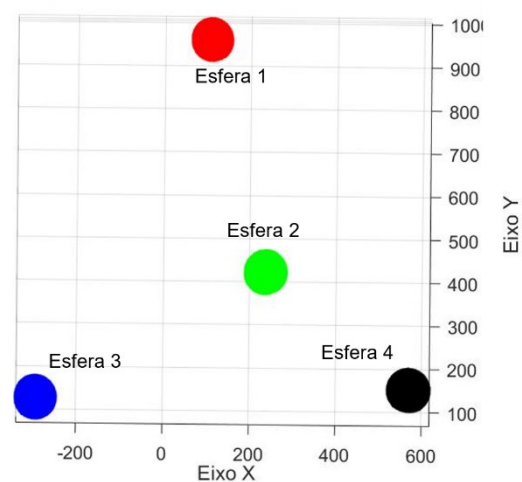
Realizou-se um voo com o SV3D integrado no RPA, adquiriu-se 80 imagens seguindo uma trajetória do tipo serpentina em ambiente externo. A cena alvo da medição é composta pelo simulacro de *riser*, pelo padrão piramidal de esferas e pelas barras de escalas. Efetuou-se o processamento da nuvem de pontos no Agisoft Metashape utilizando a informação do baseline para aplicar escala a cena. Avaliou-se os resultados de medição com base nas orientações do guia VDI/VDE-2634.

A Figura 65 (a) apresenta a nuvem de pontos 3D com textura da estrutura completa do artefato piramidal enquanto a Figura 65 (b) apresenta o resultado das posições das esferas ajustadas com base nas informações da medição.

Figura 65 – Nuvem de pontos do artefato piramidal e resultado das avaliações de PE e SSE



(a) Nuvem de pontos 3D com textura do artefato piramidal contendo as esferas e barras de escala.



(b) Posições das esferas ajustadas incluindo pontos medidos.

Fonte: Autor.

A Tabela 8 expõe os erros obtidos através da medição utilizando o *baseline* para definir a escala. A distância entre as esferas 1 e 4 foi a que resultou em maior erro de escala (SSE = -1,11 mm) e a esfera 4 apresentou maior erro de apalpação (PE = 2,89 mm).

Tabela 8 – Erro de espaçamento entre as esferas (escala inserida pelo *baseline*).

Esfera	SSE (mm)				PE (mm)
	1	2	3	4	
1		-0,72	-0,25	-1,11	1,68
2			-0,22	-0,46	2,48
3				-0,87	2,67
4					2,89

Fonte: Autor.

A Tabela 9 apresenta os erros da medição do processamento com barras de escala. A distância entre as esferas 1 e 4 foi a com maior erro de escala (SSE = -0,64 mm) e a esfera 4 apresentou maior erro de apalpação (PE = 1,12 mm).

Tabela 9 – Erro de espaçamento entre as esferas (escalas em cena).

Esfera	SSE (mm)				PE (mm)
	1	2	3	4	
1		-0,16	0,38	-0,64	0,92
2			0,03	-0,25	0,99
3				0,53	0,90
4					1,12

Fonte: Autor.

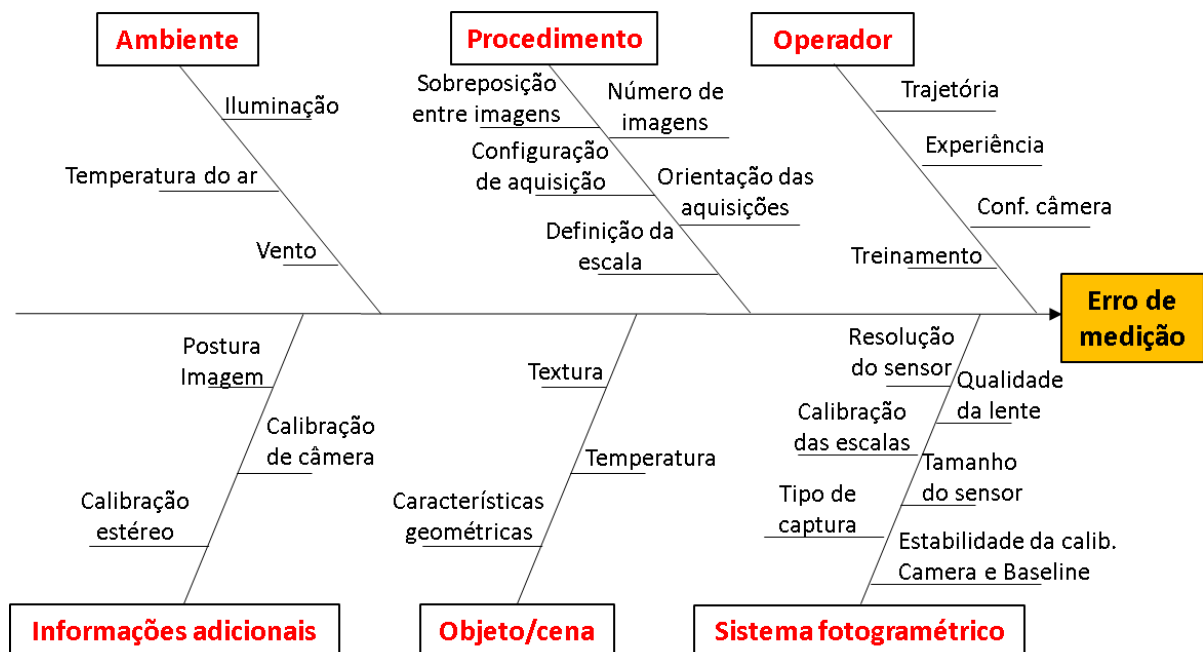
Um dos fatores que podem ter influenciado para este resultado é que esfera 2 é a única posicionada em um plano mais próximo ao SV3D em relação as outras, este fator alinhado ao deslocamento da aeronave para compensar a força do vento, acarretou variações na distância entre o RPAS e o objeto, refletindo assim em uma variação entre a posição da profundidade de campo e a esfera 2, o que pode contribuir para deteriorar a qualidade da medição nesta região. Neste sentido, as esferas 3 e 4 estão posicionadas nos extremos inferiores da pirâmide, posição esta que sofre uma menor sobreposição das imagens devido a trajetória adotada no processo de aquisição.

4.5 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DO SISTEMA

As principais fontes de incertezas em uma medição por fotogrametria incluem características intrínsecas do conjunto óptico, como: resolução do sensor; qualidade da lente; textura do objeto; iluminação do ambiente; temperatura dos elementos de interesse da medição e influências do processo de aquisição, como sobreposição, configuração de aquisição das imagens e inserção ou não de informações adicionais.

Por se tratar de uma medição realizada em ambientes externos, sujeitos às diversas variações, é prudente adotar como avaliação da medição o erro máximo do sistema para condições específicas. As principais fontes de incerteza do sistema de medição integrado são apresentadas na Figura 66.

Figura 66 - Principais fontes de erros de um sistema de medição por fotogrametria através de RPAS.



Fonte: Autor.

A medição é realizada para avaliar a capacidade de aplicar escala em cena pelo sistema desenvolvido, considerando as fontes de erro que incidem no processo de medição, realizou-se um experimento com a aquisição de 55 pares de imagem, em um voo seguindo uma trajetória serpentina para medição da cena em ambiente externo, em um dia com nuvens, com temperatura próxima a 23°C e com vento máximo de aproximadamente 18,1 km/h. Adotando como mensurando a distância entre os alvos das escalas acopladas ao padrão piramidal de esferas, avaliou-se a incerteza de medição do sistema para estas condições.

4.5.1 Componentes sistemáticas

A componente sistemática do processo pode ser estimada através da tendência da medição juntamente com o

Tendência

Realizou-se a reconstrução impondo a distância do *baseline* do SV3D para escalar a cena e comparou-se a distância entre os centros dos alvos com a informação de calibração, com um total de quatro escalas. Os resultados são apresentados na Tabela 10 e adotou-se a média das medições (-0,43 mm) como valor de tendência para o erro de escala.

Tabela 10 – Resultados das avaliações das escalas em cena reconstruída pelo SV3D.

Especificação da escala	Valor reconstruído (mm)	Erro (mm)
DT (01-02)	194,69	-0,41
DT (03-04)	193,45	-0,47
DT (07-08)	189,34	-0,45
DT (09-10)	194,79	-0,38
	Média	-0,43
	Desvio Padrão	0,04

Fonte: Autor.

Deriva térmica

Os objetos utilizados são de materiais distintos, PVC para o simulacro de *riser* e alumínio para a estrutura que suporta as esferas, portanto, a variação entre a temperatura de calibração e a temperatura de medição também pode ser considerada como uma componente sistemática de erro (ALBERTAZZI, A.; SOUSA, 2008).

A calibração das escalas foi realizada em um ambiente com temperatura controlada em torno de 20°C e o ambiente de medição apresentou temperatura próxima a 23°C. Portanto, a quantificação da correção a ser adotada pode ser encontrada a partir da seguinte equação:

$$C = (\alpha_A - \alpha_B)(T_{SM} - 20^\circ C)L, \quad (15)$$

Na qual, α_A e α_B são os coeficientes de dilatação térmica dos materiais distintos, T_{SM} é a temperatura do sistema de medição no ambiente da medição e L é o comprimento da maior distância entre as escalas.

Considerou-se o comprimento das escalas como critério para avaliação do erro de escala, o coeficiente de dilatação de alumínio das escalas de $23 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, o coeficiente de dilatação do tubo de fibra de carbono $6 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e o maior comprimento entre as escalas sendo 194,79 mm, é possível encontrar um valor para correção para deriva térmica de aproximadamente -0,0099 mm.

4.5.2 Componentes aleatórias

As componentes aleatórias são definidas a partir da incerteza da medição das escalas no laser interferométrico e desvio padrão do erro de escala.

Calibração das escalas

Adotou-se a média das incertezas expandidas do resultado da calibração como incerteza para a medição das escalas no laser interferométrico de 0,019 mm.

Incerteza padrão

Considerando o mensurando como variável, onde a faixa de variação deve fazer parte do resultado de medição, utilizou-se o desvio padrão dos erros das medições como incerteza padrão, com um valor aproximado de 0,038 mm.

4.5.3 Balanço de incertezas

A separação das componentes sistemáticas e aleatórias presente no processo de medição possibilitou sua apresentação no balanço de incertezas apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 – Balanço de incerteza do sistema proposto.

símbolo	descrição	Correção (mm)	a (mm)	distribuição	u (mm)	v
s	Incert. Padrão		0,038	normal	0,038	3
Cal.	Calib. Escalas		0,19	normal	0,096	3
Dter	Deriva Térmica	-0,0099				
Tend.	Tendência	0,43				
C_c	Correção combinada	0,42				
u_c	Incerteza combinada			normal	0,039	-
U_c	Incerteza expandida			normal	0,13	3

Fonte: Autor.

Portanto, através da combinação das parcelas sistemática e aleatória é possível demonstrar o erro máximo do seguinte modo:

$$Err_{MÁX} = (|Tend. | \pm U)mm \quad (16)$$

$$Err_{MÁX} = (|-0,43| \pm 0,13)mm \quad (17)$$

$$Err_{MÁX} = (\pm 0,56)mm \quad (18)$$

Considerando a magnitude dos defeitos típicos encontrados na superfície externa de *risers*, de aproximadamente 10 mm, e o erro máximo apresentado pelo sistema, de $\pm 0,56$ mm, para o sistema de medição proposto nas condições especificadas. Assim, pode-se considerar que o processo de medição é adequado para detectar e quantificar defeitos desta magnitude já que o erro máximo representa um valor próximo a 1/20 do defeito.

Este resultado representa uma medição realizada em condições específicas, é importante ressaltar que a medição realizada por este processo apresenta elevada dependência das condições ambientais existentes no momento das aquisições.

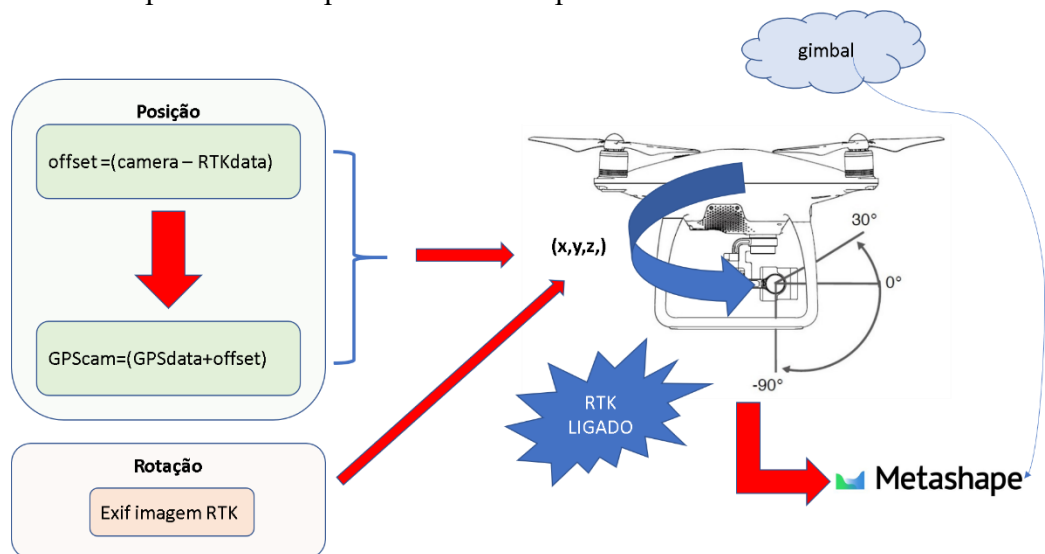
4.6 ERRO DE POSICIONAMENTO COM O RPAS ESTÁTICO

Com o objetivo de identificar o erro de posicionamento do RPAS, realizou-se um experimento adquirindo imagens com a câmera X5S e o RPAS estático. O arquivo de LOG de voo disponibiliza diversas informações dos sensores embarcados do RPAS, dentre eles é possível extrair os dados de posição e orientação da aeronave.

As aquisições foram realizadas utilizando as correções da base RTK, e as informações de postura, orientação, do centro da imagem são gravadas no EXIF. No entanto

para avaliação dos dados fornecidos pelo sensor GNSS é necessário extrair a informação do LOG. Para uma comparação mais justa, o procedimento adotado utilizou as informações de postura do RPAS extraídas do GNSS aplicando a transformada do “offset” para ao centro da Câmera X5S. A Figura 67 ilustra o fluxo de aquisição dos dados de postura das aquisições.

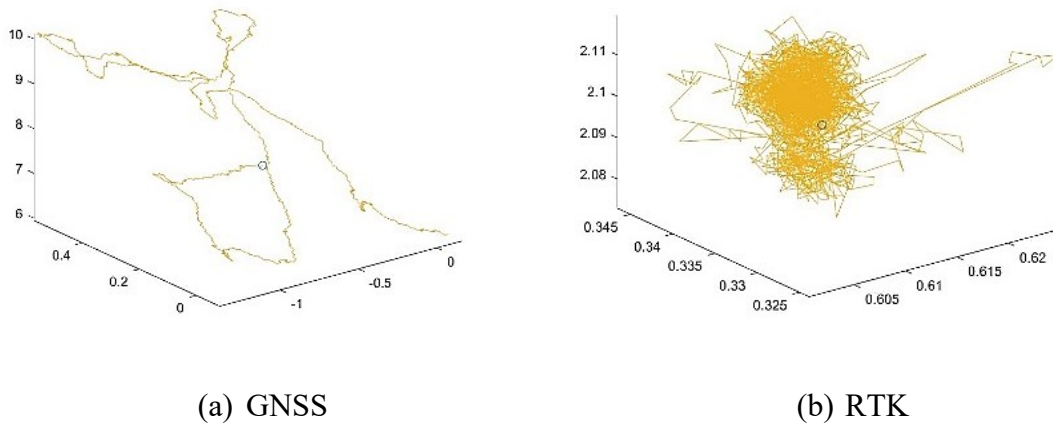
Figura 67 – Fluxograma de dados GNSS e RTK. Os dados de posição e orientação através do RTK são disponibilizados no EXIF da imagem. Os dados de posição do GNSS e o offset para a câmera são extraídos do LOG de voo combinados gerando a postura pelo GNSS que por sua vez pode ser comparada com a postura fornecida pelo RTK.



Fonte: Autor.

A Figura 68 apresenta os pontos 3D no espaço gravados do RTK e do GNSS adquiridos ao longo do tempo com o RPAS estático, onde os eixos estão plotados em relação ao sistema de coordenadas NED da aeronave adotando como referência o home point, eixo X corresponde a Latitude, Y a Longitude e Z a Altitude. As escalas dos gráficos são distintas.

Figura 68 – Posição indica pela RPA com a aeronave estática em solo.



Fonte: Autor.

O GNSS apresentou a posição com desvio padrão da amostra de aproximadamente 1108.80 mm enquanto o GNSS+RTK apresentou desvio padrão aproximado de 5.58 mm, o que era esperado, vale ressaltar que estes resultados são de uma avaliação com o equipamento estático, em voo a incerteza de posicionamento pode aumentar.

No gráfico acima é possível identificar uma deriva maior na altitude ou eixo Z, o que condiz com o eixo que apresenta maior incerteza no posicionamento através de GNSS (DONG-FENG; YUN-PENG; ZHEN-LI, 2009) e um erro sistemático aparente em relação ao RTK. Há uma grande chance deste efeito ter influenciado na distorção dos processamentos que se basearam nesta técnica.

4.7 COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS CONVENCIONAIS E O SISTEMA PROPOSTO

Como forma de validação do sistema desenvolvido, efetuou-se a medição da mesma cena com distintas técnicas de processamento, portanto, realizou-se comparações com os métodos convencionais que permitem aplicar escala em cena na fotogrametria. As medições foram efetuadas com a utilização do RPAS e a escala na cena aplicada com informações provenientes dos dados de postura de cada imagem extraídas do geotag¹⁰, obtidos do GNSS, na forma corrigida em tempo real (RTK), barras de escala aplicada na cena e a distância entre as câmeras do SV3D. A Figura 69 apresenta o RPAS em voo realizando a medição da cena composta pelo artefato de esferas, simulacro de *riser* com defeitos artificiais, barras de escalas e padrão de calibração 2D tipo tabuleiro de xadrez.

¹⁰ Geotag é o processo de adicionar metadados de identificação geográfica a várias mídias

Figura 69 - RPAS com SV3D durante ensaio. A cena de interesse inclui: simulacro de *riser*, padrão de esferas com escalas e padrão 2D para calibração de câmera.

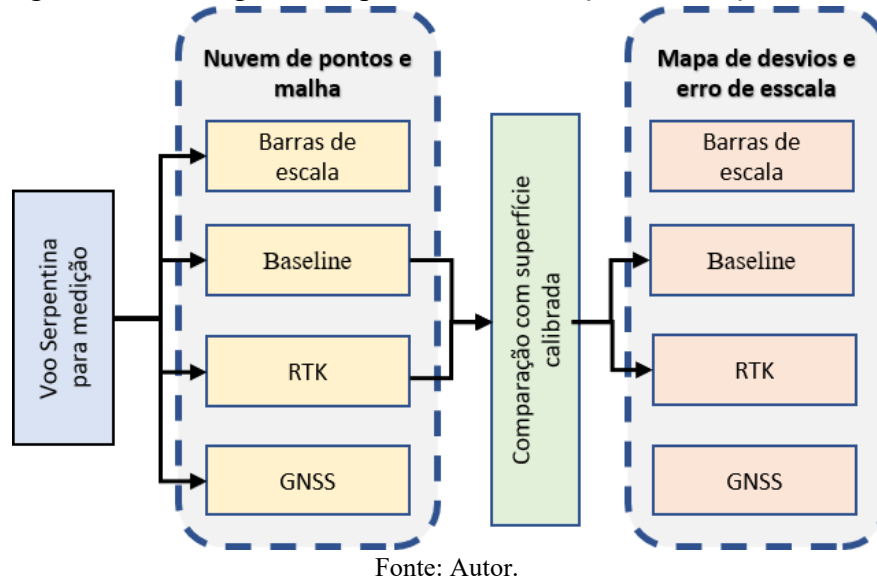


Fonte: Autor.

Os dados de posição e orientação disponíveis através do LOG de voo fornecem uma estimativa inicial de disposição das imagens no espaço que podem servir de referência para aplicação de escala na medição. Como forma de buscar uma comparação mais justa, optou-se por utilizar o mesmo conjunto de imagens e processá-lo com os dados oriundos das distintas técnicas, assim, quatro estratégias diferentes de definição de escala: GNSS, RTK, barras de escala e o *baseline* do sistema estéreo SV3D.

Os erros de medição foram avaliados através da medição de artefato calibrado de quatro esferas com base nas diretrizes VDI / VDE e simulacro de *riser* com defeitos artificiais. A Figura 70 expõe o fluxograma geral do processo. Os resultados encontrados através das avaliações são apresentados nas próximas seções.

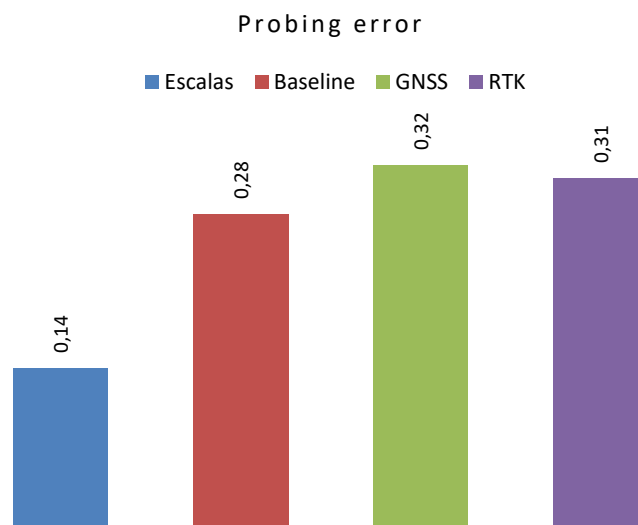
Figura 70 – Fluxograma do processo de medição e avaliação da cena.



4.7.1 Probing error

A Figura 71 apresenta os resultados da avaliação do PE, o desvio padrão dos erros nas quatro esferas através dos quatro processos de medição adotados (GNSS, RTK, SV3D e barras de escala). O desvio padrão do erro de apalpação para a esfera com maior erro, é respectivamente: 0,32 mm para GNSS, 0,31 mm para RTK, 0,28 mm para o SV3D e 0,14 mm para as barras de escala.

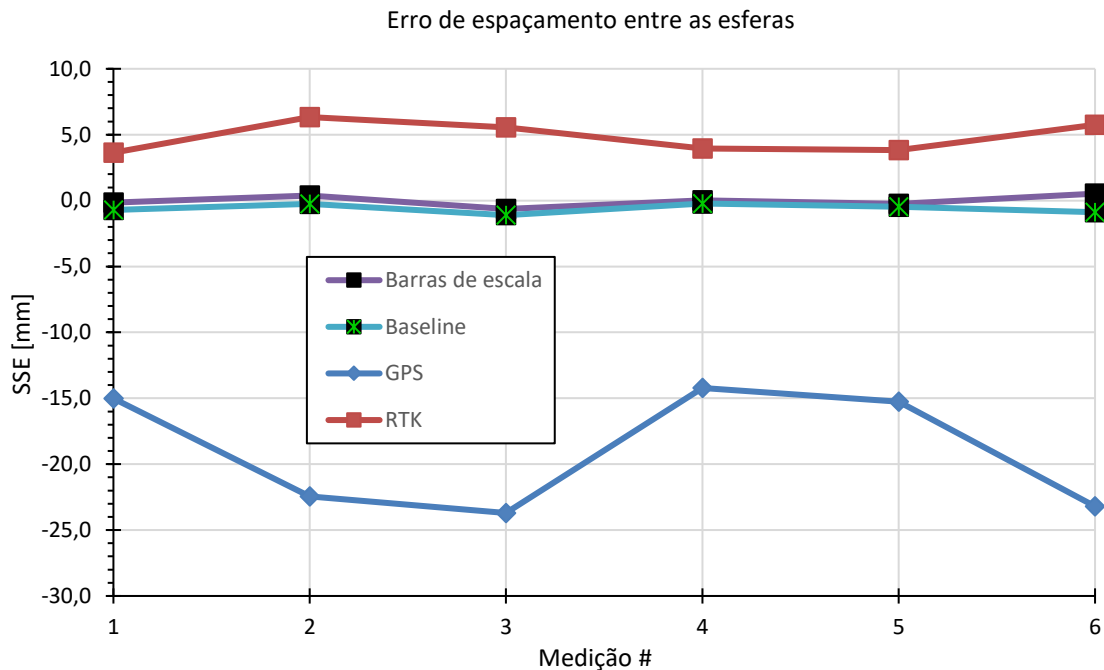
Figura 71 – Desvio padrão do *probing error* (PE) no artefato de esferas.



4.7.2 Erro de espaçamento entre as esferas (SSE)

A Figura 72 apresenta o erro de espaçamento entre as esferas do artefato piramidal. A média do SSE entre as medições e são respectivamente: -18,97 mm para GNSS, 4,85 mm para RTK, -0,60 mm para SV3D e 0,02 mm para barras de escala.

Figura 72 – Erro de espaçamento entre as esferas para os seis pares do artefato piramidal.



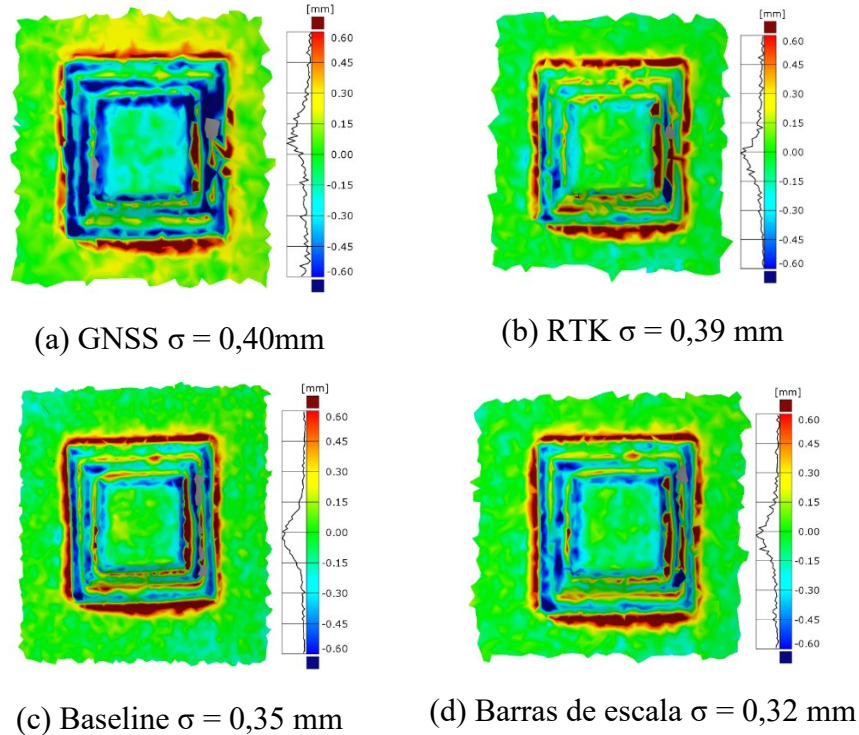
Fonte: Autor.

As medições por GNSS e RTK apresentaram os maiores erros. Este resultado pode ser atribuído principalmente por causa de ruídos inseridos na medição pela estimativa inicial de posicionamento, baixa intersecção geométrica nas esferas inferiores e seleção manual da região de avaliação da nuvem de pontos. O processamento através das escalas apresentou os menores erros seguido pelos resultados do SV3D.

4.7.3 Comparação entre superfícies

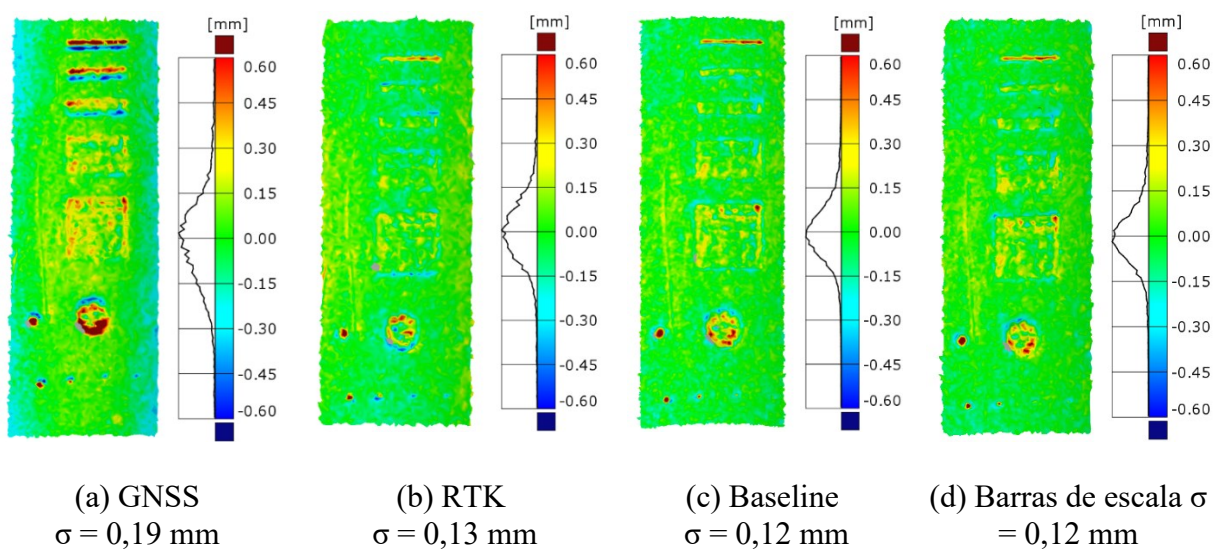
Realizou-se comparações entre a superfície medida pela técnica GNSS e a superfície de referência, nas regiões dos defeitos artificiais (b) e o artefato piramidal (c). Os desvios padrões dos pontos medidos entre superfícies encontrados foram respectivamente 0,40 mm, 0,39 mm, 0,35 mm e 0,32 mm e são apresentados na Figura 73. A próxima avaliação consistiu na comparação entre superfícies na região dos defeitos artificiais no simulacro de *riser*. A Figura 74 apresenta o mapa dos desvios analisados.

Figura 73 – Mapa de desvios entre a medição realizada com informações do (a) GNSS, (b) RTK, (c) Baseline, (d) barras de escala e a malha de referência.



Fonte: Autor.

Figura 74 – Mapa de desvios entre a medição realizada com informações do (a) GNSS, (b) RTK, (c) Baseline, (d) Barras de escala e a malha de referência.



Fonte: Autor.

Por meio das comparações entre as superfícies foi possível apontar que as medições com a escala definida por barras de escala na cena e através do *baseline*, apresentaram

resultados com um erro menor que os outros dois métodos. Isso já era esperado devido a ordem de magnitude das incertezas de calibração das referências para escalar a cena ser bem diferentes. É importante notar que erros de escala e erros de apalpação são apresentados simultaneamente nessas análises. Outro ponto importante a ser considerado em relação ao erro de escala é minimizado devido a região da análise corresponder a uma fração da cena completa.

4.7.4 Erro de posicionamento da câmera

A Tabela 12 apresenta o erro médio de localização da câmera extraído após reconstruções de nuvem de pontos. Em que os erros totais são de aproximadamente 0,92 m para GNSS e 0,04 m para RTK. Essa discrepância entre os erros é influenciada principalmente pelos erros na direção do eixo Z, que são da ordem de 0,87 m para GNSS e 0,03 m para reconstruções baseadas no RTK. Esses resultados estão de acordo com a incerteza de posicionamento dos sistemas GNSS (YUAN et al., 2009).

Tabela 12 – Média do erro de posicionamento da câmera (mm). Onde os eixos X, Y e Z correspondem respectivamente a: Longitude, Latitude e Altitude.

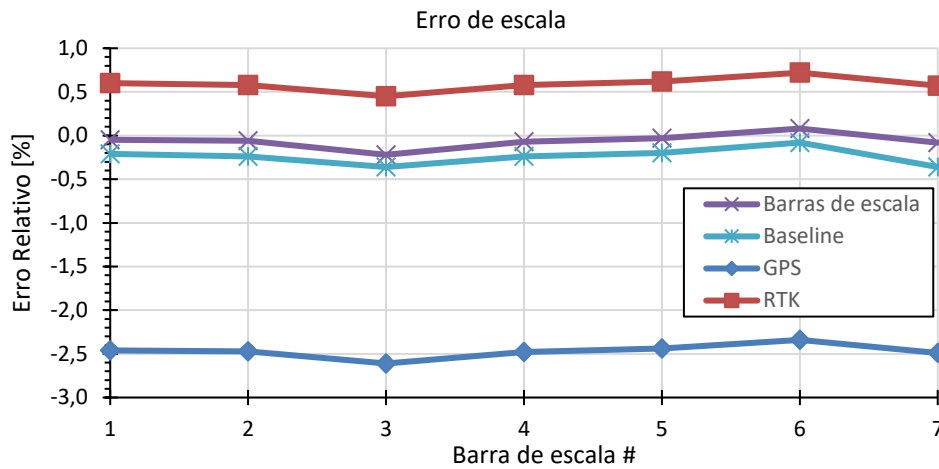
	X erro	Y erro	Z erro	XY erro	Total erro
GNSS	172,2	261,4	875,4	313,0	929,7
RTK	25,1	22,4	35,7	33,6	49,1

Fonte: Autor.

4.7.5 Erro de escala

A Figura 75 apresenta o erro de avaliação das barras de escala. Duas escalas B_1 e B_2 da cena foram usadas para aplicar a escala e as duas restantes para avaliar o resíduo. As médias dos erros para as medições são: -11,27 mm para GNSS, 2,90 mm para RTK, -1,05 mm para Baseline e -0,10 mm para Barras de escala.

Figura 75 – Avaliação do erro de escala em comparação dos respectivos processamentos e o valor de referência.



Fonte: Autor.

A medição com GNSS apresenta os maiores erros de escala, com significativa redução através da correção RTK. A medição com SV3D e barras de escala resultou nos menores erros, correspondendo a uma redução da ordem de dezenas para décimos de milímetros. Este resultado pode ser relacionado principalmente a menor incerteza do processo de calibração das barras de escala e do baseline do SV3D e a escala ser definida diretamente no espaço do objeto para as barras de escala. É possível identificar, por exemplo, que as distâncias medidas até a esfera superior 1 apresentam erros de maior magnitude, isso provavelmente se deve ao fato da esfera estar posicionada acima das demais na vertical, que é o eixo que mais sofre contribuição da incertezas no posicionamento GNSS e RTK (DONG-FENG; YUN-PENG; ZHEN-LI, 2009), este efeito é amenizado nas medições que não dependem de dados de posicionamento via satélite.

4.8 MEDIÇÃO FOTOGRAMÉTRICA COM A UTILIZAÇÃO DA CÂMERA X5S

Efetou-se um voo em trajetória serpentina a uma distância aproximada de 5m da cena para medição contendo o tubo de PVC e a estrutura piramidal de esferas com a câmera X5S e o Matrice 210 V2. As aquisições foram processadas com informação de posicionamento proveniente do GNSS, RTK e barras de escala em cena, e comparadas com a medição de referência. A Figura 76 apresenta o RPAS em voo e a cena alvo da medição. Realizou-se quatro reconstruções distintas, sendo elas: GNSS, GNSS/barras de escala, RTK e RTK/barras de escala.

Figura 76 – RPAS realizando o voo para aquisição e cena montada para medição.



RPAS realizando as aquisições com a X5S

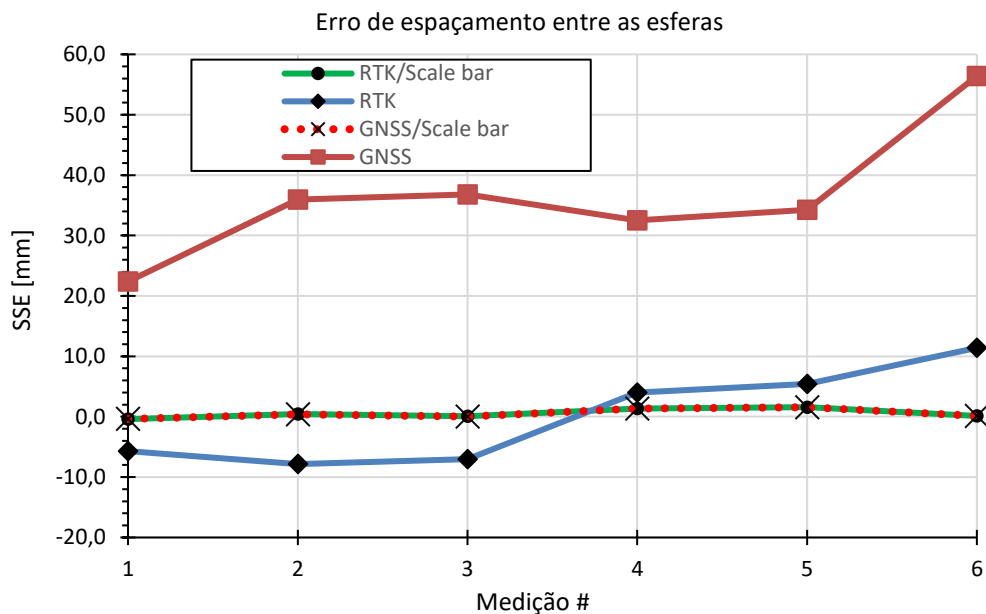


Cena contendo o tubo de PVC e a estrutura piramidal de esferas

Fonte: Autor.

A Figura 77 apresenta o SSE para as quatro estratégias de processamento para todos os pares de esferas no artefato piramidal da esfera. É possível identificar que as medidas que incluem as informações das barras de escala possuem o menor erro de escala, conforme o esperado.

Figura 77 – Erro de espaçamento entre as esferas da medição realizada com o conjunto X5S e lente de 45mm.



Fonte: Autor.

Em ambos os casos que utilizam barras de escala (GNSS/scale bar e RTK/scale bar), o SSE máximo representa 0,26% da distância dos centros da esfera. Ao comparar os dois casos que não usam as informações das barras de escala para a definição da escala da cena, ou seja, apenas as informações GNSS e RTK, as medições com base nas informações GNSS têm os maiores erros de medição. Para o GNSS, o SSE máximo representa 5,9% da distância dos centros das esferas. Para o RTK, o SSE máximo representa 1,2% da distância dos centros da esfera.

As diferenças de barras de escala e erros de SSE podem ter acontecido devido a vários fatores, incluindo o uso de uma seleção manual de nuvem de pontos para cada esfera e cálculos de nuvem de pontos baseados em textura. Esses resultados são compatíveis com as contribuições das maiores incertezas nos dados GNSS em relação às incertezas nos dados RTK (DONG-FENG; YUN-PENG; ZHEN-LI, 2009). Esse efeito também pode ser explicado por uma autocalibração da câmera relativamente pobre, considerando que o gimbal da câmera usado não possibilita aquisições em todos os ângulos de rotação da câmera desejados.

4.9 DISCUSSÃO

As avaliações realizadas buscaram determinar a configuração ideal de parâmetros para o sistema construído, além de levantar os erros de medição utilizando diversos tipos de padrão e superfícies calibrados através do sistema Gom Atos Scan Box e o laser interferométrico. As reconstruções adotam o baseline do sistema estéreo com o *bundle adjustment* do software comercial Agisoft Metashape. A calibração do baseline apresentou uma distância de aproximadamente 1066,67 mm e possibilitou adotar a distância entre as câmeras como escala portátil solidaria ao sistema.

Os resultados das comparações entre as medições do SV3D com os métodos tradicionais de aplicação e escala em cena são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Compilação dos resultados apresentados. Onde: \sphericalangle artefato piramidal; ξ região com defeitos artificiais.

Parâmetro	GNSS	RTK	Escalas	Baseline
Tempo de processamento (h)	6.4	6.0	2.6	3.6
# de pontos	50.528	107.006	93.063	97.336
σ PE (mm)	0,29	0,29	0,13	0,24
PE (mm)	2,97	2,93	0,98	2,43
SSE (mm)	-18,97	4,48	-0,02	-0,60
B1 erro (mm)	- 4,70	1,22	-0,13	-0,45
B2 erro (mm)	- 4,76	1,22	-0,05	-0,38
B3 erro (mm)	- 4,79	1,18	-0,09	-0,41
B4 erro (mm)	- 4,80	1,18	-0,12	-0,47
Max \sphericalangle	1,99	2,08	3,91	2,11
Min \sphericalangle	-1,74	-4,19	-0,90	-0,91
Média \sphericalangle	-0,06	0,06	0,04	0,03
σ \sphericalangle	0,40	0,39	0,32	0,35
Max ξ	1,57	1,22	1,29	1,34
Min ξ	-1,03	-0,64	-0,50	-0,51
Média ξ	0,00	0,01	0,01	0,01
σ ξ	0,19	0,13	0,12	0,12

Fonte: Autor.

A análise dos resultados mostra a viabilidade em se utilizar o sistema proposto para a medição de cenas não preparadas a curta distância, inclusive para a medição da geometria de *risers* em plataformas *offshore*, o erro máximo para a medição realizada é da ordem de 0,56 mm.

No entanto, o processo de medição em ambiente externo depende fortemente das condições ambientais, que apresentam baixa chance de se repetir em dias distintos, além da logística que demanda tempo de aproximadamente 1 dia para realização da medição, considerando a preparação dos materiais e equipamentos e deslocamento até o local do ensaio.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho descreveu o desenvolvimento de um sistema de visão estéreo integrado a um RPAS comercial para medição a curta distância em locais de difícil acesso onde a instalação de barras de escala seja inviável. As aquisições são realizadas através de uma conexão WI-FI entre um tablet e um computador embarcado DJI *Manifold 2G*. O SV3D é composto por duas câmeras FLIR Blackfly *Global Shutter* de 12.4 MP, e as imagens e os dados de postura são armazenados no computador embarcado. O processamento da nuvem de pontos e malha é realizado posteriormente ao voo através do software *Agisoft Metashape*.

5.1 PRINCIPAIS RESULTADOS

O sistema estéreo foi fixado em uma estrutura especialmente concebida para minimizar a movimentação relativa entre as câmeras, e utilizou-se lentes *ruggedized* Schneider de boa qualidade, o que possibilitou realizar uma calibração com erro de reprojeção da ordem de 1,02 pixel.

Os ensaios realizados para validação do Sistema de Visão estéreo para medição 3D (SV3D) em laboratório apresentaram resultados satisfatórios para medição de cenas não preparadas, incluindo a geometria externa de *risers*. A medição que utilizou a informação do *baseline* entre as câmeras para aplicar escala na medição apresentou um desvio padrão (σ) de 0,38 mm no erro em comparação à uma medição de referência, enquanto o processo com a definição da escala a partir de quatro escalas em cena, apresentou σ de 0,36 mm.

Avaliou-se diferentes procedimentos de aquisição com o RPAS em voo, sendo comparados dois métodos típicos utilizados na inspeção visual com drone em plataforma, seguindo os requisitos necessários para uma boa aquisição fotogramétrica. A avaliação do procedimento de aquisição entre apenas rotação do *gimbal*, deslocamento vertical e serpentina, possibilitou identificar que a trajetória serpentina se mostrou melhor entre as três trajetórias avaliadas, com desvio padrão entre a comparação da superfície reconstruída e a de referência de aproximadamente 0,58 mm.

Realizou-se uma calibração do sistema com auxílio de uma câmera comercial disponível para o RPAS, o que possibilitou encontrar as transformadas entre as câmeras do SV3D e o RPAS. Este processo permitiu utilizar a informação de posição e orientação do INS nas imagens adquiridas com o SV3D.

Com base no guia VDI/VDE 2634 realizou-se uma avaliação do SV3D, onde foi possível apontar a estimativa do erro sistemático máximo (SSE) de -0,12 mm para o SV3D e -0,07 mm para escalas em cena, enquanto o erro máximo de apalpação (PE) apresentado foi de aproximadamente 2,88 mm para o SV3D e 1,11 mm para escalas.

O desvio padrão em relação a posição média do RPAS através dos dados de posicionamento apresentou resultados de aproximadamente 1108 mm para GNSS e 5,58 mm para GNSS / RTK.

A medição realizada com a câmera X5S apresentou os seguintes resultados na avaliação do SSE em relação aos valores de referência: 0,26% para a barra de escala, 5,9% para o GNSS e 1,2% para o RTK.

Avaliou-se as incertezas no processo de medição para as condições ambientais existentes no momento do ensaio, dia ensolarado e com vento máximo de aproximadamente 18,1 km/h onde foi possível estimar um erro máximo de aplicação de escala a cena de $\pm 0,56$ mm, correspondendo a aproximadamente 0,056% da região de medição.

Com base na comparação das medições com o SV3D desenvolvido e a técnica convencional de fotogrametria (apenas uma câmera e uso de escalas em cena), foi possível concluir que o SV3D apresentou desempenho muito próximo a utilização de barras de escala, tornando-se assim uma solução promissora para medições da geometria de *risers* sem a necessidade de escalas em cena.

A montagem do SV3D no RPAS implica no aumento da massa máxima de decolagem do RPA para 6,12 kg, muito próximo do limite (6,14 kg), o que conseqüentemente reduz o tempo de voo, no entanto esta redução é parcialmente compensada com a aquisição de duas imagens simultâneas e com *baseline* conhecido.

5.2 PRINCIPAIS LIMITAÇÕES

As principais limitações de caráter tecnológico do sistema são:

- O sistema proposto neste trabalho utiliza detecção de pontos apenas com a utilização da textura existente na cena, sem a utilização de técnicas de adição de textura, portanto o sistema terá desempenho reduzido em cenas que contenham regiões que apresentem pouca textura.
- A medição de *riser* apresenta um desafio para o processo de aquisição realizado, a superfície do *riser* que fica orientada para o casco da plataforma,

é uma região oclusa para as câmeras, impossibilitando assim a medição desta área.

- A correção de posição realizada através da técnica RTK depende de uma base fixa e estável para o seu funcionamento adequado. No entanto, em plataformas *offshore* normalmente existem movimentações o que pode tornar seu uso inviável.

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir apresenta-se algumas sugestões para realização de investigações posteriores:

- Estudo de possíveis alternativas, como projeção de textura na cena através de laser e/ou utilização de lidar para otimização do processo de medição.
- Avaliação de um sistema estéreo disposto na vertical, permitindo um melhor aproveitamento do campo de visão das imagens devido o mesmo sentido do comprimento do tubo.
- Avaliar a torção que o *riser* pode sofrer.
- Realizar a calibração do sistema estéreo no próprio software de fotogrametria.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **ABNT NBR-15595 - Acesso por corda - Procedimento para aplicação do método.** [s.l: s.n.].
- AGISOFT. **Agisoft Metashape User Manual** Agisoft, , 2019. . Disponível em: <www.agisoft.com>. Acesso em: 11 nov. 2019.
- AGISOFT. **Agisoft Metashape photogrammetric SfM- MVS commercial software version 1.7.2.** . Disponível em: <<https://www.agisoft.com/>>. Acesso em: 23 maio. 2019.
- ÁGUAS, P. E. M.; MORAIS, J. M. DE. **Uma história tecnológica da PETROBRAS.** [s.l: s.n.].
- AHMAD, N. et al. Reviews on Various Inertial Measurement Unit (IMU) Sensor Applications. **International Journal of Signal Processing Systems**, v. 1, n. 2, p. 256–262, 2013.
- ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R. DE. **Fundamentos da metrologia científica e industrial.** [s.l: s.n.].
- ALLEVATO, A. **Using CvBridge To Convert Between ROS Images And OpenCV Images - ROS Wiki.** . Disponível em: <http://wiki.ros.org/cv_bridge/Tutorials/UsingCvBridgeToConvertBetweenROSImagesAndOpenCVImages>. Acesso em: 4 abr. 2021.
- ANP. **Previsão de produção e atividades.** . Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/previsao-de-producao-e-atividades>>. Acesso em: 28 out. 2020.
- API RP 17B. Design of Risers for Floating Production Systems (FPSs) and Tension-Leg Platforms (TLPs) Get The Job Design of Risers for Floating Production Systems (FPSs) and Tension-Leg Platforms (TLPs). 1998.
- ATKINSON, K. B. **Close range photogrammetry and machine vision.** [s.l: s.n.].
- BAI, Y. **Pipeline and Risers.** Stavanger: [s.n.]. v. 3
- BARAZZETTI, L. NETWORK DESIGN in CLOSE-RANGE PHOTOGRAMMETRY with SHORT BASELINE IMAGES. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 4, n. 2W2, p. 17–23, 2017.
- BARROCA, D.; ALVES, M. Posicionamento GPS utilizando o conceito de estação virtual. 2008.
- BARRY, A. J. et al. Fast Onboard Stereo Vision for UAVs. **Vision-based Control and Navigation of Small Lightweight UAV Workshop, International Conference On Intelligent Robots and Systems (IROS)**, p. 1–7, 2015.
- BOUGUET, J. **Camera Calibration Toolbox for Matlab.** . Disponível em: <www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html#examples%0D>. Acesso em: 2 mar. 2019.
- BROWN, D. C. Close-range camera calibration. **Photogrammetric Engineering**, v. 37, n. 8, p. 855–866, 1971.
- BUDIYONO, A. Advances in Unmanned Aerial Vehicles Technologies. v. 5, n. 30570520, p. 1–7, 2008.
- BUSCHINELLI, P. et al. **Targetless Photogrammetry Network Simulation for**

Inspection Planning in oil and gas industry. ISPRS 2020. Anais...Nice, France: 2020.

BUSCHINELLI, P. DE D. V. **Medição óptica de formas 3D em meio subaquático através de interfaces planas de refração utilizando triangulação inversa.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

BUTTERFLYGYRO. “Sensor STIM300,”. n. November, p. 1–48, 2011.

CHAKRABARTI, S. K. **HANDBOOK OF OFFSHORE ENGINEERING.** [s.l.: s.n.]. v. I

CHU, T. C.; RANSON, W. F.; SUTTON, M. A. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. **Experimental Mechanics**, v. 25, n. 3, p. 232–244, 1985.

CIGLA, C.; THAKKER, R.; MATTHIES, L. Onboard stereo vision for drone pursuit or sense and avoid. **IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops**, v. 2018-June, n. May, p. 738–746, 2018.

DANIILIDIS, K.; KLETTE, R. **Imaging beyond the pinhole camera.** [s.l.: s.n.].

DE FRANÇA, J. A. Calibração de um sistema de visão estéreo: de correspondência de pontos à reconstrução euclideana. 2005.

DE LIMA, C. R. G. Um Estudo Comparativo de Sistemas De Medição Aplicáveis Ao Controle Dimensional De Superfícies Livres Em Peças De Médio E Grande Porte. 2006.

DE STEFANI, V.; CARR, P. A model to estimate the failure rates of offshore pipelines. **Proceedings of the Biennial International Pipeline Conference, IPC**, v. 4, n. August, p. 437–447, 2010.

DECEA. Instrução sobre aeronaves não tripuladas e o acesso ao espaço aéreo brasileiro. 2020.

DEFORME, R. P. INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE ÂNGULO DE INSTALAÇÃO DE LINHAS FLEXÍVEIS. v. 13, 2015.

DEVOLD, H. **Oil and gas production.** [s.l.: s.n.]. v. 5

DJI. Matrice 200 Series V2. **DJI.com**, p. 4–5, 2019.a.

DJI. **Matrice 200 series v2.** . Disponível em: <<https://www.dji.com/matrice-200-series-v2>>. Acesso em: 5 fev. 2020.b.

DJI. **Manifold.** . Disponível em: <<https://www.dji.com/br/manifold>>. Acesso em: 19 ago. 2019.c.

DJI. **Zenmuse X5S.** . Disponível em: <<https://www.dji.com/zenmuse-x5s>>. Acesso em: 5 fev. 2020.d.

DJI. **Zenmuse P1.** . Disponível em: <<https://www.dji.com/zenmuse-p1>>.

DJI. **Dveloper onboard sdk connection.** . Disponível em: <<https://developer.dji.com/onboard-sdk/documentation/quickstart/device-connection.html>>. Acesso em: 26 out. 2020.b.

DJI. **Zenmuse L1.** . Disponível em: <<https://www.dji.com/zenmuse-l1>>.

DONG-FENG, R.; YUN-PENG, L.; ZHEN-LI, M. Test and analysis on the errors of GPS observation in mining field. **Procedia Earth and Planetary Science**, v. 1, n. 1, p. 1233–1236, 2009.

DPREVIEW. Rolling shutter. 2017.

DRUMOND, G. P. et al. Pipelines, risers and umbilicals failures: A literature review. **Ocean Engineering**, v. 148, n. October 2017, p. 412–425, 2018.

FANTIN, A. V. Medição de formas livres tridimensionais por topogametria. **Revista de Química Textil**, n. 194, p. 50–52, 1999.

FAVARET CAVALCANT, J. R. **International Comparative Legal Guides.** . Disponível em: <<https://iclg.com/practice-areas/oil-and-gas-laws-and-regulations/brazil>>. Acesso em: 21 maio. 2020.

FLIR. Blackfly@s. 2018.

FRASER, P. C. Camera Calibration Considerations for UAV Photogrammetry Cameras for Drones / UAS / UAVs. n. June 2018, p. 3–7, 2018.

G. MAAS, H. Robust Automatic Surface Reconstruction with Structured Light. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 29, n. B5, p. 709–713, 1992.

GALLEGUILLOS, C. et al. Thermographic non-destructive inspection of wind turbine blades using unmanned aerial systems. **Plastics, Rubber and Composites**, v. 44, n. 3, p. 98–103, 2015.

GARCÍA CARRILLO, L. R. et al. Combining stereo vision and inertial navigation system for a quad-rotor UAV. **Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications**, v. 65, n. 1–4, p. 373–387, 2012.

GOM. **GOM Inspect**. . Disponível em: <<https://www.gom.com/>>. Acesso em: 23 maio. 2019.

GOM. **GOM Atos Compact Scan**. . Disponível em: <<https://www.gom.com/metrology-systems/atos/atos-compact-scan.html>>. Acesso em: 29 out. 2020.

GREWAL, M. S.; WEILL, L. R.; ANDREWS, A. P. **Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration, Second Edition**. Second ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.

HARRIS, C.; STEPHENS, M. A combined corner and edge detector. p. 147–151, 1988.

HARTLEY, R. Z. **Multiple view geometry in computer vision**. [s.l: s.n.]. v. 91

HEIKKILA, J.; SILVEN, O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. p. 1106–1112, 2002.

HERNIOU, J. W. C. **Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation.pdf**, [s.d.].

HOFMANN, A. C. H. **Sistema Endoscópico Estereoscópico para Medição Geométrica de Uniões Soldadas de Dutos**. [s.l: s.n.].

INERTIALSENSE. **uINS User Manual**.

JOSHI, D. **Drone Technology Uses and Applications for Commercial, Industrial and Military Drones in 2020 and the Future**. . Disponível em: <<https://www.businessinsider.com/drone-technology-uses-applications?r=US&IR=T%0Ahttps://www.businessinsider.com/drone-technology-uses-applications?r=DE&IR=T>>.

KANATANI, K.; SUGAYA, Y.; NIITSUMA, H. Triangulation from Two Views Revisited: Hartley-Sturm vs. Optimal Correction. **Proceedings of the British Machine Vision Conference 2008**, n. September, p. 18.1-18.10, 2008.

KOHLER, C. Optical Measurement , Comparison and Signaling of Large Free Form Surfaces. v. 5, p. 957–966, 2012.

LIMA, S. R. S. DE. **Integração GPS/INS utilizando sensores inerciais baseados em sistemas microeletromecânicos (MEMS)**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná - UFPR, 2005.

LUHMANN, T. Close range photogrammetry for industrial applications. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 65, n. 6, p. 558–569, 2010.

LUHMANN, T. et al. **Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging**. 2. ed. Germany: De Gruyter, 2014.

MALLISON, H.; OLIVER WINGS; WINGS, O. PHOTOGRAMMETRY IN PALEONTOLOGY – A PRACTICAL GUIDEletín N°12. **Journal of Paleontological**

Techniques, v. 12, n. 12, p. 1–31, 2014.

MARCELINO, G. C. **Universidade Federal De Santa Catarina Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica**. [s.l: s.n.].

MARINHO, C. A. et al. **In-service flares inspection by unmanned aerial vehicles (UAVs)**. 18th World Conference on Nondestructive Testing. **Anais...Durban**: 2012.

MARINHO, M. G.; DOS SANTOS, J. M.; CARNEVAL, R. DE O. **Integrity Assessment and Repair Techniques of Flexible Risers**. Volume 4: Terry Jones Pipeline Technology; Ocean Space Utilization; CFD and VIV Symposium. **Anais...Hamburg**: ASMEDC, 1 jan. 2006.

MARTINS, C. O. D. **Desenvolvimento de Metodologias de Inspeção e Monitoramento de Risers Flexíveis através de Técnicas Micromagnéticas de análise de tensões**. 2008.

MAZUR, M.; WIŚNIEWSKI, A.; MCMILLAN, J. **Clarity from above PwC global report on the commercial applications of drone technology**. **PwC**, n. May, p. 3/40, 2016.

MCGUIRE, K. et al. **Efficient Optical Flow and Stereo Vision for Velocity Estimation and Obstacle Avoidance on an Autonomous Pocket Drone**. **IEEE Robotics and Automation Letters**, v. 2, n. 2, p. 1070–1076, 2017.

MCMANAMON, P. **LiDAR Technologies**. [s.l: s.n.].

MIAN, O. et al. **Direct georeferencing on small unmanned aerial platforms for improved reliability and accuracy of mapping without the need for ground control points**. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**, v. 40, n. 1W4, p. 397–402, 2015.

NEX, F.; REMONDINO, F. **UAV for 3D mapping applications: A review**. **Applied Geomatics**, v. 6, n. 1, p. 1–15, 2014.

NIKOLIC, J. et al. **A UAV system for inspection of industrial facilities**. **IEEE Aerospace Conference Proceedings**, 2013.

PALAEO3D. **Scale bars**. Disponível em: <http://palaeo3d.de/WP/?page_id=23>. Acesso em: 12 nov. 2020.

PETROBRAS. **N-1597 Ensaio Não-Destrutivo Visual N-1597**. p. 1–6, 2013.

PETROBRAS. **Plataformas Petrobras**. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/>>. Acesso em: 3 nov. 2020.

PINTO, T. L. F. C. **Medição Óptica, Comparação e Sinalização de Superfícies com Forma Livre de Grande Extensão**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

PIX4D. **Large-scale industrial surveying & drone photogrammetry | Pix4D**. Disponível em: <<https://www.pix4d.com/blog/large-scale-industrial-surveying-drone-photogrammetry>>. Acesso em: 3 abr. 2021.

Placas de vídeo GTX 1080 Ti | NVIDIA GeForce. Disponível em: <<https://www.nvidia.com/pt-br/geforce/products/10series/geforce-gtx-1080-ti/>>. Acesso em: 4 abr. 2021.

Processador Intel® Core™ i7-9700K (12 M de cache, até 4,90 GHz). Disponível em: <<https://www.intel.com.br/content/www/br/pt/products/sku/186604/intel-core-i79700k-processor-12m-cache-up-to-4-90-ghz/specifications.html>>. Acesso em: 4 abr. 2021.

QUIGLEY, M.; GERKEY, B.; SMART, W. D. **Programming Robots with ROS A Practical Introduction to the Robot Operating System**. [s.l: s.n.]. v. 53

REMONDINO, F. **Detectors and Descriptors for Photogrammetric Applications**. **BRISK Binary Robust Invariant Scalable Keypoints**, p. 12–19, 2011.

REMONDINO, F. et al. **Uav Photogrammetry for Mapping and 3D Modeling – Current Status and Future Perspectives**. **ISPRS - International Archives of the**

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. XXXVIII-1/, n. June 2014, p. 25–31, 2012.

REMONDINO, F.; FRASER, C. Digital Camera Calibration Methods: Considerations and Comparisons. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, n. 5, p. 266–272, 2006.

RICHARD HARTLEY, A. Z. **Multiple View Geometry**. [s.l.: s.n.]. v. 53

ROBSON, S. et al. Optimised multi-camera systems for dimensional control in factory environments. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 232, n. 10, p. 1707–1718, 2018.

SANKARASRINIVASAN, S. et al. Health Monitoring of Civil Structures with Integrated UAV and Image Processing System. **Procedia Computer Science**, v. 54, p. 508–515, 2015.

SCH, M. et al. MODELING OF IMAGE SHUTTERS AND MOTION BLUR IN ANALOG AND DIGITAL CAMERA SYSTEMS Multimedia Communications and Signal Processing 2 Fraunhofer Institute for Integrated Circuits IIS University of Erlangen-Nuremberg. p. 3457–3460, 2009.

SCHARSTEIN, DANIEL; SZELISKI, R. A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms. n. 1, 2003.

SCHNEIDER. Xenon-Topaz 2.0/50. p. 1–6, 2018.

SHAKHATREH, H. et al. Unmanned Aerial Vehicles: A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges. p. 1–58, 2018.

SHORTIS, M; CLARKE, T; SHORT, T. A comparison of some techniques for the subpixel location of discrete target images. **Denis Firmansyah**, v. 1, n. 2, p. 12–17, 1994.

STIVANELLO, M. E. Desenvolvimento de uma biblioteca para sistemas de visão estereoscópica para robótica móvel. p. 128, 2008.

TADDIA, Y.; STECCHI, F.; PELLEGRINELLI, A. Coastal Mapping Using DJI Phantom 4 RTK in Post-Processing Kinematic Mode. **Drones**, v. 4, n. 2, p. 9, 2020.

TENG, G. E. et al. Mini-UAV LIDAR for power line inspection. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**, v. 42, n. 2W7, p. 297–300, 2017.

TRIGGS, B. AL. Bundle Adjustment - A modern Synthesis. **Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference**, v. 34099, p. 943–946, 1982.

TSAI, R. Versatile Camera Calibration Techniaue for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology. **Robotics and Automation**, n. 4, 1987.

UNIVERSITY, N. S. **Ground Sample Distance**. . Disponível em: <<https://cnr.ncsu.edu/geospatial/uas-workshop/>>. Acesso em: 15 jun. 2019.

VARGAS-LONDOÑO, T. et al. A theoretical and experimental analysis of the bending behavior of unbonded flexible pipes. **Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE**, v. 6B, n. June, 2014.

VDI/VDE 2634, P. 2. **VDI/VDE 2634, Part 2 - Optical 3-D measuring systems VDI/VDE guidelines. The Association of German Engineers (VDI). Optical 3D-Measuring Systems. VDI/VDE guidelines**, , 2002.

VEITCH-MICHAELIS, J. **Fusion of LIDAR with stereo camera data - an assessment**. [s.l.] University College London, 2016.

WEGENER, V. **Communication Options for Network RTK**.

WENHAO, F. The specific character of limit errors in close range photogrammetry. **Geo-Spatial Information Science**, v. 4, n. 3, p. 50–56, 2001.

WNBC. **retrotargets**. . Disponível em: <<https://retrotargets.com/coded-targets/>>.

Acesso em: 30 nov. 2020.

WORKSWELL. **Pipeline inspection with thermal diagnostics**, 2016. . Disponível em: <<https://www.drone-thermal-camera.com/wp-content/uploads/pipeline.pdf>>

WU, Y.; SUI, Y.; WANG, G. Vision-Based Real-Time Aerial Object Localization and Tracking for UAV Sensing System. **IEEE Access**, v. 5, p. 23969–23978, 2017.

YOONSEOK PYO, HANCHEOL CHO, LEON JUNG, D. L. **ROS Robot Programming (English)**. GeumCheon-gu, Seoul, Republic of Korea: ROBOTIS Co.,Ltd, 2017.

YOUSEF, K. M. A. et al. SIFT based automatic number plate recognition. **2015 6th International Conference on Information and Communication Systems, ICICS 2015**, p. 124–129, 2015.

YUAN, X. et al. The application of GPS precise point positioning technology in aerial triangulation. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 64, n. 6, p. 541–550, 2009.

ZHANG, Z. Camera Calibration with One-Dimensional Objects. **Analysis**, v. 26, n. 7, p. 892–899, 2004.

ZHENGYOU ZHANG. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. **Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision**, p. 666–673 vol.1, 1999.

ZHOU, Y. 100 % automatic metrology with UAV photogrammetry and embedded GPS and its application in dike monitoring To cite this version : HAL Id : tel-02474315 Universit ´ e Paris-Est Math ´ ematiques & Sciences et Technologies de l ´ Information et de la Communic. 2020.

ZUGE, I.; AG, V. Abnahme und Überwachung photogrammetrischer Messsysteme nach VDI 2634. **Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation**, p. No. 2, p. 117–124, 2002.

APÊNDICE A – SCRIPT PARA GERAR PARES ESTÉREO NO METASHAPE

O script apresentado abaixo permite otimizar o processo de aplicação das distancias entre os pares estéreo adquiridos durante o voo com o SV3D para medição fotogramétrica.

```
import os, Metashape

#Load images
def part_1_Load():
    doc = Metashape.app.document

    #Metashape.app.document.clear()

    #Select images directory
    imgsPath = Metashape.app.getExistingDirectory("Select the folder")
    print("Loading images from path: " + imgsPath)
    filesList = os.listdir(imgsPath)
    imgsList = list()

    i = 0;
    for img in filesList:
        #Checks file extension
        #gets last element in python --> Extension!
        if img.rsplit(".",1)[1].lower() in ["cr2", "png", "jpg", "jpeg", "tif", "tiff"]:
            imgFullPath = "/" .join([imgsPath, img]);
            imgsList.append(imgFullPath)
            i += 1
            print "[" + str(i) + "] Image: " + img

    print("Images used: " + str(i))

    if i < 2:
        print("Error: Not enough images to continue (# images < 2)")
        return 1

#Create stereo pairs

baseline = 0.9527372
unit = "m"
print("Baseline: " + str(baseline) + " " + unit);
start = 0
while (start + 1 < len(imgsList)):
    chunk = doc.addChunk()
    chunk.addPhotos(imgsList[start:start+2]) #gets two itens, yes +2!
    scalebar = chunk.addScalebar(chunk.cameras[0], chunk.cameras[1])
    scalebar.label = chunk.cameras[0].label + " - " + chunk.cameras[1].label
    scalebar.reference.distance = baseline
    start += 2
Metashape.app.document.mergeChunks()

def part_2_PreProcess():
    merged_chunk = Metashape.app.document.chunks[-1]
    merged_chunk.matchPhotos(accuracy=Metashape.HighAccuracy)
    print("Attention: adaptive_fitting=True")
    merged_chunk.alignCameras(adaptive_fitting=True)
    return 0

def part_3_Process():
    doc = Metashape.app.document
    merged_chunk = doc.chunk
    merged_chunk.buildDepthMaps(quality=Metashape.UltraQuality,
    filter=Metashape.AggressiveFiltering)
    merged_chunk.buildDenseCloud(point_colors=True)
    return 0

#Create menu
Metashape.app.addMenuItem("Stereo script/1 Load images (stereo pairs, chunk..)", part_1_Load)
Metashape.app.addMenuItem("Stereo script/2 Pre Process (chunk sparse pc)", part_2_PreProcess)
Metashape.app.addMenuItem("Stereo script/3 Process (dense point cloud)", part_3_Process)
```

APÊNDICE B – SCRIPT EXTRAÇÃO POSTURA GPS

O script apresentado a seguir permite aplicar as posições gravadas no LOG de voo as transformadas entre a câmera e os dados extraídos do GNSS.

```

##%matplotlib widget
#Script para avaliação do erro GPS e RTK- 13/07/2020
#Michael Machado
#Luis Henrique
#Testado no Jupyter notebook
#!pip install pymap3d
import pandas as pd
import sys
import pymap3d as pm
import numpy as np
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
import matplotlib.pyplot as plt
# Seleccione as colunas de interesse
Columns = ['Tick#',
           'offsetTime',
           # 'IMU_ATTI(0):accel:X',
           # 'IMU_ATTI(0):accel:Y',
           # 'IMU_ATTI(0):accel:Z',
           # 'IMU_ATTI(0):gyro:X',
           # 'IMU_ATTI(0):gyro:Y',
           # 'IMU_ATTI(0):gyro:Z',
           # 'IMU_ATTI(0):mag:X',
           # 'IMU_ATTI(0):mag:Y',
           # 'IMU_ATTI(0):mag:Z',
           # 'Mag(0):rawX',
           # 'Mag(0):rawY',
           # 'Mag(0):rawZ',
           # 'IMU_ATTI(0):quatW',
           # 'IMU_ATTI(0):quatX',
           # 'IMU_ATTI(0):quatY',
           # 'IMU_ATTI(0):quatZ',
           'HP:Latitude',
           'HP:Longitude',      # } HomePoint: Ref de posição (LLA0)
           'HP:rthHeight',

           # 'IMU_ATTI(0):Latitude',
           # 'IMU_ATTI(0):Longitude',      # } Fusão GPS + IMU (LLA)
           # 'IMU_ATTI(0):barometer:Raw',
           # 'IMU_ATTI(0):barometer:Smooth',

           'GPS(0):Lat',
           'GPS(0):Long',      # } Dados GPS brutos (LLA)
           'GPS(0):heightMSL',

           # 'IMUEX(0):rtk_Latitude',
           # 'IMUEX(0):rtk_Longitude', # } Possível fusão RTK + IMU (LLA)
           # 'IMUEX(0):rtk_Alti',

           # 'RTKdata:Lat_P',
           # 'RTKdata:Lon_P',      # } Dados RTK_P brutos (LLA)
           # 'RTKdata:Hmsl_P',

           # 'RTKdata:Lat_S',
           # 'RTKdata:Lon_S',
           # 'RTKdata:Hmsl_S',

           # 'RTKdata:Vel_N',
           # 'RTKdata:Vel_E',
           # 'RTKdata:Vel_D',

           'precise_mapping_data:lat_map',
           'precise_mapping_data:lon_map',      # } Posição do centro da câmera (LLA): RTKdata +
offset
           'precise_mapping_data:height_map',

           'precise_mapping_data:offset_N',

```

```

    'precise_mapping_data:offset_E', # } distância (NED) entre o centro da câmera
"precise_mapping_data:" e o sensor RTKdata "offset"
    'precise_mapping_data:offset_D',

#         'IMU_ATTI(0):roll',
#         'IMU_ATTI(0):pitch', # } Orientação do sensor IMU do RPAS
#         'IMU_ATTI(0):yaw',

#         'atitudeExperimental:roll',
#         'atitudeExperimental:pitch', # } Orientação do RPA nos Metadados das imagens
#         'atitudeExperimental:yaw',

#         'IMU_ATTI(0):tiltInclination',
#         'IMU_ATTI(0):tiltDirection',
#         'IMU_ATTI(0):yaw360', # Yaw de 0 a 360 (?)
#         'IMU_ATTI(0):magYaw', # Yaw magnético (sem correção da declinação do GPS)

#         'ctrl_gimbal_follow_debug:GF_cur_roll',
#         'ctrl_gimbal_follow_debug:GF_cur_pitch', # } Orientação do Gimbal nos Metadados
das imagens
#         'ctrl_gimbal_follow_debug:GF_cur_yaw',

#         'ctrl_gimbal_follow_debug:joint_angle_p',
#         'ctrl_gimbal_follow_debug:joint_angle_r',
#         'ctrl_gimbal_follow_debug:joint_angle_y',
#         'ctrl_gimbal_follow_debug:yaw_offset',

#         'cam_utc_data:cam_year',
#         'cam_utc_data:cam_month',
#         'cam_utc_data:cam_day',
#         'cam_utc_data:cam_hour',
#         'cam_utc_data:cam_minute',
#         'cam_utc_data:cam_sec',
#         'cam_utc_data:cam_nano_sec',

    'eventLog' # Log de eventos do RPA (p.ex., momento de captura das imagens)
]

### Seleciona Arquivos de entrada e saída
inFile = r"G:\Meu Drive\VANT3D - Equipe\Experimentos\VOOS DJI Matrice 210 RTK V2\2020.12.17 -
M210+Manifold+SV3D+X5S\LOG\FLY674.csv"
outFile = r"G:\Meu Drive\VANT3D - Equipe\Experimentos\VOOS DJI Matrice 210 RTK V2\2020.12.17 -
M210+Manifold+SV3D+X5S\LOG\FLY674_GPS_RTK.csv"
### Abre o .CSV
CSV = pd.read_csv(inFile, usecols=Columns)
### Reordena as colunas
CSV = CSV[Columns]
### Calcula o offset RPAXGimbal e insere no DataFrame
data = CSV['ctrl_gimbal_follow_debug:GF_cur_roll']/10 - CSV['atitudeExperimental:roll']; #
Operação a ser realizada colunas
cIndex = CSV.columns.get_loc('ctrl_gimbal_follow_debug:GF_cur_yaw')+1 # Posição para criação
da nova coluna
CSV.insert(cIndex, 'GimbalOri:offset_roll', data) # Nome da nova coluna

data = CSV['ctrl_gimbal_follow_debug:GF_cur_pitch']/10 - CSV['atitudeExperimental:pitch'];
cIndex = CSV.columns.get_loc('GimbalOri:offset_roll')+1
CSV.insert(cIndex, 'GimbalOri:offset_pitch', data)

data = CSV['ctrl_gimbal_follow_debug:GF_cur_yaw']/10 - CSV['atitudeExperimental:yaw'];
cIndex = CSV.columns.get_loc('GimbalOri:offset_pitch')+1
CSV.insert(cIndex, 'GimbalOri:offset_yaw', data)
### Calcula GPS+Offset
# Seleciona em array os Offsets, LLA do GPS e LLA0
offsets = np.array([CSV['precise_mapping_data:offset_N'],
                    CSV['precise_mapping_data:offset_E'],
                    CSV['precise_mapping_data:offset_D']]).T/1000
LLA_GPS = np.array([CSV['GPS(0):Lat'], CSV['GPS(0):Long'], CSV['GPS(0):heightMSL']]).T
LLA0 = np.array([CSV['HP:Latitude'], CSV['HP:Longitude'], CSV['HP:rthHeight']]).T
# Converte o GPS+Offset de NED2LLA
Lat,Lon,Alti = pm.ned2geodetic(NED_GPS_offset[:,0], NED_GPS_offset[:,1],
NED_GPS_offset[:,2], LLA0[2000][0], LLA0[2000][1], LLA0[2000][2])
LLA_GPS_offset = np.array([Lat,Lon,Alti]).T
# Adiciona NED_GPS ao DataFrame
cIndex = CSV.columns.get_loc('GPS(0):heightMSL')+1
CSV.insert(cIndex, 'GPS(0):N', NED_GPS[:,0])

```

```

cIndex = CSV.columns.get_loc('GPS(0):N')+1
CSV.insert(cIndex, 'GPS(0):E', NED_GPS[:,1])

cIndex = CSV.columns.get_loc('GPS(0):E')+1
CSV.insert(cIndex, 'GPS(0):D', NED_GPS[:,2])
# Adiciona LLA_GPS_offset ao DataFrame
cIndex = CSV.columns.get_loc('GPS(0):D')+1
CSV.insert(cIndex, 'PosCam:GPSdataLat', LLA_GPS_offset[:,0])

cIndex = CSV.columns.get_loc('PosCam:GPSdataLat')+1
CSV.insert(cIndex, 'PosCam:GPSdataLon', LLA_GPS_offset[:,1])

cIndex = CSV.columns.get_loc('PosCam:GPSdataLon')+1
CSV.insert(cIndex, 'PosCam:GPSdataHeight', LLA_GPS_offset[:,2])
# Converte RTK de LLA2NED
LLA_RTK = np.array([CSV['RTKdata:Lat_P'], CSV['RTKdata:Lon_P'], CSV['RTKdata:Hmsl_P']]).T
N,E,D = pm.geodetic2ned(LLA_RTK[:,0], LLA_RTK[:,1], LLA_RTK[:,2], LLA0[2000][0],
LLA0[2000][1], LLA0[2000][2])
NED_RTK = np.array([N,E,D]).T
# Adiciona NED_RTK ao DataFrame
cIndex = CSV.columns.get_loc('RTKdata:Hmsl_P')+1
CSV.insert(cIndex, 'RTKdata:N_P', NED_RTK[:,0])

cIndex = CSV.columns.get_loc('RTKdata:N_P')+1
CSV.insert(cIndex, 'RTKdata:E_P', NED_RTK[:,1])

cIndex = CSV.columns.get_loc('RTKdata:E_P')+1
CSV.insert(cIndex, 'RTKdata:D_P', NED_RTK[:,2])
#Lista as colunas

#PosCam: GPS+Offset em LLA
#precise_mapping data: RTK + Offset LLA
print(CSV.columns)
CSV.to_csv(outFile, index=0)

```


</launch>

APÊNDICE D – CALIBRAÇÃO EXTRÍNSECA – MATRIZ DE TRANSFORMAÇÃO DO SV3D

O SV3D foi desenvolvido para ser instalado em plataforma comercial de aeronave remotamente pilotada com capacidade a partir de 1,2 Kg e posicionamento GNSS, portanto, para uma otimização da medição, é necessário realizar a calibração do SV3D (composto por duas câmeras FLIR) em relação ao receptor de posicionamento do RPAS (composto por um receptor GNSS e IMU). O DJI Matrice 210 V2 pode ser configurado com a câmera DJI Zenmuse X5S, a qual tem sua a calibração extrínseca entre eles conhecida e disponibilizada através do LOG de voo.

De posse destas informações basta realizar a calibração de câmeras entre X5S e FLIR para assim encontrar uma referência comum, neste caso a X5S, o que possibilita então encontrar a transformada de interesse que relaciona a IMU com a FLIR.

A calibração extrínseca do SV3D é realizada através da aquisição de imagens simultâneas de um padrão 2D com dimensões conhecidas de diversos ângulos (Figura 78). A partir da visualização da mesma imagem pelas duas câmeras, é possível determinar a matriz de transformação geométrica que relaciona o sistema de coordenadas da câmera esquerda (SCE) para o sistema de coordenadas da câmera direita (SCD). A vantagem deste tipo de calibração é que possibilita a inclusão da câmera X5S (SCX) no processo, permitindo assim encontrar as transformações desta para o SCP.

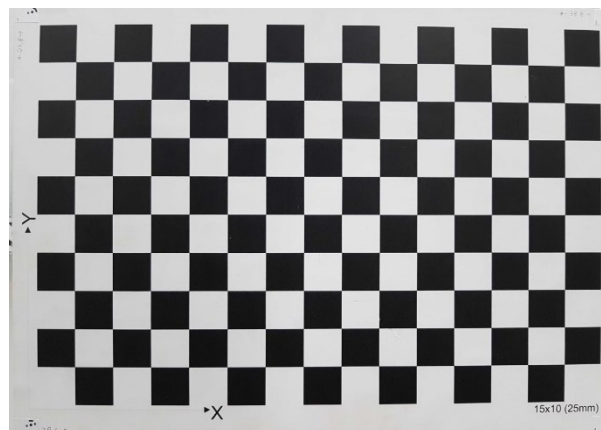


Figura 78 – Padrão de calibração de câmeras do tipo tabuleiro de xadrez (SCP).

Os dados são transformados, do SCP, para o sistema de coordenadas de ambas as câmeras, SCE e SCX por uma matriz constante determinada em laboratório.

A Figura 79 apresenta as posturas do padrão em relação as câmeras direita e esquerda. O resultado desta calibração é a postura da câmera direita escrita em relação a câmera esquerda:

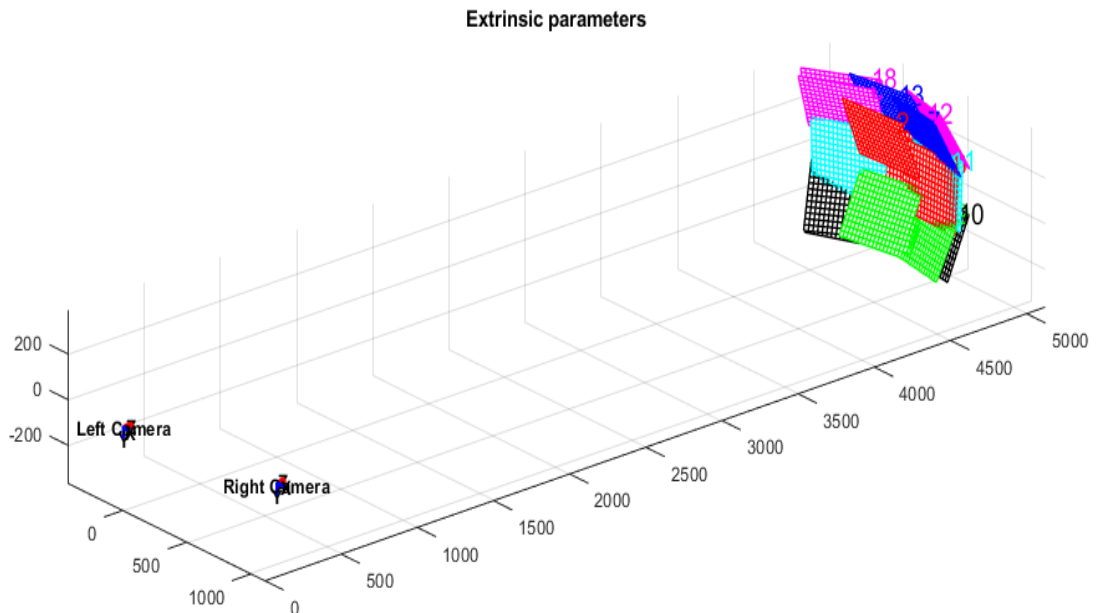


Figura 79 - SCC determinado através da calibração do sistema estéreo SV3D.

Este mesmo sistema de coordenadas do padrão pode ser aplicado também a câmera X5S que deve ser determinado a partir de uma calibração conjunta com o sistema estéreo. A câmera X5S deve estar estática em relação ao sistema estéreo para garantir que uma mesma pose do padrão está sendo visualizada pelas câmeras. A relação entre os sistemas de coordenadas é mostrada na Figura 80 abaixo.

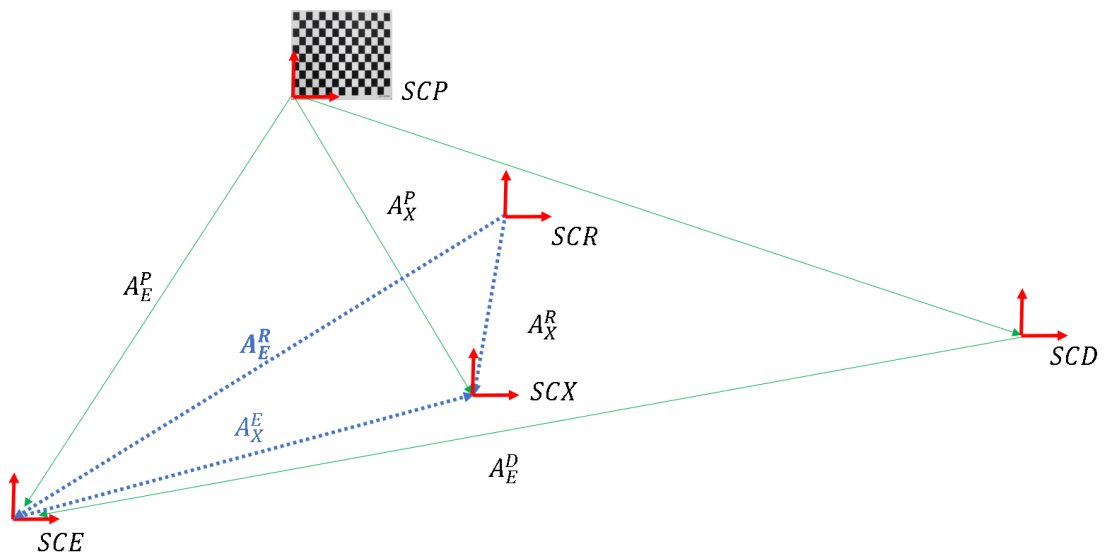


Figura 80 - Relação entre sistemas de coordenadas.

Legenda:

Setas verdes são matrizes pré-determinadas ou determinadas via calibração estéreo;

Seta azul é a matriz a ser determinada pela calibração;

SCP = sistema de coordenadas do padrão para calibração das câmeras;

SCE = sistema de coordenadas da câmera esquerda;

SCD = sistema de coordenadas da câmera direita;

SCX = sistema de coordenadas da câmera X5S;

SCR = sistema de coordenadas do RPAS

A_2^1 = Matriz de transformação homogênea que indica a postura do SC2 em relação ao SC1.

Com as indicações na Figura 80, é possível estabelecer a seguinte relação das matrizes de transformação homogênea, que indicam a posição e orientação relativa entre os sistemas de coordenadas de interesse:

$$A_P^X = A_E^X \cdot A_P^E$$

Isolando a matriz à determinar:

$$A_E^X = A_P^X \cdot (A_P^E)^{-1}$$

Sendo que a matriz de transformação homogênea, e a sua inversa, podem ser descritas como:

$$A = \left[\begin{array}{ccc|c} R_{xx} & R_{yx} & R_{zx} & T_x \\ R_{xy} & R_{yy} & R_{zy} & T_y \\ R_{xz} & R_{yz} & R_{zz} & T_z \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c} R & T \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right] \quad A^{-1} = \left[\begin{array}{c|c} R^T & -R^T \cdot T \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right]$$

Com a matriz A_E^X determinada é possível adotar a transformação que relaciona a câmera esquerda do sistema estéreo com a X5S, considerando a relação de transformações ilustrada na Figura 81

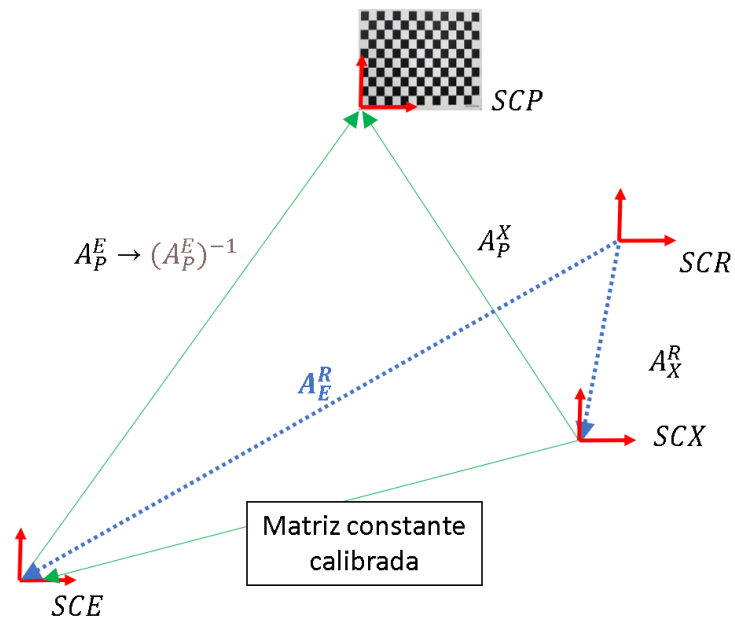


Figura 81 – Relação de SC da X5S para a Câmera esquerda.

A calibração da transformada entre o RPAS e a camera X5S foi realizado através de medição manual das distâncias aproximadas entre o centro do RPAS e o centro óptico da X5S. A Figura 82 ilustra a medição entre o RPAS e a X5S.

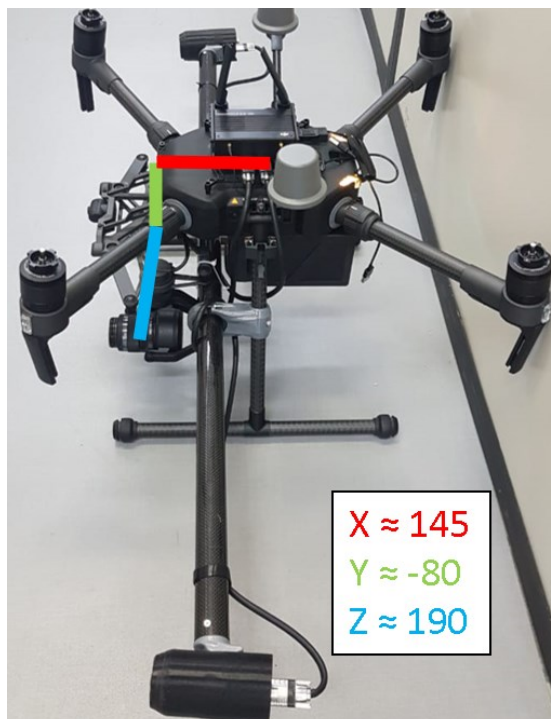


Figura 82 – Relação de SC da X5S para a Câmera esquerda.

As orientações dos eixos dos SC foram extraídas do LOG de voo. Aplicou-se as rotações necessárias relacionando os dois sistemas de coordenadas. Realizou-se a concatenação em uma matriz homogênea da transformada entre o RPAS e a X5S.

De posse destas transformações é possível estabelecer a relação entre os sistemas de coordenadas do RPAS (SCR), a X5S (SCX) e a câmera esquerda (SCE), conforme demonstrado na Figura 83 encontrando deste modo a transformada de interesse que representara a postura do sistema estéreo em relação ao RPAS.

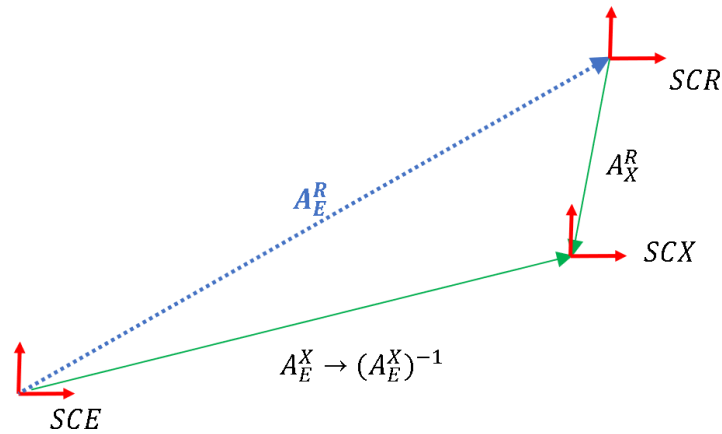


Figura 83 – Relação de SC da X5S para a Câmera esquerda.

Por fim, baseando-se na Figura 83 é possível escrever a equação que relaciona postura do sistema estéreo através da câmera esquerda em relação ao RPAS, da seguinte forma:

$$A_E^R = A_E^X \cdot (A_D^X)^{-1}$$

Procedimento de calibração da matriz extrínseca A_X^E

Como o SV3D e a X5S montados no RPAS realizar os seguintes passos para calibração:

- 1) Manter o conjunto em uma superfície estática;
- 2) Fixar o padrão tipo tabuleiro de xadrez a uma distância de aproximadamente 5m;

Focar a X5S (utilizar a câmera na configuração manual, ajustando os parâmetros que melhor se aplicam a hora da aquisição);

- 3) Realizar aquisição com ambas as câmeras de cada postura do padrão;
- 4) Realizar a calibração das câmeras através da toolbox de calibração Bouguet;
- 5) Calcular matriz de transformação de interesse com SV3D.m e salvar dados;
- 6) Inserir os dados no StereoAcquisitionVant3D.cpp;

Script de cálculo da matriz de transformação do SV3D

```

%% Abrindo os resultados de calibração da
X5S
Resultsx5s =
load('Calib_Results_x5s.mat', 'Rc_2',
'Tc_2');

Rc_2x5s = Resultsx5s.Rc_2;
Tc_2x5s = Resultsx5s.Tc_2;
Ax5s = [Rc_2x5s Tc_2x5s; 0 0 0 1];

%% Abrindo os resultados de calibração da
FLIR
ResultsFlir =
load('Calib_Results_flir_1.mat', 'Rc_2',
'Tc_2');

Rc_2flir = ResultsFlir.Rc_2;
Tc_2flir = ResultsFlir.Tc_2;
Aflir = [Rc_2flir Tc_2flir; 0 0 0 1];

%% Transformada da X5S para a FLIR
transf = Ax5s*inv(Aflir);

save('transfX2F.mat', 'transf');

PosIMULat = -27.6026292862259;
PosIMULon = -48.5191464192013; %} Posição
da IMU LLA
PosIMUAlt = 27.89816;

p = lla2ecef([PosIMULat PosIMULon
PosIMUAlt], 'WGS84');
IMUX = p(1);
IMUY = p(2); %} Pos. da IMU ECEF
IMUZ = p(3);

IMUXYZ = [IMUX; IMUY; IMUZ];

% Orientação
OrIMURoll = 0.02756617128300865;
OrIMUPitch = 0.7247533200759658; %}
Orientação da IMU em degree
OrIMUYaw = -8573137883174890;

%Conv angulos RPY to rotation matrix

```

```

X5SXYZ = [X5SX; X5SY; X5SZ];

% Orientação
OrX5SRoll = 0;
OrX5SPitch = 0.7; %} Orientação da IMU em
degree
OrX5SYaw = -85.9;

%Conv angulos RPY to rotation matrix
euldeg = [OrX5SRoll OrX5SPitch OrX5SYaw];
eulX5S = deg2rad(euldeg);

rotmX5SZYX = eul2rotm(eulX5S);

% Transf coord homogênea

tranfX5S2w = [rotmX5SZYX X5SXYZ; 0 0 0
1];
%% Escrevendo a IMU em relação a X5S
%AX5s->w
%AIMU->w
%AX5s->w = AIMU->X5S * AIMU->w
%Isolando a transformada de interesse
temos:
%AIMU->X5s = AX5s->w * (AIMU->w)^-1

IMU2X5Srel = tranfX5S2w *
inv(tranfIMU2w);
%% Salvar a matriz IMU para a X5S

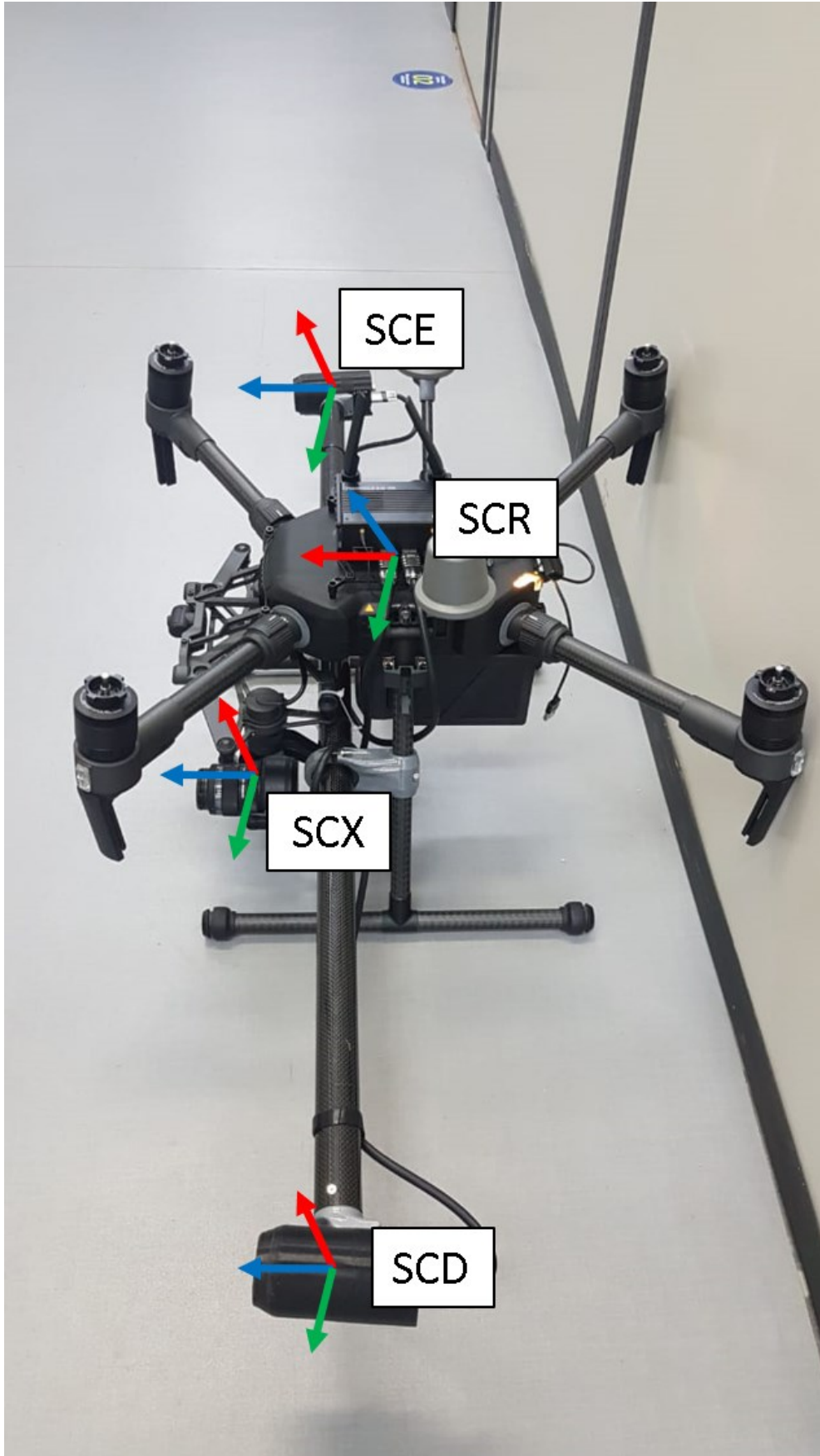
save('transfIMU2F.mat', 'IMU2X5Srel');
Mx5s = load('transfX2F');
AXF = Mx5s.transf;
%% Abrindo a matriz da IMU 2 X5s

MaIMU = load('transfIMU2F');
AXI = MaIMU.IMU2X5Srel;
%% Aplicando a transformada

offsetSV3D = AXF*AXI
%% Salvar a matriz IMU para a FLIR

save('offsetSV3D.mat', 'offsetSV3D');

```



APÊNDICE E – ESPECIFICAÇÕES DOS CONJUNTOS ÓPTICOS

A configuração óptica principal adotada para o SV3D consiste em duas câmeras FLIR e duas lentes Schneider conforme configurações a seguir:

Tabela 14 - Características principais da câmera *Blackfly* BFS-U3-123S6C-C.

Característica	Câmera
Tipo de câmera	Industrial
Fabricante	FLIR
Modelo	BFS-U3-123S6C-C
Resolução	4096 x 3000
Tamanho do pixel	3,45 μ m
Shutter	Global
Tempo de exposição	10 μ s a 30 s
Interface	USB 3.1
FPS	30
API	C/C++/C#/Labview
Massa	36g
Tipo de sensor	CMOS color
Tipo de lente	C-Mount

Fonte: (FLIR, 2018).

Tabela 15 - Características principais da lente Xenon Topaz 2.0/50 Ruggedized.

Característica	Lente
Fabricante	Schneider
Modelo	Xenon Topaz 2.0/50 Ruggedized
Resolução	3,65 μ m
Comprimento focal	50mm
f/#	2 a 11
Transmissão	400nm a 1.000nm
Ângulo de abertura	20°
Tipo de conexão	C-Mount
Massa	204g

Fonte: (SCHNEIDER, 2018).

Em algumas etapas do processo, por exemplo para a avaliação do erro de posicionamento, configuração da trajetória para aquisição e calibração do SV3D em relação ao RPAS, utilizou-se a câmera DJI *zenmuse* X5S configurada com a lente Olympus de 45mm conforme as especificações a seguir:

Tabela 16 - Características principais da câmera DJI Zenmuse X5S.

Característica	Câmera
Tipo de câmera	Específica RPAS
Fabricante	DJI
Modelo	Zenmuse X5S
Resolução	5280 x 3956
Tamanho do pixel	3,4 μ m
Shutter	Rolling
Tempo de exposição	12 μ s a 8 s
FPS	60
Massa	461g
Tipo de sensor	CMOS color

Fonte: (DJI, 2019d).

Tabela 17 - Características principais da lente Olympus M.Zuiko Digital.

Característica	Lente
Fabricante	Olympus
Modelo	Olympus M.Zuiko Digital
Comprimento focal	45mm
f/#	1.8 a 2.2
Ângulo de abertura	27°
Massa	116g

Fonte: (DJI, 2019d).