



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Daniel Juchem Regner

**Automatização do voo de drone para inspeção tridimensional  
de dutos em plataformas *offshore***

Florianópolis

2023

Daniel Juchem Regner

**Automatização do voo de drone para inspeção tridimensional  
de dutos em plataformas *offshore***

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Metrologia e Instrumentação.

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

Florianópolis

2023

Regner, Daniel Juchem

Automatização do voo de drone para inspeção tridimensional de dutos em plataformas offshore / Daniel Juchem Regner ; orientador, Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, 2023.  
121 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Fotogrametria. 3. Robótica móvel. 4. VANT. 5. Visão Computacional. I. Pinto, Tiago Loureiro Figaro da Costa. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Daniel Juchem Regner

**Automatização do voo de drone para inspeção tridimensional  
de dutos em plataformas offshore**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 18 de agosto de 2023, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

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

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

Prof. Christian Kohler, Dr.  
Universidade Federal do Alagoas

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Metrologia e Instrumentação pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Insira neste espaço a  
assinatura digital

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Insira neste espaço a  
assinatura digital

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

Florianópolis, 2023.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha família por todo apoio nesta caminhada;

Ao professor Tiago pela oportunidade e orientação para que o trabalho se concretize;

À equipe do projeto VANT3D;

Ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível – PRH-ANP/FINEP, pelo financiamento desta pesquisa;



Crer é um conforto, pensar, um esforço  
(MARCUSE, Ludwig)

## RESUMO

A indústria do petróleo e gás depende da integridade dos dutos utilizados na extração em alto mar para interligar os poços às plataformas. Para garantir a segurança e o bom funcionamento desses dutos, inspeções periódicas são realizadas para registrar variações de diâmetros e detectar possíveis defeitos. No entanto, essas inspeções convencionais são arriscadas, custosas e demoradas devido à necessidade de colaboradores treinados realizarem a inspeção por escalada industrial. Para superar esses desafios, está sendo adotada a utilização de drones para realizar inspeções visuais dos dutos em alto mar. Além das inspeções visuais, há também o interesse em utilizar técnicas de reconstrução tridimensional da cena e medição da nuvem de pontos resultantes para inspeções quantitativas mais detalhadas. Estudos recentes têm apresentado soluções ópticas baseadas em fotogrametria de curta distância, que envolvem a realização de um trajeto pré-determinado para adquirir imagens dos dutos e o uso das informações geoespaciais das fotos para reconstruir a cena em 3D. No entanto, a execução manual desse trajeto de aquisição tem enfrentado grandes dificuldades no ambiente *offshore*. Para solucionar esse problema, esta dissertação de mestrado descreve o desenvolvimento de um sistema que automatiza o voo de inspeção tridimensional em dutos. A automatização inclui um sistema de controle que foi validado e avaliado metrologicamente. Além disso, foram realizadas comparações com inspeções manuais e a utilização de escalas fotogramétricas na cena. Os resultados obtidos demonstraram que o sistema automático de medição proposto possibilita a realização de inspeções precisas e confiáveis sem a necessidade de treinamento especializado intensivo. Isso facilita a inserção de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) na indústria, permitindo que sejam realizadas medições de qualidade e contribuindo para aprimorar a eficiência das inspeções em dutos de extração *offshore*.

**Palavras-chave:** Robótica Móvel; RPAS; Fotogrametria de curta distância; Processamento de Imagem; Sistema de Controle.



## ABSTRACT

The oil and gas industry depends on the integrity of the pipelines used in offshore extraction to connect wells to platforms. To ensure the safety and proper functioning of these pipelines, periodic inspections are carried out to record diameter variations and detect possible defects. However, these conventional inspections are risky, costly and time-consuming due to the need for trained personnel to carry out the industrial climbing inspection. To overcome these challenges, the use of drones is being adopted to carry out visual inspections of pipelines at sea. In addition to visual inspections, there is also interest in using three-dimensional scene reconstruction techniques and measurement of the resulting point cloud for more detailed quantitative inspections. Recent studies have presented optical solutions based on short-range photogrammetry, which involve taking a predetermined path to acquire images of the pipelines and using the geospatial information from the photos to reconstruct the scene in 3D. However, the manual execution of this acquisition path has faced great difficulties in the offshore environment. To solve this problem, this master's thesis describes the development of a system that automates the three-dimensional inspection flight of pipelines. The automation includes a control system that has been metrologically validated and evaluated. In addition, comparisons were made between manual inspections and the use of photogrammetric scales in the scene. The obtained results demonstrated that the proposed automatic measuring system allows the accomplishment of precise and reliable inspections without the need of intensive specialized training. This facilitates the insertion of Research and Development (R&D) projects in the industry, allowing quality measurements to be carried out and contributing to improve the efficiency of inspections in offshore extraction pipelines.

**Keywords:** Mobile Robotics; drone; Close-Range Photogrammetry; Image Processing; Control System.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Inspeção periódica com escaladores industriais na seção emergente dos <i>risers</i> .....	17
Figura 2 - Distribuição do pré-sal (em azul escuro) em relação às bacias sedimentares da margem continental brasileira.....	22
Figura 3 – Tipos de plataformas de extração de petróleo e gás <i>offshore</i> .....	23
Figura 4 – Exemplo de plataformas tipicamente encontradas na costa brasileira.....	24
Figura 5 – Seções dos dutos flexíveis para extração de petróleo <i>offshore</i> ...24	
Figura 6 – Estrutura detalhada dos dutos flexíveis utilizado para extração de petróleo <i>offshore</i> . ....	25
Figura 7 – Zona PDIF/R-4 emersa dos <i>risers</i> .....	27
Figura 8 - Método da trilateração.....	29
Figura 9 - Configuração de um RTK.....	30
Figura 10 – Orientação do RPA [ $X_r, Y_r, Z_r$ ] referente a um eixo de coordenada global [ $X, Y, Z$ ].....	31
Figura 11 - Princípio de medição por fotogrametria.....	32
Figura 12 - Relação da incerteza relacionada entre distância entre centros ópticos e distância ao mensurando. ....	33
Figura 13 – Exemplo de aquisição de imagens para sobreposição desejada, sendo $\Delta v$ e $\Delta h$ a variação vertical e horizontal para manter sobreposição. ....	34
Figura 14 – Parâmetro GSD, sendo a projeção do pixel sob o campo de visão da câmera. ....	35
Figura 15 – Exemplo de variação da resolução espacial e nível de detalhe observado.....	35
Figura 16 – Exemplificação de aquisição de imagem de ambos obturadores. ....	36
Figura 17 - Modelo computacional da câmera <i>pinhole</i> . ....	37
Figura 18 – Exemplo de problemas na identificação de pontos correspondentes em duas imagens de orientações diferentes da mesma cena. ....	39
Figura 19 – Tipos de alvos codificados e não codificados.....	41
Figura 20 – Escalas fotogramétricas utilizando alvos. ....	42

Figura 21 – Relações de um sistema estéreo. ....	43
Figura 22 - Linhas epipolares de um sistema estéreo com ângulo de convergência. ....	44
Figura 23 - Linhas epipolares para o caso de imagens retificadas. ....	44
Figura 24 - Exemplos de imagens de um sistema estéreo e o mapa de disparidade resultante. ....	45
Figura 25 – Profundidade é inversamente proporcional à disparidade. ....	46
Figura 26 – Ilustração da busca de janelas correspondentes para estimação da profundidade. ....	47
Figura 27 – Detecção de objetos em um cenário urbano. ....	49
Figura 28 – Exemplo da classificação em um único estágio por YOLO. ....	51
Figura 29 – Troca de mensagens por tópicos. Permitindo não somente uma troca 1:1, mas também 1:N, N:1 e N:N. ....	54
Figura 30 – Comunicação por serviço. ....	55
Figura 31 – Comunicação por Ação. ....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figura 32 – Proposta de funcionamento do sistema automático de inspeção tridimensional de dutos em plataformas <i>offshore</i> . ....	56
Figura 33 – Comunicação entre hardwares do sistema proposto. ....	57
Figura 34 – Fluxograma do processo de inspeção tridimensional de dutos automático. ....	58
Figura 35 – Trajeto semicircular para inspeção de <i>risers</i> em plataformas <i>offshore</i> . ....	59
Figura 36 – Diagrama de <i>nodos</i> do ROS para realização do trabalho proposto. ....	60
Figura 37 – Fluxo de processamento para detecção e estimação da distância do objeto. ....	63
Figura 38 – Aeronave Matrice 200 V2 RTK com câmera X5S acoplada e embarcado com computador de bordo Jetson Nano. ....	64
Figura 39 – Aeronave DJI Matrice 210 V2 RTK, em destaque o sistema de visão estéreo frontal para detecção e desvio de objetos. ....	65
Figura 40 – Montagem NVIDIA Jetson Nano 4GB sob aeronave M210 V2 destacado em vermelho. ....	67
Figura 41 – Bancada de testes localizada nas dependências do InPETU hub. ....	68

Figura 42 – Seções projetadas do simulacro de <i>riser</i> para bancada de testes. .....	69
Figura 43 – Reconstrução tridimensional para GT do simulacro da seção helicoidal. ....	70
Figura 44 - Reconstrução tridimensional para GT do simulacro da seção defeitos diâmetro. ....	70
Figura 45 – Referências de posição de cada imagem e alinhamento das imagens para inicialização do processamento. ....	72
Figura 46 – Reconstrução de nuvem de pontos densa da cena. ....	72
Figura 47 – Construção do cilindro apropriado para a nuvem de pontos da ROI utilizando $2\sigma$ . ....	74
Figura 48 – Utilização da aeronave M210 V2 para inspeção do simulacro. .	75
Figura 49 – Posições do padrão após realizada calibração do sistema estéreo. .....	77
Figura 50 – Erro de reprojeção para cada conjunto de imagens da calibração. .....	77
Figura 51 – Imagens estéreo retificadas com linhas epipolares colineares. .	79
Figura 52 – Mapa de disparidade computado por <i>StereoBM</i> . ....	81
Figura 53 – Mapa de disparidade filtrado. ....	82
Figura 54 – Comparação distância estimada para utilização de mapa de disparidade original ou filtrado. ....	82
Figura 55 – Curva de aprendizado do treinamento da rede <i>yolov3-tiny</i> para duas classes e um <i>batch</i> de 4000 e inferência em tempo real de voo. ....	<b>Error!</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	
Figura 56 – Detecção em tempo real dos objetos utilizando a rede <i>yolov3-tiny</i> . .....	84
Figura 57 – Gráfico para troca de dados entre <i>nodos</i> de processamento de imagem. ....	85
Figura 58 – Transformação da caixa delimitadora do objeto detectado para o mapa de disparidade. ....	85
Figura 59 – Pontos laranja indicam a posição estimada do trajeto de inspeção e no quadrado vermelho a posição do piloto a 25 metros do centro de inspeção. ....	86
Figura 60 – Trajeto da inspeção realizada manualmente. ....	87

Figura 61 – Posição GNSS registrada do RPAS enquanto realizava a inspeção requisitada.....	87
Figura 62 – Vistas superior e frontal do trajeto resultante utilizando voo automático.....	88
Figura 63 – Movimentação cartesiana e ângulos de Euler da aeronave ao realizar o trajeto.....	89
Figura 65 – Comparação da posição do trajeto gerado, registrado na imagem e alinhado no metashape com dados de GNSS.....	90
Figura 64 – Comparação de status da bateria ao realizar o voo automático e manual. ....	91
Figura 66 – Distribuição das medições de diâmetro realizadas no total de experimentos.....	93
Figura 67 – Comportamento das reconstruções ao longo dos ensaios realizados.....	93
Figura 68 – Ensaio com interferômetro para medir a distância entre os alvos fotogramétricos na escala 1. ....	94
Figura 69 – Posição das duas escalas fotogramétricas para avaliação da reconstrução tridimensional.....	95
Figura 70 – Tendência e desvio padrão de reconstrução na medição de diâmetro para ensaios sem escala, 1 escala e 2 escalas fotogramétricas. ....	96
Figura 71 – Ressaltos avaliados para compreensão do erro de reconstrução em defeitos de profundidade. ....	97
Figura 72 - Erro de reconstrução na medição de resalto para ensaios sem escala, 1 escala e 2 escalas fotogramétricas. ....	98
Figura 73 – Erro de reconstrução na medição de diâmetro para ensaios sem escala, 1 escala e 2 escalas fotogramétricas. ....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos métodos de comunicação do ROS.....	53
Tabela 2 - Parâmetros de entrada para algoritmo de geração de trajetória.	61
Tabela 3 – Especificações técnicas câmara disponíveis Projeto VANT3D...	65
Tabela 4 – Parâmetros para a inspeção fotogramétrica para diferentes distâncias. ....	66
Tabela 5 – Especificações técnicas do computador Jetson Nano 4 GB.....	67
Tabela 6 – Parâmetros de intrínsecos do sistema estéreo frontal.....	76
Tabela 7 – Parâmetros de calibração sistema estéreo frontal M210 V2. Câmera direita em relação a câmara esquerda. ....	78
Tabela 8 – Parâmetros de sintonia do algoritmo <i>StereoBM</i> . ....	80
Tabela 9 – Parâmetros utilizados para avaliação metrológica do sistema ...	92
Tabela 10 – Tabela de medições da distância entre alvos fotogramétricos.	94
Tabela 11 – Informações da média e desvio padrão do erro de reconstrução para medições de diâmetro. ....	97
Tabela 12 – Informações da média e desvio padrão do erro de reconstrução. ....	98
Tabela 13 – Informações da média e desvio padrão do erro de reconstrução nos ensaios manuais para medições de diâmetro. ....	99
Tabela 14 – Informações da média e desvio padrão do erro de reconstrução nos ensaios manuais para medições de diâmetro. ....	100
Tabela 15 – Análise de correlação dos parâmetros em relação à média do erro na medição do diâmetro. ....	101
Tabela 16 – Informações da tendência e desvio padrão do erro de reconstrução.....	103

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AP	Average Precision
BM	Block Matching
GSD	Ground Sample Distance
GT	Ground Truth
RTK	Real Time Kinematic
GNSS	Global Navigation Satellite System
IMU	Inertial Measurement Unit
SCC	Sistema de Coordenada Câmera
SCG	Sistema de Coordenada Global
mAP	mean Average Precision
RPA	Remotely Piloted Aircraft
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System
ROI	Region of Interest
ROS	Robotic Operating System
SDK	Software Development Kit
SVM	Support Vector Machine
WLS	Weighted Least Squares
ZVM	Zona de Variação de Maré

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1	MOTIVAÇÃO.....	18
1.2	OBJETIVOS GERAIS .....	20
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>20</b>
1.3	ESTRUTURA DO DOCUMENTO .....	21
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>22</b>
2.1	EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS <i>OFFSHORE</i> .....	22
2.2	RISERS.....	24
<b>2.2.1</b>	<b>Aplicações e classificação</b> .....	<b>25</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Inspeção região PDIF/R-4 de risers</b> .....	<b>26</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Defeitos típicos região PDIF/R-4</b> .....	<b>27</b>
2.3	AERONAVES PILOTADAS REMOTAMENTE - RPA .....	28
<b>2.3.1</b>	<b>Global Navigation Satellite System</b> .....	<b>29</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Real Time Kinematic</b> .....	<b>30</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Sistema de navegação inercial</b> .....	<b>30</b>
2.4	FOTOGRAMETRIA.....	32
<b>2.4.1</b>	<b>Aquisições das Imagens</b> .....	<b>32</b>
2.5	MODELO DA CÂMERA PINHOLE.....	37
<b>2.5.1</b>	<b>Calibração de câmera</b> .....	<b>38</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Identificação de pontos correspondentes</b> .....	<b>39</b>
2.6	VISÃO ESTÉREO .....	42
<b>2.6.1</b>	<b>Geometria Epipolar e Retificação de Imagens</b> .....	<b>43</b>
<b>2.6.2</b>	<b>Mapa de Disparidade</b> .....	<b>45</b>
2.7	DETECÇÃO DE OBJETOS .....	48
<b>2.7.1</b>	<b>Faster R-CNN</b> .....	<b>50</b>
<b>2.7.2</b>	<b>Mask R-CNN</b> .....	<b>50</b>
<b>2.7.3</b>	<b>SSD - Single Shot MultiBox Detector</b> .....	<b>50</b>
<b>2.7.4</b>	<b>YOLO - You Only Look Once</b> .....	<b>50</b>
2.8	ROBOT OPERATING SYSTEM.....	52
<b>2.8.1</b>	<b>Comunicação</b> .....	<b>52</b>
<b>3</b>	<b>MODELO PROPOSTO</b> .....	<b>56</b>



3.1	AUTOMATIZAÇÃO DE VOO DE INSPEÇÃO .....	56
3.2	TRAJETO DE INSPEÇÃO .....	58
3.3	CONTROLE DE VOO AUTOMÁTICO .....	59
<b>3.3.1</b>	<b>Comunicação ROS.....</b>	<b>60</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Geração de trajetória .....</b>	<b>61</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Processamento de Imagem.....</b>	<b>63</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAS E MÉTODOS .....</b>	<b>64</b>
4.1	AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA – RPA .....	64
<b>4.1.1</b>	<b>Sistema estéreo frontal .....</b>	<b>64</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Câmera gimbal DJI X5S .....</b>	<b>65</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Kit da DJI de Desenvolvimento de Software.....</b>	<b>66</b>
4.2	COMPUTADOR DE BORDO .....	66
4.3	BANCADA DE TESTES.....	68
<b>4.3.1</b>	<b>Calibração simulacro.....</b>	<b>69</b>
4.4	RECONSTRUÇÃO E ANÁLISE FOTOGRAMÉTRICA .....	70
<b>4.4.1</b>	<b>Agisoft Metashape .....</b>	<b>71</b>
<b>4.4.2</b>	<b>GOM Inspect.....</b>	<b>73</b>
<b>4.4.3</b>	<b>Análise da Região de Interesse .....</b>	<b>73</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>75</b>
5.1	CALIBRAÇÃO SISTEMA ESTÉREO .....	76
<b>5.1.1</b>	<b>Retificação de imagens .....</b>	<b>78</b>
5.2	MAPA DE DISPARIDADE.....	79
<b>5.2.1</b>	<b>Avaliação do mapa de disparidade .....</b>	<b>82</b>
5.3	DETECÇÃO DE OBJETOS .....	83
<b>5.3.1</b>	<b>Treinamento CNN.....</b>	<b>83</b>
5.4	TRAJETO DE INSPEÇÃO .....	86
<b>5.4.1</b>	<b>Avaliação do trajeto de inspeção .....</b>	<b>86</b>
5.5	AVALIAÇÃO DA RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL .....	91
<b>5.5.1</b>	<b>Reconstrução tridimensional.....</b>	<b>92</b>
<b>5.5.2</b>	<b>Utilização de escalas na cena .....</b>	<b>94</b>
5.6	ANÁLISE PARÂMETROS DO PROCESSO .....	99
5.7	DISCUSSÃO .....	102
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>104</b>
6.1	TRABALHOS FUTUROS .....	105



## 1 INTRODUÇÃO

Aeronaves Remotamente Pilotados (RPA), ou comumente denominado drones, vem sendo largamente utilizados nas mais diferentes áreas e aplicações, tais como: inspeções industriais, tais como em linhas de transmissão de energia, área de petróleo e gás, parques eólicos e fotovoltaicos, construções civis (NOORALISHAHI et al., 2021). Este crescimento da utilização destes veículos deve-se a redução dos custos e riscos operacionais nas diferentes rotinas realizadas para estas inspeções (KABBABE POLEO; CROWTHER; BARNES, 2021).

À medida que as tecnologias avançam e os riscos aos profissionais humanos diminuem, temos observado um progresso significativo na utilização de Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAS) para realizar inspeções visuais em estruturas industriais que requerem verificações periódicas de alta complexidade. (KHALOO et al., 2018). Conseqüentemente, a utilização de RPAS tem possibilitado a redução dos custos operacionais e a realização de inspeções de alto risco sem expor os colaboradores humanos a essas situações desafiadoras (SHAHMORADI et al., 2020). O crescente interesse por técnicas de medição óptica, especialmente em aplicações industriais, é justificado por diversos fatores, dentre eles a rapidez, segurança, robustez, versatilidade, automação e custo, como evidenciado pelo estudo de (NIKOLIC et al., 2013a), que utilizou RPAS para inspecionar caldeiras, assim como pelo trabalho de (MENNA et al., 2020), que explorou a aplicação em inspeções de antenas parabólicas.

Estas inspeções visuais remotas permitem os operadores verificar possíveis problemas (FENG et al., 2021; NOORALISHAHI et al., 2021). Determinadas estruturas podem ser inspecionadas de forma autônoma com a utilização de softwares comerciais de geração e realização da missão de inspeção (LANGÅKER et al., 2021). Inspeções para avaliações quantitativas de defeitos realizadas por RPAS, comumente utilizam técnicas de fotogrametria para reconstruções tridimensionais para diversas frentes, como: (JIMÉNEZ-JIMÉNEZ et al., 2021) apresenta para análise topográfica de áreas, ou (ZHANG et al., 2017) utiliza para verificação de defeitos em linhas de transmissão elétrica.

A demanda pelo aumento da qualidade nos processos de inspeção industrial força um contínuo aprimoramento tecnológico dos sistemas de medição aplicados a reconstrução tridimensional, especificamente os sistemas ópticos de medição. Em

termos de processos de inspeção industrial, destaca-se a indústria de Petróleo e Gás - P&G, seja em ambiente *onshore* ou *offshore*, onde há uma contínua demanda. Por exemplo, as seções emersas dos dutos até a conexão com a plataforma, onde é utilizado técnicas específicas e de alto risco para as inspeções periódicas. Nesta seção dos dutos as inspeções são realizadas por escaladores industriais, conforme Figura 1. Através de rapel, acessam os dutos para efetuar inspeção, medindo a variação do diâmetro do duto ao longo de toda seção, sinalizando e registrando fotos dos possíveis defeitos., tipicamente na ordem de dezenas de milímetros ou mais (MAURO DE MORAIS, 2013a).

Figura 1 - Inspeção periódica com escaladores industriais na seção emergente dos *risers*.



Fonte: (REGNER et al., 2018).

A aplicação da tecnologia de inspeção utilizando RPAS em plataformas *offshore* tem como objetivo realizar análises visuais dos defeitos encontrados nos dutos afim de otimizar o cronograma de inspeções. Pesquisas estão sendo realizadas propondo o uso de RPAS para realizar não só inspeções visuais, mas geométricas através de reconstruções tridimensionais deste trecho dos dutos. Estas inspeções quantitativas possibilitam a identificação de possíveis defeitos além de filtrar aqueles que requerem uma inspeção mais detalhada por colaboradores especializados. Essa abordagem permite uma análise mais eficiente e precisa, direcionando os esforços de inspeção para as áreas de maior necessidade.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

O Laboratório de Metrologia e Automação - LABMETRO, em parceria com a PETROBRAS, desenvolveu um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) chamado "Inspeção Óptica Tridimensional por Veículo Aéreo não Tripulado (VANT) - VANT3D". O objetivo desse projeto foi estudar a viabilidade da reconstrução tridimensional e inspeção dos *risers* (dutos de extração de petróleo offshore) utilizando dados coletados por RPAS instrumentados, além de realizar análises metrológicas dos resultados.

O projeto teve início em 2018 e envolveu o desenvolvimento e avaliação de diversas soluções para a inspeção tridimensional de risers. Foram considerados parâmetros de fotogrametria de curta distância (MARCELLINO, 2019), visão estéreo (MACHADO, 2021) e triangulação a laser (VERAS, 2022), todos integrados e adaptados para serem utilizados em RPAS industriais. O objetivo principal era minimizar a exposição humana aos riscos inerentes a esse tipo de inspeção.

Essa iniciativa representa um avanço significativo no campo da inspeção de risers, combinando tecnologias de reconstrução tridimensional e RPAS para obter resultados precisos e confiáveis, ao mesmo tempo em que reduz a necessidade de exposição direta de trabalhadores a ambientes de alto risco.

Atualmente, algumas das soluções desenvolvidas no projeto estão passando por testes e avaliações em plataformas *offshore*. A utilização de colaboradores terceirizados para realizar as inspeções com RPAS está possibilitando a elaboração de novas diretrizes para a inclusão dessas soluções na rotina de inspeção. Em (BUSCHINELLI et al., 2020b), é mencionada a necessidade de seguir uma trajetória pré-determinada para adquirir imagens do riser, visando obter uma boa reconstrução tridimensional utilizando técnicas de fotogrametria em curta distância. Essa trajetória foi validada em ambientes de simulação robótica e experimentos práticos, mas esses testes práticos foram realizados manualmente, tanto em laboratório quanto por empresas especializadas e com conhecimento aprofundado em inspeções com RPAS em ambientes *offshore*.

Apesar do potencial promissor das técnicas desenvolvidas, as restrições encontradas durante as inspeções em ambientes offshore dificultam a realização precisa da trajetória, limitando a qualidade dos resultados obtidos. Portanto, a automatização do voo para realizar essas inspeções pode facilitar a implementação

das técnicas desenvolvidas na pesquisa para uso empresarial, além de contribuir para a obtenção de resultados de medição mais confiáveis, rápidos e com menor custo.

Existem alguns softwares comerciais que oferecem a funcionalidade de geração de trajetórias pré-programadas para inspeções fotogramétricas verticais, comumente chamadas de inspeções de fachadas. Um dos softwares avaliados no âmbito do projeto VANT3D foi o Universal Ground Control Station - UgCS (ENGINEERING, 2022), que possui essa funcionalidade. No entanto, para alcançar o nível de precisão desejado no processo de aquisição de imagens dos risers, esses softwares apresentam restrições de distâncias mínimas entre paradas, levando em consideração os erros provenientes dos sensores de posição das aeronaves. Além das limitações de distância entre pontos na trajetória, o software também possui restrições de altura de voo baseadas na estimativa do solo, sendo que a altura mínima em relação ao nível do solo não pode ser inferior a 2 metros. Outra limitação desse tipo de software é que as trajetórias são programadas com base em um mapa pré-configurado, no qual é conhecida a posição dos elementos no solo, mas não a posição real das plataformas de petróleo.

Diante das limitações dos softwares disponíveis de fácil acesso para realizar inspeções com variações verticais, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema capaz de realizar o voo autônomo, identificando em tempo real a posição da aeronave e as informações necessárias para executar o trajeto planejado.

O sistema proposto busca superar as restrições encontradas nos softwares comerciais, permitindo que o RPAS execute a inspeção de forma autônoma e eficiente. Por meio de tecnologias como sensores de posicionamento e processamento de dados em tempo real, a aeronave será capaz de determinar sua posição e utilizar as informações para seguir a trajetória planejada.

Essa abordagem oferecerá maior flexibilidade e precisão no processo de inspeção, permitindo que a aeronave se adapte às variações verticais dos risers de forma autônoma. Com a capacidade de identificar em tempo real a posição e as informações necessárias, o sistema será capaz de realizar o voo de forma precisa e confiável, garantindo a qualidade dos resultados da inspeção.

Esse desenvolvimento representa um avanço significativo na automatização das inspeções de risers e contribuirá para a obtenção de dados mais precisos, além de aumentar a segurança e reduzir custos operacionais ao minimizar a exposição humana em ambientes de alto risco.

## 1.2 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de controle autônomo para RPAS, que permita a inspeção tridimensional de dutos em plataformas *offshore*. Esse sistema deve ser capaz de identificar a posição do duto e estimar a distância entre o duto e a aeronave, a fim de criar e executar autonomamente o trajeto de inspeção proposto.

O trabalho tem como propósito comparar os resultados das inspeções tridimensionais de dutos realizadas manualmente e automaticamente, com o intuito de avaliar o desempenho e a eficácia do sistema autônomo proposto. Serão analisadas as condições de funcionamento desse sistema automático, verificando sua capacidade de realizar as inspeções de forma precisa e confiável.

Ao realizar essa comparação entre os resultados obtidos com a inspeção manual e a inspeção automática, será possível avaliar a viabilidade e as vantagens do sistema autônomo no que diz respeito à eficiência, precisão e confiabilidade dos dados coletados durante a inspeção tridimensional dos dutos.

Esse estudo contribuirá para o avanço da automação das inspeções de dutos em plataformas offshore, fornecendo informações importantes sobre o desempenho do sistema de controle autônomo desenvolvido. Além disso, permitirá identificar eventuais melhorias e ajustes necessários para aprimorar o sistema, tornando-o cada vez mais confiável e eficiente nas inspeções tridimensionais de dutos.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

Para alcançar esse objetivo, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma revisão bibliográfica das técnicas e procedimentos para o controle automático de voo utilizando RPAS, incluindo o estudo de mapas de disparidade de sistemas de visão estéreo, processamento de imagens para detecção de objetos em tempo real e Redes Neurais Convolucionais.
- Implementar técnicas de detecção de objetos em tempo real utilizando Redes Neurais Convolucionais, permitindo ao sistema autônomo identificar e rastrear dutos durante o voo.
- Avaliar os mapas de disparidade gerados pelo sistema de visão estéreo selecionado, a fim de estimar a distância entre o duto e RPAS.

- Desenvolver e avaliar teoricamente o sistema de controle de voo.
- Integrar o sistema de controle de voo, detecção de objetos em tempo real e mapa de disparidade ao RPAS, criando um sistema completo e funcional para a inspeção tridimensional de dutos em plataformas offshore.
- Realizar uma avaliação metrológica comparativa entre as aquisições manuais e automáticas, analisando a qualidade, precisão e confiabilidade dos resultados obtidos.

### 1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

No capítulo 1 está apresentado a contextualização, motivação e objetivos deste trabalho.

O capítulo 2 conterà a revisão bibliográfica necessária para embasar as etapas do trabalho. Serão abordados tópicos como a exploração de petróleo e gás em ambientes offshore, a definição de *risers*, o funcionamento das Aeronaves Pilotadas Remotamente (RPAS) e sua aplicação em inspeções tridimensionais. Também serão discutidos conceitos da fotogrametria, modelagem e câmera *pinhole*, calibração de câmeras, identificação de pontos correspondentes, sistema estéreo e mapas de disparidade. Além do processamento de imagem para detecção e objetos com a utilização de Redes Neurais Convolucionais (CNN). Por fim, será apresentado o funcionamento do Sistema Operacional Robótico (ROS), que será utilizado no desenvolvimento do sistema proposto.

O capítulo 3 descreve o modelo proposto a ser desenvolvido, Capítulo 4 é apresentado os materiais utilizados para desenvolvimento do projeto, e capítulo 5, a metodologia utilizada para desenvolver a aplicação e características.

Os resultados e análise serão apresentados no capítulo 6, finalizando o trabalho com as conclusões e considerações finais no capítulo 7.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica dos princípios e técnicas relacionadas ao trabalho, como: exploração de petróleo e gás *offshore*, inspeções, veículos aéreos não tripulados, fotogrametria, modelagem de câmera *pinhole*, sistema de visão estéreo, geometria epipolar, mapas de disparidade, processamento de imagens para detecção de objetos através de redes neurais convolucionais e método de comunicação robótica.

### 2.1 EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS *OFFSHORE*

O Brasil iniciou a extração de petróleo *offshore* em 1974 na Bacia de Campos – RJ, onde atualmente conta com cerca de 25 plataformas e 280 poços produtores em operação, correspondendo a 30% da produção nacional (COSTA, 2019; PETROBRAS, 2020a). O crescimento da exploração de petróleo *offshore* se deu pela descoberta do Pré-Sal, onde em 2022 foram extraídos 2 milhões de barris por dia em 101 poços produtores (PETROBRAS, 2022). A região do pré-sal se estende pela costa do estado do Rio de Janeiro, localizada entre as bacias de Santos e Campos, ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Distribuição do pré-sal (em azul escuro) em relação às bacias sedimentares da margem continental brasileira.



Fonte: (RICCOMINI; SANT'ANNA; TASSINARI, 2012)

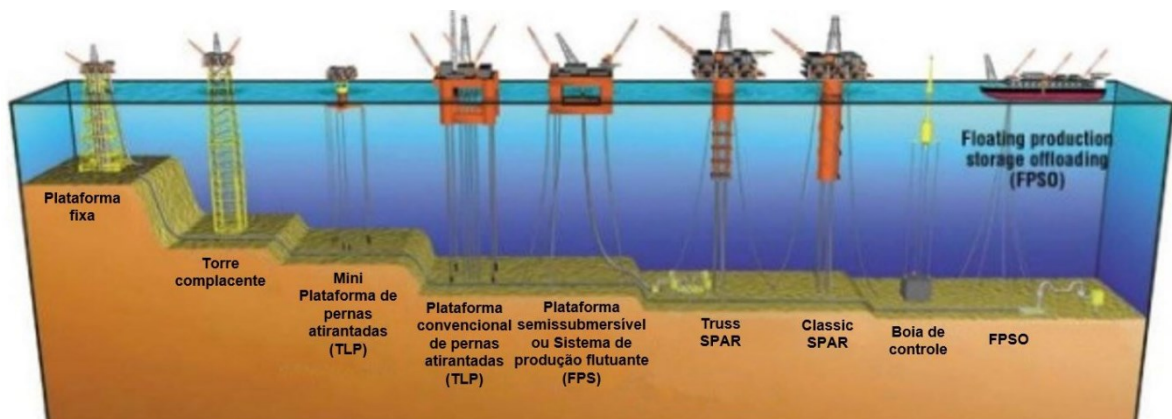
Estruturas *offshore* são usadas em todo o mundo em uma grande variedade de profundidades e ambientes. Por definição uma estrutura *offshore* não tem conexão à costa, e consegue permanecer posicionada em qualquer condição meteorológica,

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 têm 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 (MAURO DE MORAIS, 2013b).

Para extração de petróleo *offshore* existem diferentes tipos de plataformas para perfuração e extração, Figura 3, sendo: plataformas de estruturas fixas convencionais utilizadas até 400 metros concebidas para produção por longos períodos; plataformas de estruturas flutuantes de pernas atirantes ou flutuantes utilizadas para profundidades superiores a 2000 metros. Estes tipos de plataformas sofrem movimentação devido a variação de maré e intensidade de vento, possibilitando danos às estruturas que conectam os poços, sendo necessário que estas estruturas fiquem restritas a uma tolerância de movimentação, conforme exemplificado na Figura 3 (DEVOLD, 2013).

Figura 3 – Tipos de plataformas de extração de petróleo e gás *offshore*.



Fonte: Adaptado de (ASSOCIATION, 2020)

Dentre os diversos tipos de plataformas, as mais utilizadas no Brasil são plataformas fixas montadas em águas rasas e as semissubmersíveis e flutuantes em águas profundas, utilizadas para extração na zona do pré-sal. Estas plataformas denominadas Unidades Flutuantes de Armazenamento e Transferência, *Floating production storage and offloading* (FPSO), os quais realizam o armazenamento até

serem escoados para navios petroleiros que realizam o transporte para dutos e costa (PETROBRAS, 2022).

Figura 4 – Exemplo de plataformas tipicamente encontradas na costa brasileira.



(a) Plataforma fixa.



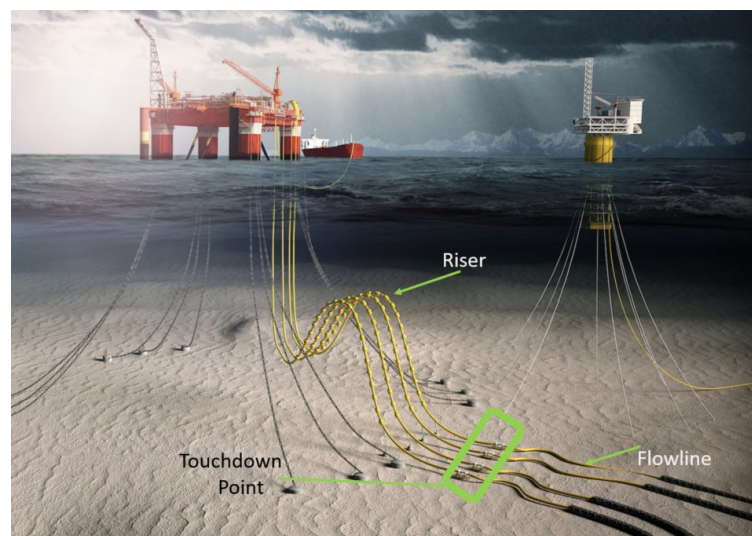
(b) FPSO.

Fonte: (PETROBRAS, 2020b)

## 2.2 RISERS

A extração de petróleo em alto mar é realizada através de poços no leito do oceano nos quais são interligados às plataformas através de dutos, rígidos ou flexíveis, transportando material extraído dos poços e cabos de comunicação. Estes dutos são subdivididos em seções, representadas na Figura 5, sendo a seção flutuante conectada a plataforma e ponto de contato do solo, *Touchdown Point*, denominada *riser*. Após o ponto de contato do solo os dutos passam a ser chamados de *flowline* realizando a conexão com os poços de extração.

Figura 5 – Seções dos dutos flexíveis para extração de petróleo *offshore*.



Fonte: (4SUBSEA, 2018).

Os dutos flexíveis devem ser capazes de resistir a variação de temperatura, reações químicas resultantes do transporte do fluido interno e as corrosões do ambiente marítimo utilizado. Os dutos são compostos de uma série de camadas metálicas e não metálicas para tais especificações. A estrutura de um duto flexível está descrita na Figura 6, onde: as camadas metálicas são responsáveis por suportar as pressões internas de trabalho e carregamentos mecânicos; as camadas não metálicas dos dutos, usualmente de polietileno, servem com estanques entre a o fluido interno e a água do mar, além de servir como uma proteção para corrosão e abrasão (INSTITUTE, 1998).

Figura 6 – Estrutura detalhada dos dutos flexíveis utilizado para extração de petróleo *offshore*.



Fonte: (MACHADO, 2021).

### 2.2.1 Aplicações e classificação

Os dutos flexíveis são utilizados em diversas etapas e aplicações na área de extração de petróleo em alto mar, dentre elas contempla-se a extração e transporte de óleo e gás, além do transporte de água, cabos de transmissão e outros. Conforme recomendações práticas da norma (INSTITUTE, 1998) os dutos são classificados baseado no seu aspecto estrutural, configuração e aplicação, podendo ser caracterizados em quatro categorias:

1. Produção: dutos utilizados para produção, transportando fluidos produzidos nos poços para reservatórios.

2. Exportação: realizam o transporte do fluido extraído para unidades terrestres, geralmente possuem diâmetros maiores que os dutos de produção.
3. Complementação: dutos auxiliares para transporte de acessórios, ferramentas, ou cabos de equipamento e energia.
4. Perfuração: responsáveis pelo transporte da zona de perfuração para o poço, apoiando linhas auxiliares e servindo de guias para colunas de perfuração.

É imprescindível realizar inspeções periódicas preventivas em cada seção destes dutos, a fim de avaliar suas condições e realizar a manutenção necessária. Essas inspeções são essenciais devido aos danos potenciais causados durante a instalação e uso dos dutos.

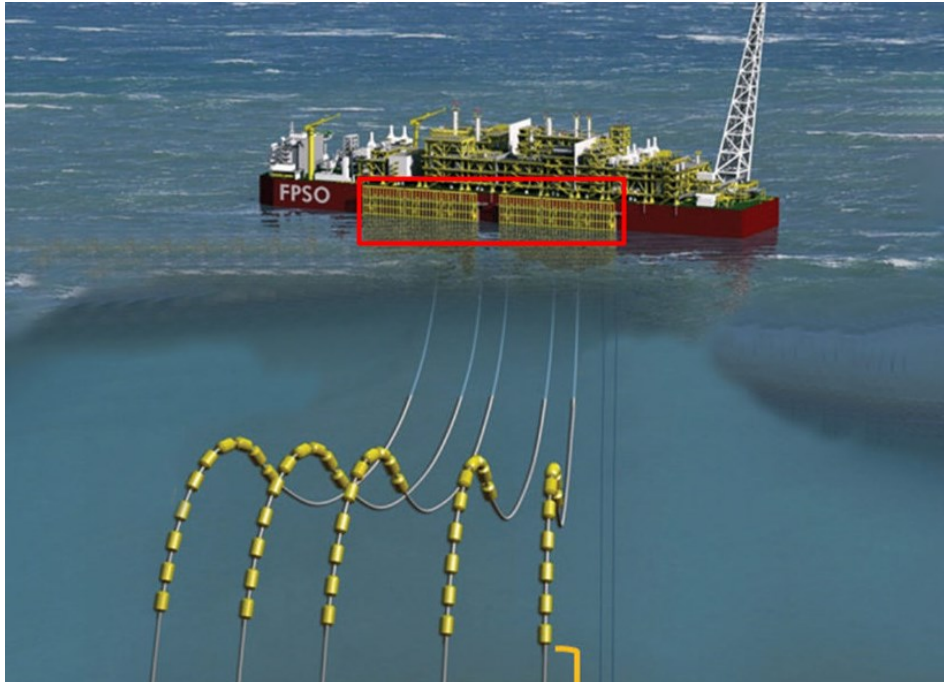
Durante o período de operação, os dutos estão sujeitos a diversos fatores que podem comprometer sua integridade, tais como corrosão, desgaste, vazamentos, trincas e deformações. Ao realizar inspeções periódicas, é possível identificar precocemente esses problemas e tomar medidas corretivas para evitar falhas catastróficas ou paralisações inesperadas nas operações.

Portanto, é fundamental estabelecer um programa de inspeções periódicas bem planejado e executado, levando em consideração as características específicas de cada região dos dutos. Dessa forma, é possível garantir o bom funcionamento e a confiabilidade dessas estruturas cruciais para a indústria.

### **2.2.2 Inspeção região PDIF/R-4 de risers.**

As inspeções periódicas realizadas nos dutos flexíveis pela Petrobrás são especificadas nos planos de inspeção de dutos flexíveis (PDIF) onde é realizada uma segmentação das seções dos *risers* para diferentes técnicas de inspeção. A região de interesse deste trabalho é a região 4, representada na Figura 7. Esta região refere-se a zona emersa dos *risers*, compreendida entre a zona de variação de maré (ZVM) até a conexão com a plataforma.



Figura 7 – Zona PDIF/R-4 emersa dos *risers*

Fonte: adaptado de (JPT, 2020).

O plano de inspeção de dutos flexíveis recomenda realizar a inspeção periódica desta região através de técnicas de escalada industrial, onde o técnico irá acessar os *risers* realizando um rapel da bancada de conexão dos dutos à plataforma para registrar medições de diâmetros, deformações e aquisição de imagens, sinalizando possíveis defeitos aparentes.

### 2.2.3 Defeitos típicos região PDIF/R-4

A inspeção na região PDIF/R-4 de risers tem como objetivo detectar e avaliar defeitos que são frequentemente encontrados nessa área. Esses defeitos costumam ter dimensões da ordem de dezenas de milímetros e são causados por trações mecânicas excessivas, resultando em rompimentos nas camadas metálicas das armaduras ou danos na camada externa.

Os risers desempenham um papel crítico na condução de fluidos em ambientes offshore, sujeitos a condições extremas, como pressão, movimentos das ondas e corrosão. A região PDIF/R-4, em particular, pode estar sujeita a forças e tensões intensas devido à configuração e interações com outras estruturas. Dentre os defeitos típicos podemos caracterizá-los da seguinte forma:

1. Danos na capa externa (passantes ou não), como abrasões e rasgos, desde a ZVM até a traseira do conector de topo do riser;

2. Deformação radial da capa externa (capa inflada);
3. Torção do corpo tubular;
4. Ovalização do corpo tubular;
5. Protuberância no corpo tubular;
6. Enrugamento ou ondulação do corpo tubular;
7. Escorregamento (deslocamento axial) da capa externa;
8. Presença de furo de alívio;
9. Interferências do duto inspecionado com outras estruturas;
10. Entrelaçamento de duto;
11. Presença de corpos estranhos;
12. Ângulo de catenária estimado em desacordo com os limites de projeto;
13. Vazamento de hidrocarbonetos, inclusive sob acessórios (enrijecedor de curvatura, vértebra, proteção antiabrasivo);
14. Rompimentos da armadura de tração (no caso de danos passantes);

### 2.3 AERONAVES PILOTADAS REMOTAMENTE - RPA

Aeronaves denominadas RPAs são qualquer tipo que pode ser controlada, no mínimo, nos três eixos de forma remota e sem pilotos embarcados (DECEA, 2019). Existem dois grandes grupos para esta tecnologia, de asa fixas ou rotativas. O tipo de asas rotativas, semelhante ao helicóptero, é um conceito emergente de aeronaves. Consiste em um veículo de quatro, seis, ou oito rotores com metade girando em sentido inverso à outra metade. Devido a algumas habilidades únicas, como alta manobrabilidade, tamanho pequeno e fácil controle, eles têm sido amplamente utilizados para inspeções industriais, vigilância militar e segurança interna

RPAs são veículos ágeis controlados pela velocidade de rotação dos motores. A posição dos arranjos do rotor em relação ao sistema de coordenadas do corpo possui configurações diferentes, porém o controle de voo se assemelha através de sistema de navegação a bordo, permitindo realizar voos autônomos a partir da fusão de medições de sensores de posição como GNSS e Unidades de Medição Inercial - IMU (BECERRA, 2019; NIKOLIC et al., 2013b).

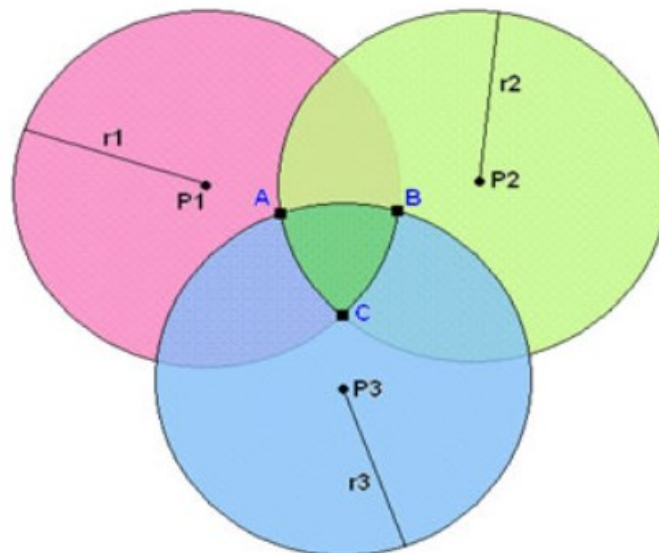
Com o crescente avanço das técnicas de navegação autônoma através da fusão de sensores de posição georreferenciadas e IMUs com sensores ópticos para mapeamento dinâmico do ambiente possibilita a utilização em inspeções industriais,

vigilância e mapeamento onde a ação humana é um risco (COCCHIONI; MANCINI; LONGHI, 2014; KHALOO et al., 2018; ZHAN et al., 2022).

### 2.3.1 Global Navigation Satellite System

O *Global Navigation Satellite System* (GNSS) é um sistema de posicionamento que permite determinar coordenadas geográficas precisas em qualquer lugar do mundo. Ele utiliza o método de trilateração, que envolve a medição da distância entre um receptor GNSS e vários satélites em órbita. Conforme ilustrado na Figura 8, a partir do conjunto de pontos ( $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ) provenientes de diferentes satélites e seus raios ( $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ ), representando o erro de posição, geram a região candidata delimitada pelos pontos A,B,C (PAOLI, 2016). Estes três pontos, respectivamente, são constituídos por conjuntos de satélites, base de controle terrestre e periféricos de usuários. Dentre os principais métodos de GNSS destaca-se: sistema norte americano *Global Position System* (GPS); sistema europeu GALILEO; sistema russo *Global Navigation Satellite System* (GLONASS) e o sistema chinês BeiDou (FENG; WANG, 2008; GREWAL; WEILL; ANDREWS, 2007).

Figura 8 - Método da trilateração.



Fonte: (PAOLI, 2016).

O ponto de coordenada disponibilizado pelo sistema referencia-se ao sistema *World Geodetic System 1984 – WGS-84*. Este sistema de coordenada utiliza o centro de massa da terra como origem do sistema de referência (GREWAL; WEILL; ANDREWS, 2006). Os dados de posição disponibilizados pelo GNSS são dependentes das condições de operação, como condições atmosféricas, localização

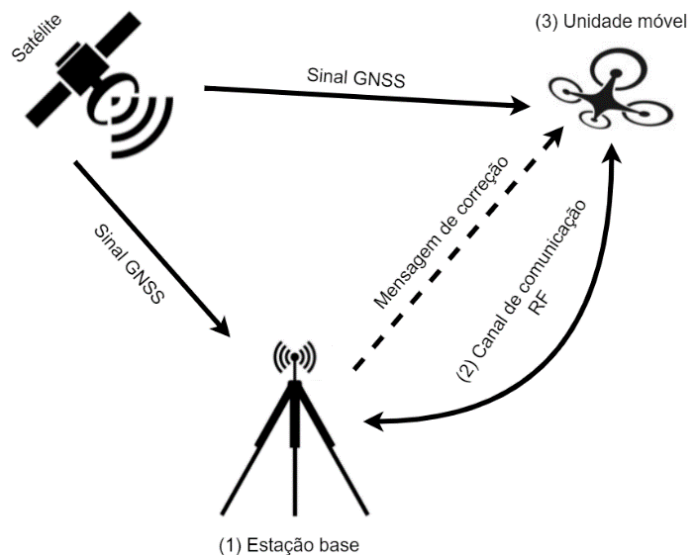


dos receptores, interferências e reflexões dos sinais recebidos (GROVES, 2008; LIMA, 2005). Devido às fortes dependências para estimação da posição pelo sistema, a utilização do GNSS para navegação possui incertezas de posição na ordem de metros, sendo necessário adotar técnicas diferentes para redução destes erros relacionados à posição.

### 2.3.2 Real Time Kinematic

Para uma redução das incertezas de posição associados ao GNSS pode ser utilizado uma base fixa transmitindo através de um *link* de rádio em tempo real as correções de posicionamento para a unidade móvel. Este método denominado *Real Time Kinematic* – RTK, ao longo do tempo a derivação é corrigida pela não movimentação da base e transmitida à unidade móvel. A utilização do RTK permite reduzir as incertezas de posição para valores na ordem de dezenas de milímetros (WANNINGER; HESSELBARTH; FREVERT, 2022). Figura 9 demonstra um exemplo de funcionamento do sistema RTK onde: através de uma estação base (1) comunica com a unidade móvel (3) em tempo real através de um canal de comunicação por rádio frequência (2).

Figura 9 - Configuração de um RTK.



Fonte: Adaptado de (INERTIALSENSE, 2020).

### 2.3.3 Sistema de navegação inercial

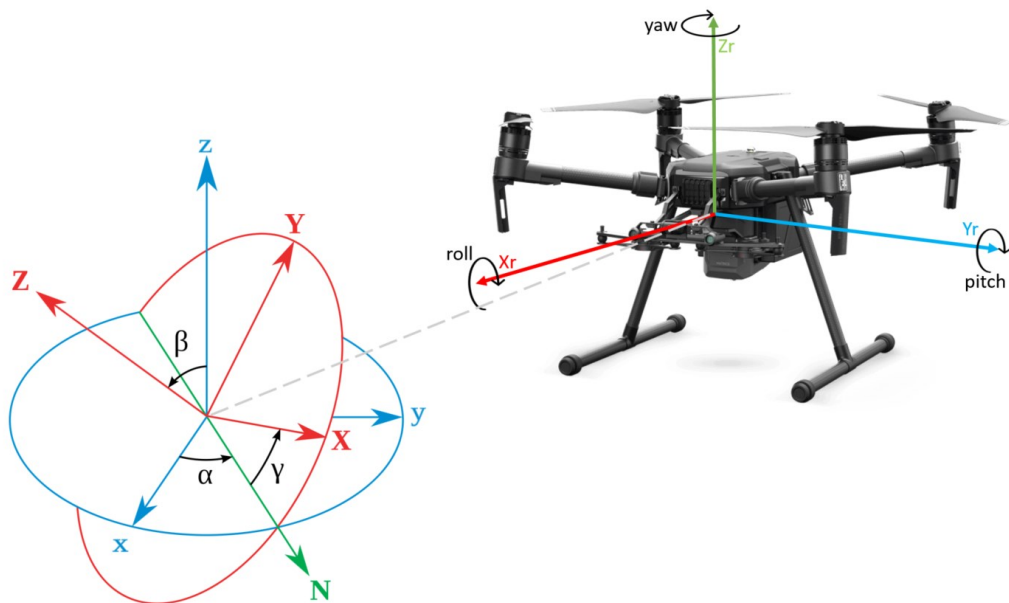
Sistema de navegação inercial, *Inertial Navigation System* – INS, é um conjunto de sensor de movimento (acelerômetro), sensor de rotação (giroscópio) realizando uma estimação da posição, orientação e velocidade de um corpo sem a

necessidade de uma referência externa. Além do conjunto de acelerômetro e giroscópio INS também são complementados com sensores de magnetômetros, barômetros e altímetros para uma melhor estimação da posição através de um método chamado *dead reckoning*, onde a posição e orientação no estado atual é determinado a partir dos dados anteriores.

Todo sistema de navegação inercial sofre com desvio de integração causado pelos erros de medição dos sensores de aceleração e velocidade angular ao integrá-los para estimar a velocidade linear e erros ainda maiores na estimação da posição. Uma solução para contornar esse acúmulo de erros é atualizar periodicamente sua posição realizando uma fusão de dados com sensores GNSS.

A fusão dos sensores de GNSS e INS são largamente utilizados na robótica móvel, os RPAs comerciais já vem equipados com ambos os sensores de modo a ser estimado a trajetória deles com 6 graus de liberdade, 3 de rotação e 3 de translação. A orientação da aeronave é representada pelos ângulos de Euler ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ), os quais representam a rotação em torno dos três eixos de coordenadas (X, Y, Z). Ângulos de Euler descritos na movimentação de aeronave são denominados por *roll*, *pitch* e *yaw*, representando a rotação nos eixos X, Y e Z, respectivamente. A Figura 10 exemplifica a orientação de um RPA em relação à um sistema de coordenada fixo.

Figura 10 – Orientação do RPA  $[X_r, Y_r, Z_r]$  referente a um eixo de coordenada global  $[X, Y, Z]$ .



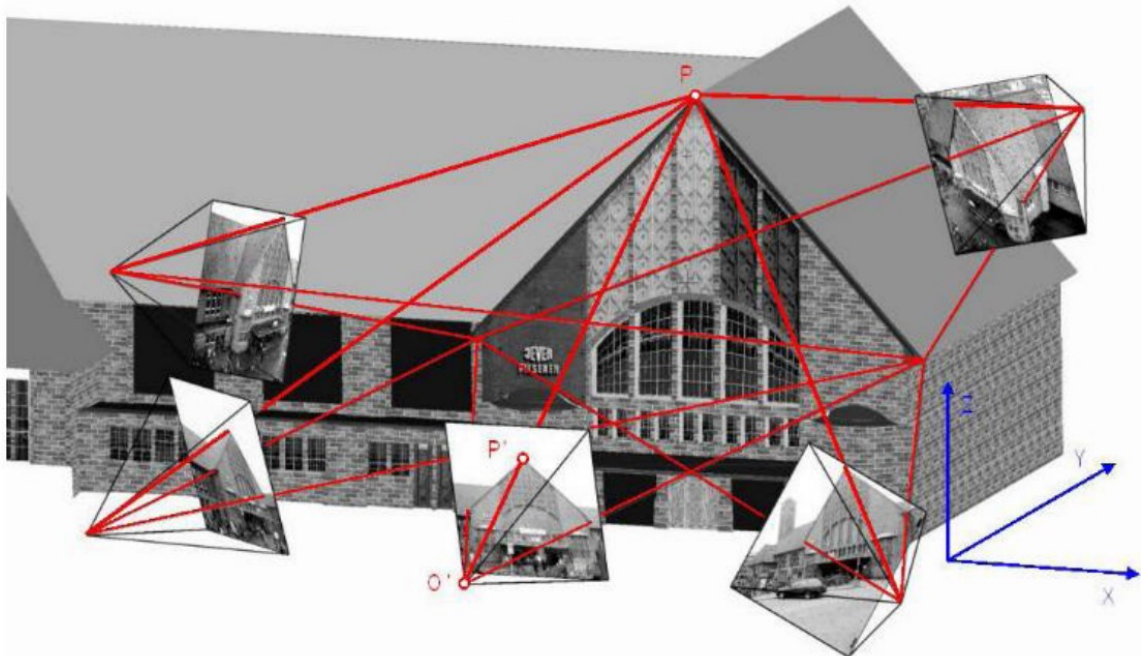
Fonte: Autor.

## 2.4 FOTOGRAMETRIA

A fotogrametria é a ciência que engloba diferentes métodos de medição tridimensional, como forma e localização, a partir de um conjunto de duas ou mais imagens bidimensionais adquiridas deste mesmo objeto em diferentes posições e orientações (LUHMANN et al., 2014).

Esta técnica baseia-se na triangulação de pontos correspondentes identificados nas imagens adquiridas de distintas posições sob um modelo matemático de câmera pré-definido, usualmente modelo *pinhole*. A técnica permite realizar a reconstrução tridimensional fiel do objeto. Entretanto, para que a reconstrução possua uma escala fidedigna, é necessário o conhecimento da posição e orientação de cada imagem utilizada para reconstrução, ou introduzindo objeto que sirva de escala para tal técnica. Por exemplo, a Figura 11 apresenta o princípio de medição por fotogrametria, onde é possível estimar o ponto **P** correspondente em cada imagem pela triangulação dos centros ópticos através do modelo matemático de câmera *pinhole* (LINDER, 2016; LUHMANN et al., 2014).

Figura 11 - Princípio de medição por fotogrametria.



Fonte: (LUHMANN et al., 2014).

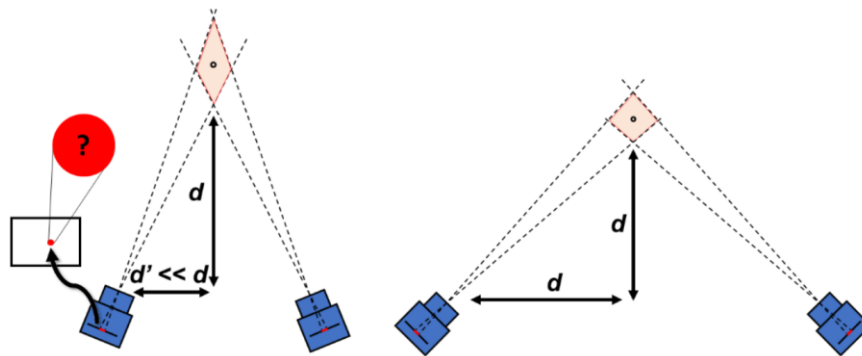
### Aquisições das Imagens

Para uma boa aquisição de imagens para realizar o processo fotogramétrico, destacam-se os seguintes parâmetros que influenciam as incertezas de medição:

configuração da trajetória de aquisição, percentual de sobreposição entre imagens, resolução da câmera e textura na cena.

A influência da configuração de trajetória resulta em uma incerteza na medição de profundidade da cena, sendo inversamente proporcional a distribuição das imagens adquiridas sobre a seção a ser inspecionada. Existe um equilíbrio entre distância do objeto e distância entre as posturas das câmeras, adotando uma distância entre posturas igual ou superior à distância ao mensurando, resulta em uma incerteza de profundidade inferior (LUHMANN et al., 2014), conforme apresentado Figura 12.

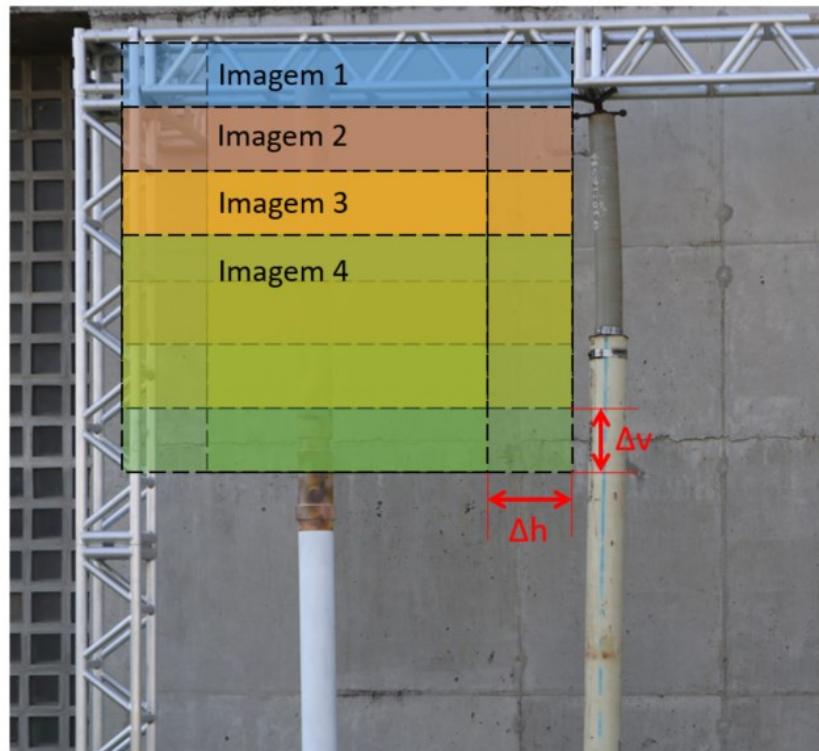
Figura 12 - Relação da incerteza relacionada entre distância entre centros ópticos e distância ao mensurando.



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

Para garantir uma reconstrução fotogramétrica satisfatória, é essencial que o conjunto de imagens siga uma disposição adequada do objeto a ser inspecionado. Isso envolve capturar um número suficiente de imagens de diferentes posições e orientações, de modo a abranger completamente a região de interesse. É recomendado manter uma sobreposição de imagens entre 65% e 80% sobre a região de interesse (GOODBODY et al., 2021). A Figura 13 exemplifica as aquisições das imagens com pequenas variações horizontais e verticais para que mantenha a proporção de sobreposição desejado.

Figura 13 – Exemplo de aquisição de imagens para sobreposição desejada, sendo  $\Delta v$  e  $\Delta h$  a variação vertical e horizontal para manter sobreposição.

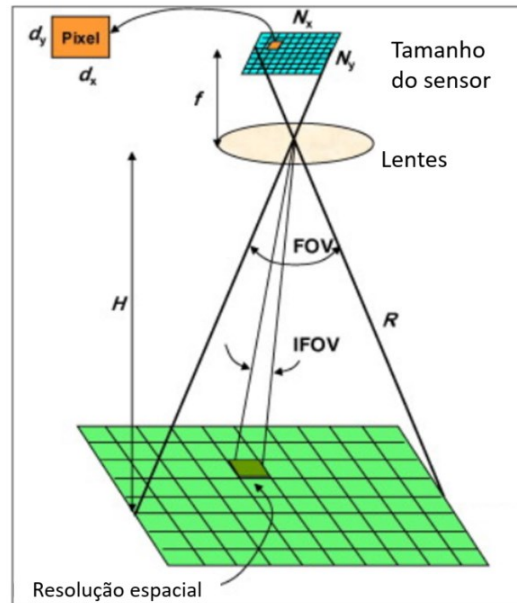


Fonte: Autor.

A resolução espacial, também conhecida como Ground Sample Distance (GSD), é um importante indicador de qualidade na fotogrametria. Ela se refere à precisão de uma medida em relação ao espaço, ou seja, à dimensão real que um pixel da imagem representa. É uma medida que correlaciona o tamanho da cena com a projeção dela no sensor da câmera (SRIVANTAVA; PETROPOULOS; KERR, 2016).

A resolução espacial pode ser calculada de um modo simplificado através da distância do objeto, a distância focal da câmera e a resolução do pixel. A Figura 14 ilustra a definição deste parâmetro, uma projeção dos pixels do sensor no campo de visão da câmera, definido pela equação (1).

Figura 14 – Parâmetro GSD, sendo a projeção do pixel sob o campo de visão da câmera.



Fonte: adaptado de (ZHENG; TIDROW, 2009).

$$GSD = \frac{D_{pixel} \times distância}{f} \quad (1)$$

Onde  $D_{pixel}$  representa a dimensão do pixel no sensor da câmera, *distância* refere-se a distância entre centro óptico e cena e  $f$  o comprimento focal da lente utilizada na câmera.

A resolução espacial é diretamente proporcional ao nível de detalhe exigido na reconstrução fotogramétrica, por exemplo, na Figura 15 é ilustrado a perda de detalhamento da imagem conforme o parâmetro GSD aumenta.

Figura 15 – Exemplo de variação da resolução espacial e nível de detalhe observado.



Fonte: (GEOSENSORI, 2020).

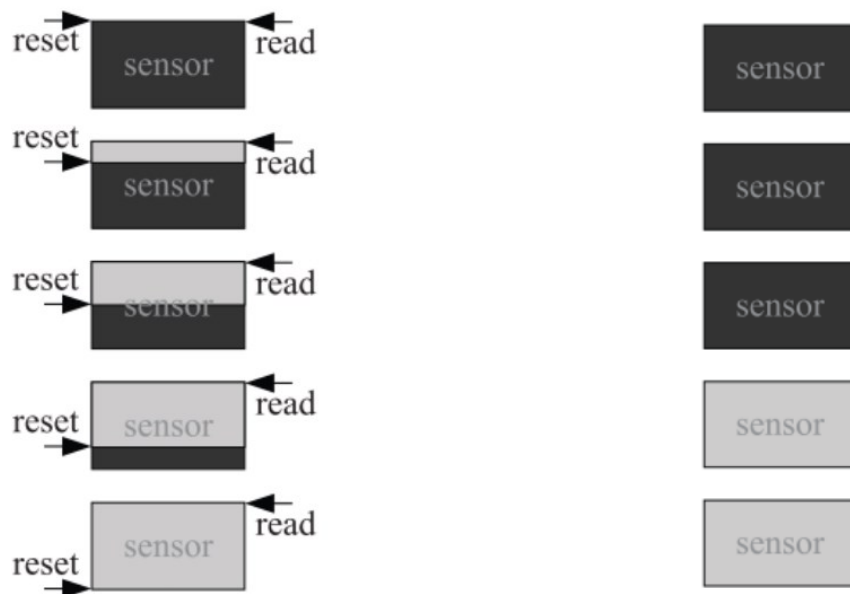


Além dos fatores apresentados na aquisição de imagens, deve-se tomar conhecimento do tipo de obturador especificado pela câmera utilizada. *Rolling shutter* e *global shutter* são os dois tipos diferentes de mecanismos de obturador usados em câmeras.

*Rolling shutter* funciona expondo diferentes partes do sensor da câmera em momentos diferentes. Isso geralmente é obtido pela varredura do sensor na horizontal ou na vertical. Como resultado, o *rolling shutter* pode produzir imagens distorcidas de objetos em movimento, especialmente se a câmera ou o assunto estiver se movendo rapidamente.

Sensor do modo *global shutter*, por outro lado, expõe todo o sensor da câmera ao mesmo tempo. Isso significa que todos os pixels no sensor são expostos simultaneamente, em vez de sequencialmente. Como resultado, os obturadores globais são mais adequados para capturar objetos em movimento rápido sem distorção. A Figura 16 exemplifica os dois métodos de obturadores funcionando.

Figura 16 – Exemplificação de aquisição de imagem de ambos obturadores.



(a) Aquisição pelo sensor *rolling shutter*. (b) Aquisição pelo sensor *global shutter*.

Fonte: (SCHOBBERL et al., 2009).

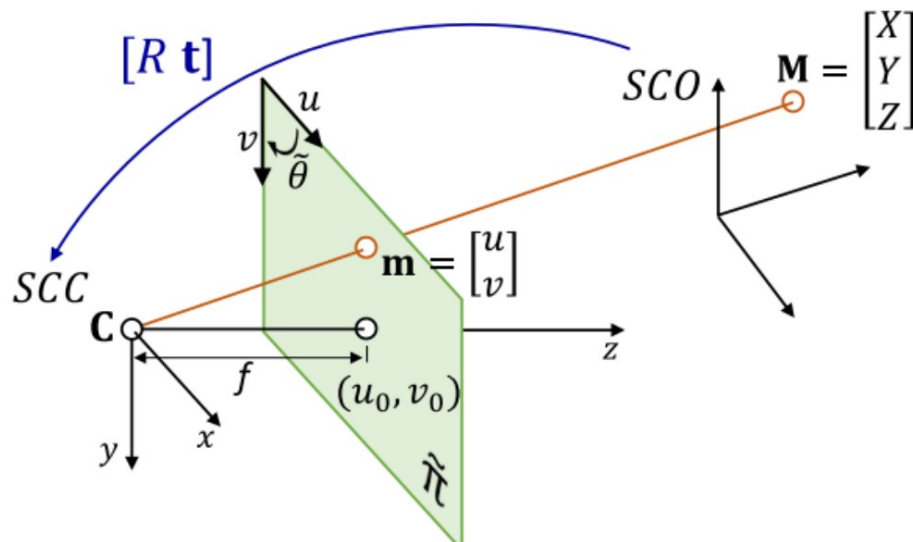
Sensores *global shutter* tendem a ser mais caras e menos comuns do que os *rolling shutter*, comumente utilizado em dispositivos eletrônicos, mas oferecem vantagens em certas aplicações, como fotografia de alta velocidade, robótica e realidade virtual. No entanto, as os obturadores de forma *rolling shutter* são

amplamente utilizadas em muitos tipos de câmeras devido ao seu custo mais baixo e design mais simples.

## 2.5 MODELO DA CÂMERA PINHOLE

Modelo de câmera *pinhole*, ou câmera estenopeica, é o modelo matemático comumente utilizado na fotogrametria. Este é um modelo matemático que relaciona um ponto tridimensional à sua projeção no plano imagem, devido a sua simplicidade para a conversão do Sistema 3D de Coordenadas do Objeto (**SCO**) para o Sistema 2D de Coordenada da Câmera (**SCC**), Figura 17. Este modelo de câmera pode ser usado para descrever uma câmera moderna após realizar todas as compensações de distorções de lentes utilizadas atualmente.

Figura 17 - Modelo computacional da câmera *pinhole*.



Fonte: (BUSCHINELLI et al., 2020b).

O modelo é representado através de equações matriciais relacionando parâmetros extrínsecos e intrínsecos. Os parâmetros extrínsecos definidos pela matriz de rotação e vetor de translação convertendo **SCO** para **SCC**. Ao converter do espaço tridimensional **M** para o espaço imagem **m** é utilizado a equação:

$$\mathbf{m} \simeq \mathbf{P} \mathbf{M} \quad (2)$$

Sendo  $\simeq$  representa a igualdade para um fator de escala arbitrário. A matriz de projeção **P** pode ser decomposta por fatoração QR em:

$$\mathbf{P} = \mathbf{K} [\mathbf{R} \ \mathbf{t}] \quad (3)$$

Onde **K** representa a matriz de parâmetros intrínsecos:



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

Onde:  $(f_u, f_v)$  correspondentes ao comprimento focal em pixel em relação aos eixos  $\mathbf{X}$  e  $\mathbf{Y}$ ;  $(u_0, v_0)$  as coordenadas do ponto central do sensor e  $\gamma$  é o ângulo de alinhamento entre os eixos  $\mathbf{u}$  e  $\mathbf{v}$  do plano imagem representado pela equação subsequente.

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

Os parâmetros extrínsecos da câmera, são encapsulados em uma matriz de rotação  $\mathbf{R}$  e um vetor de translação  $\mathbf{t}$ , representando a mudança de coordenada do **SCO** para **SCC**.

### 2.5.1 Calibração de câmera

Calibrar uma câmera pinhole envolve determinar os parâmetros intrínsecos da câmera, que descrevem sua geometria interna, e os parâmetros extrínsecos, que descrevem sua posição e orientação no espaço. Os parâmetros intrínsecos incluem a distorções radiais da lente  $[K_1, K_2, K_3]$ ; o centro óptico em pixel, da imagem  $(u_0, v_0)$ ; e o fator de inclinação (5). Os parâmetros extrínsecos incluem a posição e orientação da câmera no espaço 3D (LUHMANN et al., 2014; THOMAS LUHMAN, STUART ROBSON, STEPHEN KYLE, 2011).

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (6)$$

$$x_c = x(1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + (P_1(r^2 + 2x^2) + P_2 xy) \quad (7)$$

$$y_c = y(1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + (2P_1 xy + P_2(r^2 + 2y^2)) \quad (8)$$

Onde:

- $r$ : distância entre a coordenada do centro óptico  $(u_0, v_0)$ ;
- $(x_c, y_c)$ : coordenadas corrigidas;
- $(x, y)$ : coordenadas distorcidas em relação ao ponto principal, sendo  
 $x = x_d - u_0$  e  $y = y_d - v_0$
- $[K_1, K_2, K_3]$ : coeficientes de distorção radial;
- $[P_1, P_2]$ : coeficientes de distorção tangencial.

Existem vários métodos para calibrar uma câmera pinhole, mas uma abordagem comum é usar um alvo de calibração com geometria conhecida. O alvo de calibração geralmente consiste em uma grade planar de pontos, como um tabuleiro de xadrez ou uma grade de pontos. A câmera é usada para capturar imagens do alvo de várias posições e orientações, e as posições dos pontos da grade nas imagens são usadas para calcular os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera.

A calibração da câmera pinhole é uma tarefa fundamental em visão computacional e fotogrametria, e é essencial para muitas aplicações, como reconstrução 3D, rastreamento de objetos e realidade aumentada.

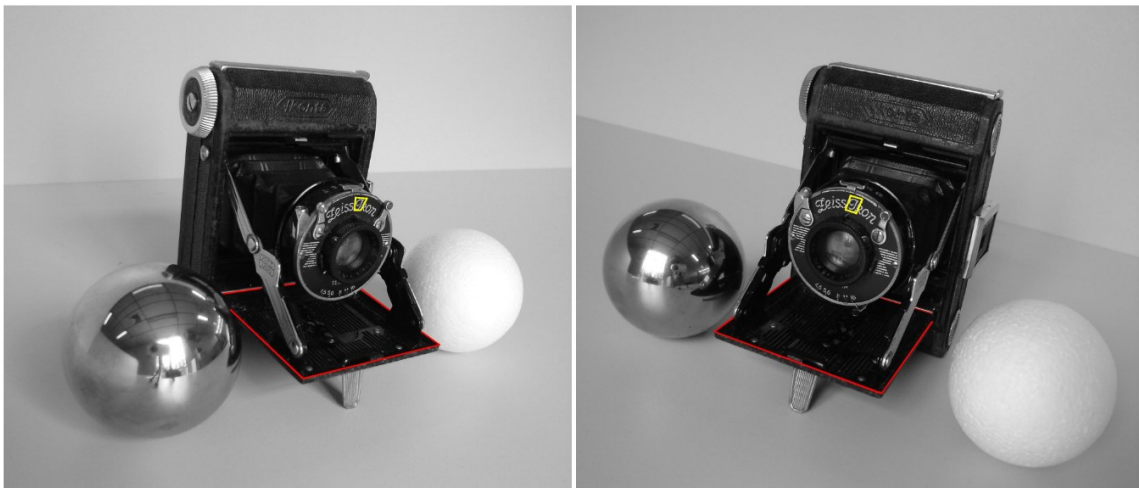
### 2.5.2 Identificação de pontos correspondentes

Na fotogrametria, a identificação de pontos correspondentes é um processo crucial para criar modelos tridimensionais a partir de imagens. Esses pontos correspondentes são pontos chave em várias imagens que representam o mesmo objeto ou característica no espaço.

Entretanto, existe algumas dificuldades de identificação destes pontos devido a homogeneidade de textura ou texturas reflexivas, além da oclusão de pontos correlacionando duas posições de imagens. Estes problemas podem ser identificados na Figura 18.

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.

Figura 18 – Exemplo de problemas na identificação de pontos correspondentes em duas imagens de orientações diferentes da mesma cena.



Fonte: (HOFMANN, 2006).

Existem várias técnicas e algoritmos para identificar pontos correspondentes na fotogrametria, dentre alguns métodos destacam-se os seguintes.

#### 2.5.2.1 *Identificadores de região*

São técnicas que extraem algumas características locais de determinadas imagens. Métodos como SIFT - *Scale-Invariant Feature Transform*, (MOREL; YU, 2008), SURF - *Speeded-Up Robust Features* (BAY; TUYTELAARS; VAN GOOL, 2006), ORB - *Oriented FAST and Rotated* (RUBLEE et al., 2011) e BRISK - *Binary Robust Invariant Scalable Keypoints* (LEUTENEGGER; CHLI; SIEGWART, 2011) são amplamente utilizados para extrair pontos chave e descritores de imagens.

#### 2.5.2.2 *Correspondência de características*

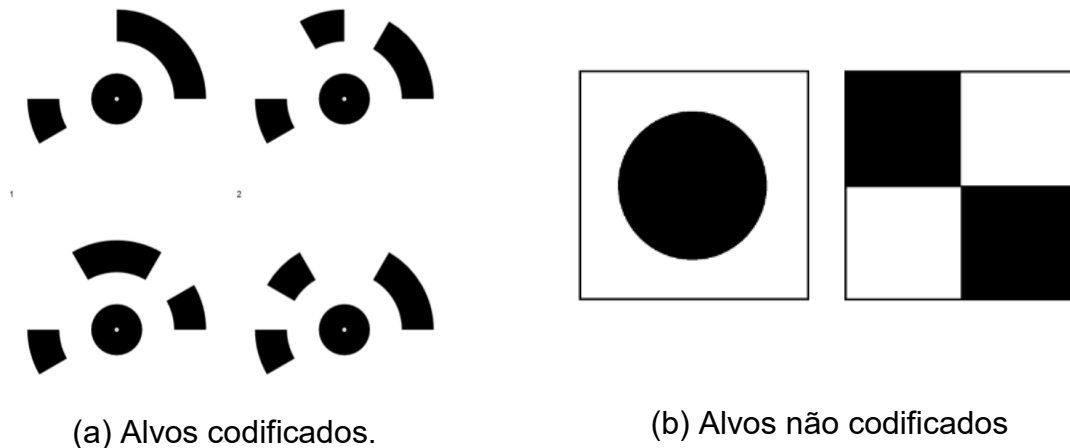
Uma vez extraídas as características, algoritmos são empregados para encontrar correspondências entre os pontos chave nas diferentes imagens. Métodos como RANSAC - *Random Sample Consensus* (FISCHLER; BOLLES, 1981) são comumente usados para filtrar correspondências inconsistentes ou errôneas.

#### 2.5.2.3 *Correspondência por Alvos*

Os alvos fotogramétricos desempenham um papel importante na fotogrametria de curta distância, onde a precisão e a acurácia são cruciais para a reconstrução tridimensional precisa de objetos ou áreas específicas. Esses alvos são marcadores ou padrões visuais que são colocados estrategicamente na cena para ajudar na identificação e correspondência de pontos na reconstrução fotogramétrica.

Os alvos utilizados são compostos de geometrias simples, construídos com um padrão codificado, auxiliando a busca por pontos correspondentes entre imagens nos softwares de reconstrução tridimensional. Estes alvos podem conter um padrão geométrico codificado ou não, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19 – Tipos de alvos codificados e não codificados.



Fonte: (METASHAPE, 2022).

É importante ressaltar que as técnicas de fotogrametria realizam transformações sem proporção de escala, ou seja, ao converter do espaço bidimensional para o espaço tridimensional a reconstrução não possui escala real. No entanto, para que a reconstrução tenha uma escala adequada, é necessário ter informações adicionais sobre a posição da câmera ou alguma distância conhecida na cena. Essa informação é fundamental para fornecer uma referência de escala e garantir que a reconstrução tridimensional seja fiel à realidade.

Sem uma referência de escala, a reconstrução tridimensional resultante seria apenas uma representação geométrica sem uma correspondência precisa com as dimensões reais da cena. Portanto, é necessário estabelecer uma condição de posição da câmera ou introduzir objetos de referência com dimensões conhecidas para dar escala à reconstrução. Esses elementos de escala fornecem pontos de ancoragem que permitem determinar a relação entre as coordenadas 3D reconstruídas e as dimensões reais do mundo físico. Figura 20 exemplifica a criação destas escalas utilizadas em cena. Para uma boa reconstrução existe algumas especificações técnicas de tamanho e construções destes alvos e escalas como em (METASHAPE, 2022), (CULTURAL HERITAGE IMAGING, 2015), ou (LUHMANN et al., 2014) exemplificando como dimensionar, calibrar e definir o alvos e escalas para a distância da câmera em relação à cena.

Figura 20 – Escalas fotogramétricas utilizando alvos.



Fonte: (CULTURAL HERITAGE IMAGING, 2015).

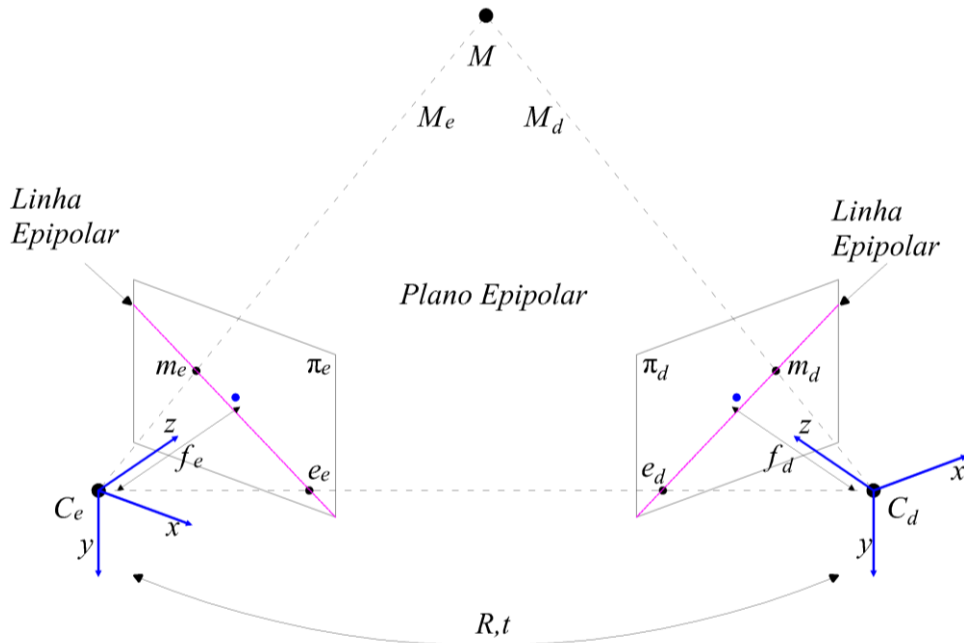
## 2.6 VISÃO ESTÉREO

Visão estéreo, ou estereoscópica, é uma técnica de visão que utiliza duas câmeras separadas por uma posição e orientação conhecida e constante, denominada *baseline*, adquirindo imagens simultâneas de um mesmo objeto. Ao conhecer a postura e distância fixa entre as câmeras do sistema de visão, simplifica o encontro de pontos correspondentes entre pares de imagens.

Um sistema de visão estéreo pode ter a percepção de profundidade de um ponto, e isto é realizado considerando que a profundidade é inversamente proporcional a disparidade que pode ser calculada através da diferença de posição no sensor do par estéreo de um mesmo ponto no objeto (STIVANELLO, 2008; VIERA, 2018).

Em um sistema estéreo, assim como no modelo de câmera pinhole, existem os parâmetros extrínsecos e intrínsecos, partindo do princípio de que o sistema utiliza duas câmeras comuns, os parâmetros intrínsecos seguem os princípios do modelo pinhole, que podem ser observados na Figura 17. 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  $t = (O' - O'')$  e uma matriz de rotação R. Esses parâmetros tipicamente representam a transformação do **SCC** esquerda para o da direita. A Figura 21 representa as relações de um sistema estéreo.

Figura 21 – Relações de um sistema estéreo.



Fonte: (MACHADO, 2021).

Os vetores  $M_E = [X_E, Y_E, Z_E]^T$  e  $M_D = [X_D, Y_D, Z_D]^T$ , são pontos definidos através do ponto **M** nos sistemas de coordenadas das câmeras pela equação:

$$M_D = R(M_E - t) \quad (9)$$

Os parâmetros extrínsecos de ambas câmeras,  $(t_E, R_E, t_D, R_D)$ , definem a rotação e translação entre câmeras para o sistema estéreo (STIVANELLO, 2008):

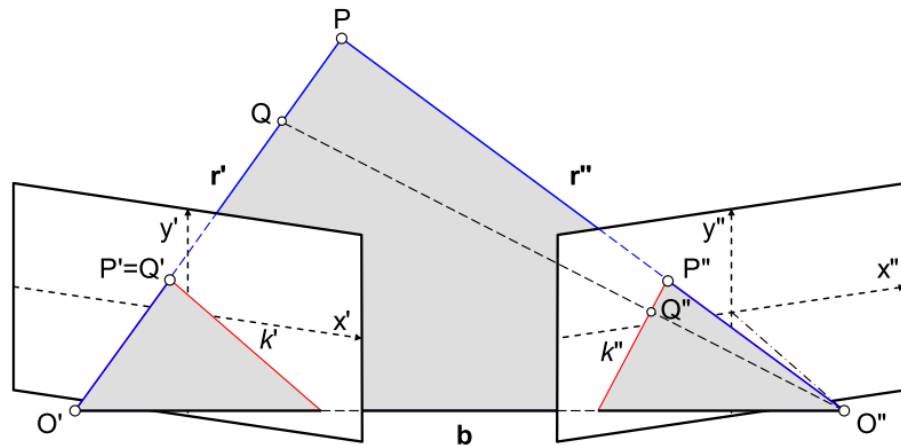
$$R = R_D R_E^T \quad (10)$$

$$t = t_E - R^T t_D \quad (11)$$

### 2.6.1 Geometria Epipolar e Retificação de Imagens

Considerando um sistema de câmera *pinhole* definido, os encontros de pontos correspondentes são realizados através da geometria epipolar definida pela modelagem do sistema estéreo onde o ponto **P** projetará na imagem da esquerda o ponto **P'** e na imagem da direita deve ser encontrado a projeção **P''** sobre a linha epipolar. Figura 22 apresenta a identificação do ponto **P** para o par de imagens com ângulo de convergência. O *baseline* (**b**) e os raios de projeção **r'** e **r''** dos centros ópticos de cada câmera define as linhas epipolares **k'** e **k''**.

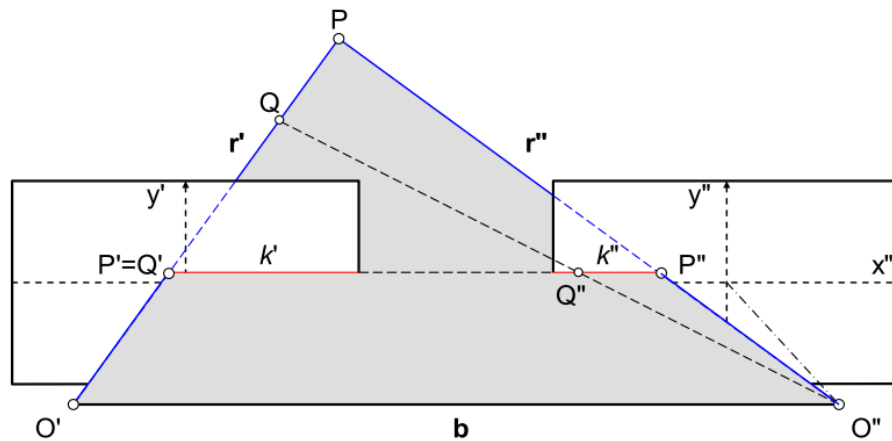
Figura 22 - Linhas epipolares de um sistema estéreo com ângulo de convergência.



Fonte: (LUHMANN et al., 2014).

Para simplificação dos cálculos, se adota uma normalização das linhas epipolares retificando a imagem de forma que as linhas fiquem posicionadas horizontalmente, conforme Figura 23. A importância das linhas epipolares refere-se a restrição de busca dos pontos correspondentes ao espaço das linhas, quando normalizadas elas devem estar na mesma altura da imagem, simplificando o esforço computacional para a busca dos pontos correspondentes. (LUHMANN et al., 2014).

Figura 23 - Linhas epipolares para o caso de imagens retificadas.



Fonte: (LUHMANN et al., 2014).

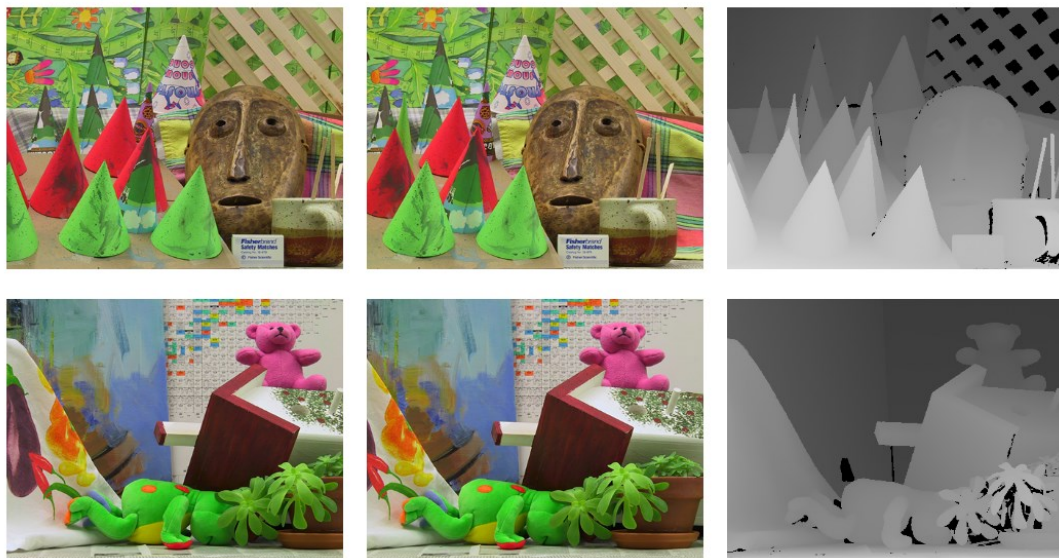
Através da modelagem de um sistema de visão estéreo retificado é possível realizar, com baixo esforço computacional, a estimação da distância dos objetos no ambiente utilizando uma técnica conhecida como mapas de disparidade.

## 2.6.2 Mapa de Disparidade

Mapas de disparidade são elementos cruciais em sistema de visão estéreo para navegação e mapeamento na robótica móvel (LAMBERT, 2018). A utilização de mapas de disparidade para navegação é um método muito utilizado devido ao esforço computacional reduzido para obter uma boa estimacão de distâncias dos objetos na cena, além da possibilidade da rápida percepção da cena por completo ao utilizar um visão amplo do sistema (GOLDBERG; MAIMONE; MATTHIES, 2002).

As intensidades do pixel de um mapa de disparidade referem-se à diferença aparente entre a posição do pixel entre as imagens do par estéreo, ao realizar esta comparação em todos pixels das imagens uma terceira imagem é criada. Esta imagem, normalmente em escala de cinza, traduz a profundidade do ponto em relação ao sistema estéreo (VIERA, 2018). Figura 24 apresenta exemplos de mapas de disparidade extraídos do par de imagens de um sistema estéreo, quanto mais claro, mais próximo o objeto está.

Figura 24 - Exemplos de imagens de um sistema estéreo e o mapa de disparidade resultante.



Fonte: Adaptado de (VIERA, 2018).

Considere que não há variação em relação ao eixo  $Y$ , o plano imagem está descrito ao longo do eixo  $X$  e o objeto  $P$  medido a uma distância  $Z_e$ . Por definição de semelhança de triângulos podemos estimar a distância  $Z_e$  através da equação (12), relacionando o comprimento focal –  $f$  e o *baseline* –  $b$ , sendo  $k'$  e  $k''$  a distância horizontal da projeção do ponto  $P$  nas imagens da esquerda e direita, respectivamente.

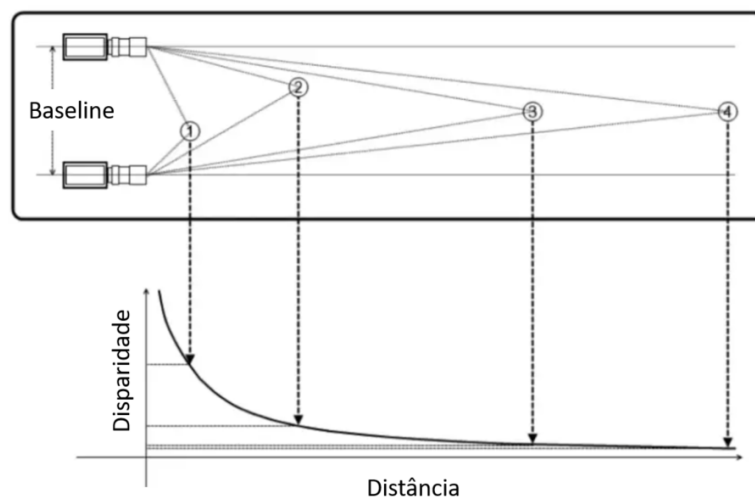


$$z_e = f \left( \frac{x_p}{x'} \right) = f \left( \frac{b}{k' - k''} \right) \quad (12)$$

Ao observar na equação (12), verifica-se que a profundidade é inversamente proporcional a disparidade ( $k' - k''$ ). Quanto maior o valor da intensidade do pixel, mais próximo o objeto está em relação aos centros ópticos.

Para determinar a correspondência entre pixels de um sistema estéreo retificado, existem algumas técnicas de correspondência. Estas técnicas permitem a identificação do objeto desejado no plano imagem em tempo real.

Figura 25 – Profundidade é inversamente proporcional à disparidade.



Fonte: (BRADSKI; KAEHLER, 2009).

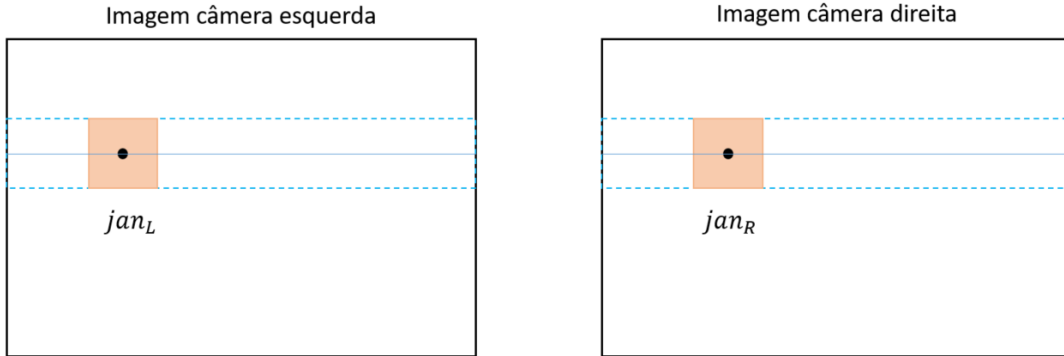
### 2.6.2.1 Técnicas de Correspondência de Pixel

Para solucionar o problema de correspondência de pontos para um mapa de disparidade, é necessário decidir se duas seções de pixels são correspondentes. Para isto existem algumas abordagens que transformam o problema em uma função de otimização. Dentre as principais técnicas, métodos de Newton (MORE; SORENSEN, 1982) e de gradiente (RUDER, 2016) se destacam na sua performance ao buscar pixels correspondentes. OpenCV, *Open Source Computer Vision Library*, (OPENCV, 2022a) é uma biblioteca de código aberto onde existem algoritmos prontos para correspondência de pixels ao utilizar um sistema estéreo. Uma delas é a busca de correspondência de padrão sob um tamanho de janela (BRADSKI; KAEHLER, 2009).

Ao retificar as imagens de um sistema estéreo garante-se que ambos planos das imagens estejam com a mesma orientação, existindo somente uma translação entre centros ópticos. Deste modo restringimos a busca de correspondência para a

mesma linha epipolar. A Figura 26 ilustra a janela deslizante ao longo da linha epipolar em busca do padrão correspondente.

Figura 26 – Ilustração da busca de janelas correspondentes para estimação da profundidade.



Fonte: Autor.

A similaridade dos padrões é calculada utilizando técnicas de Soma das diferenças dos quadrados (SSD) e soma da diferença absoluta (SAD) descritos, respectivamente, nas equações (13) e (14). A correspondência de janela é determinada pelo menor valor resultante das equações.

$$SSD(jan_L, jan_R) = \sum_x \sum_y (I_{jan_L}(x, y) - I_{jan_R}(x, y))^2 \quad (13)$$

$$SAD(jan_L, jan_R) = \sum_x \sum_y |I_{jan_L}(x, y) - I_{jan_R}(x, y)| \quad (14)$$

As medições de distância nos mapas de disparidade são determinadas pelas equações subsequentes, geradas pela matriz de projeção  $\mathbf{P}$  (3x4) da câmera esquerda. Ambos mapas possuem valores semelhantes, porém após filtrado existe uma inconsistência na medição devido a um erro aleatório pela falta de textura da imagem lida em escala de cinza (LAMBERT, 2018).

$$P = K[R | T] \quad (15)$$

$$dist_z = \frac{baseline_x}{disparidade} \quad (16)$$

$$dist_x = (u - P(1,3)) * \frac{dist_z}{P(1,1)} = (u - x_{principal}) * \frac{dist_z}{f_x} \quad (17)$$

$$dist_y = (v - P(2,3)) * \frac{dist_z}{P(2,2)} = (u - y_{principal}) * \frac{dist_z}{f_y} \quad (18)$$

Onde  $(u, v)$  são os pontos a serem mensurados no mapa de disparidade, *disparidade* é o valor da intensidade dos pixels em  $(u, v)$ ,  $(f_x, f_y)$  os comprimentos focais da lente em pixel,  $(x_{principal}, y_{principal})$  definem os pontos centrais da imagem e *baseline<sub>x</sub>* a distância  $x$  entre centros ópticos para as imagens retificadas.

## 2.7 DETECÇÃO DE OBJETOS

A detecção de objetos é um dos ramos mais complexos da visão computacional em termos de execução de duas tarefas importantes ao mesmo tempo, e em tempo de execução. A primeira tarefa é determinar onde os objetos estão localizados na imagem (localização dos objetos), e a segunda definir a qual categoria cada objeto pertence (classificação dos objetos) (ZHAO et al., 2019). Assim, o fluxo de trabalho dos modelos tradicionais de detecção de objetos pode ser dividido principalmente em três etapas: seleção da região informativa, extração de recursos e classificação (KEMAJOU; BAO; GERMAIN, 2019; LECUN; BENGIO; HINTON, 2015).

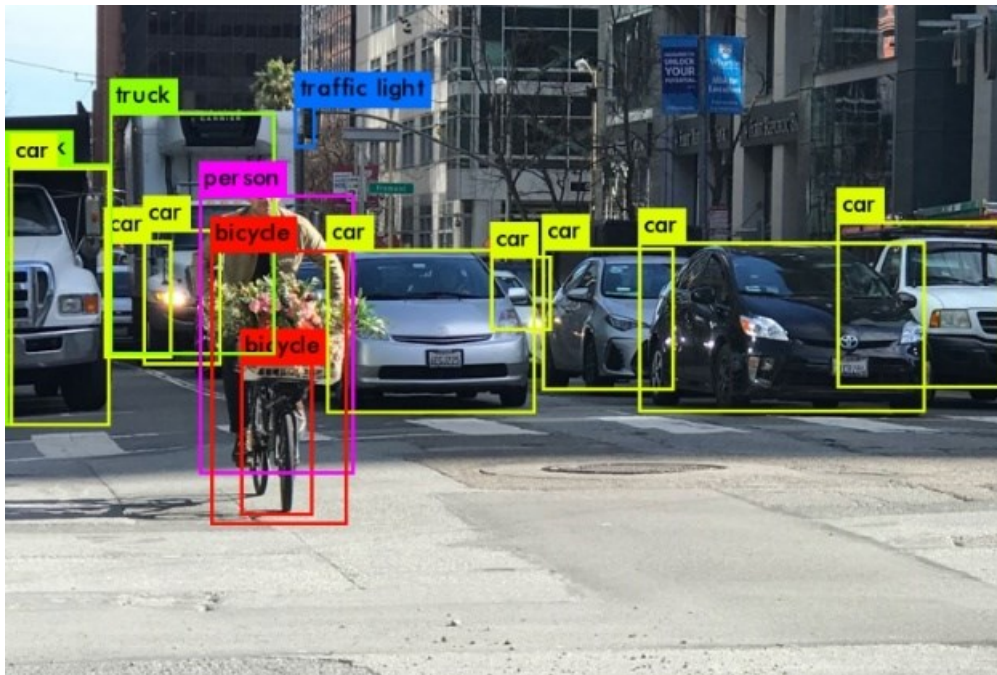
O conceito central por trás da detecção de objetos é que cada objeto tem seus recursos e nosso objetivo é capturá-los. Todos esses recursos ajudarão a segregar objetos diferentes uns dos outros. Conceitos semelhantes são usados para coisas como detecção de rosto e detecção de impressão digital (SHAH, 2020).

A evolução dos detectores de objetos começou com o detector Viola Jones (VIOLA; JONES, 2001) que foi usado para detecção em tempo real. Tradicionalmente, os algoritmos de detecção de objetos usavam recursos artesanais para capturar informações relevantes de imagens e um classificador estruturado para lidar com estruturas espaciais (AZEVEDO, 2022).

No entanto, essas abordagens tradicionais de detecção não são capazes de explorar totalmente o volume de dados extremamente grande e lidar com infinitas variações de aparência e forma do objeto. Apesar de não exigirem dados históricos para treinamento e não serem supervisionadas, essas técnicas possuem muitas restrições, principalmente quando lidam com cenários complexos como efeito de iluminação, oclusão e ordenação. A nova era da detecção de objetos é construída sobre técnicas de aprendizado profundo, *Deep Learning* – DL (BALLARD; BROWN, 1982; HUANG, 1997; ZHANG et al., 2020).

A detecção de objetos pode ser alcançada usando abordagens de aprendizado de máquina e aprendizado profundo. Considerando que, a abordagem baseada em DL pode capturar todo o processo de detecção sem definir explicitamente os recursos para fazer a classificação. A abordagem de aprendizado profundo é baseada exclusivamente no uso de Redes Neurais Convolucionais, *Convolutional Neural Networks* – CNNs, uma maneira eficiente de reconhecimento e classificação de padrões em imagens (KRIZHEVSKY; SUTSKEVER; HINTON, 2017; REDMON et al., 2017). Conforme apresentado na Figura 27, é possível identificar carros de diferentes formatos e cores na mesma imagem, mesmo parcialmente oclusos por outros objetos.

Figura 27 – Detecção de objetos em um cenário urbano.



Fonte: (AZEVEDO, 2022).

Diversas técnicas e modelos redes neurais convolucionais (CNNs) são usadas para detecção de objetos, e o desempenho dessas redes varia dependendo do conjunto de dados e da tarefa específica em questão. Com objetivo de contextualizar estas diferentes técnicas, a seguir estão as quatro CNNs mais populares e bem-sucedidas para detecção de objetos, juntamente com suas vantagens e desvantagens:

### **2.7.1 Faster R-CNN**

O Faster R-CNN, desenvolvido por (REN et al., 2017), é uma das CNNs mais populares para detecção de objetos em tempo real. A principal vantagem do Faster R-CNN é que ele é capaz de gerar propostas de região de maneira rápida e precisa, utilizando uma rede neural separada chamada Rede de Propostas Regionais, *Region Proposal Network* (RPN). No entanto, a desvantagem é que o processo de treinamento do Faster R-CNN pode ser relativamente lento e exigir muitos recursos computacionais.

### **2.7.2 Mask R-CNN**

O Mask R-CNN, desenvolvido por (HE et al., 2017), é uma extensão do Faster R-CNN que inclui uma camada adicional para segmentação de instância, permitindo a detecção e segmentação precisa de objetos individuais em uma imagem. A principal vantagem do Mask R-CNN é sua precisão em tarefas de segmentação de objetos, bem como sua capacidade de detecção de objetos. No entanto, a desvantagem é que o Mask R-CNN pode ser mais lento e exigir mais recursos computacionais do que outras CNNs para detecção de objetos.

### **2.7.3 SSD - Single Shot MultiBox Detector**

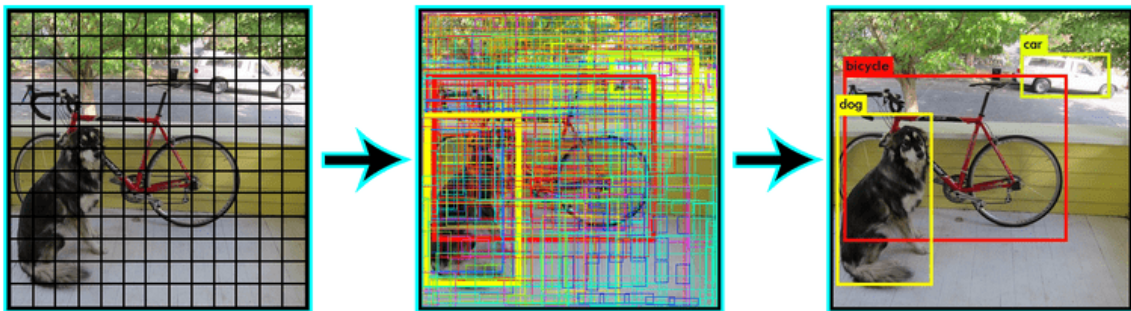
O SSD, desenvolvido por (LIU et al., 2015), é outra CNN para detecção de objetos que é conhecida por sua eficiência em termos de uso de recursos computacionais e tempo de execução. A principal vantagem do SSD é sua simplicidade e facilidade de treinamento, além de sua capacidade de detectar objetos de vários tamanhos e aspectos. No entanto, a desvantagem é que o SSD pode ser menos preciso do que outras redes mais complexas em algumas tarefas de detecção de objetos.

### **2.7.4 YOLO - You Only Look Once**

O YOLO, desenvolvido por (REDMON et al., 2017), é uma CNN para detecção de objetos que é altamente eficiente em termos de uso de recursos computacionais e pode rodar em tempo real nas unidades de processamento gráficos (GPU). A principal vantagem do YOLO é sua eficiência computacional e baixo tempo de execução, o que o torna adequado para aplicações em sistemas embarcados ou dispositivos móveis.

Esta CNN é extremamente simples, descrito na Figura 28. Uma única rede convolucional prevê simultaneamente várias caixas delimitadoras e probabilidades de classe para essas caixas. O YOLO treina em imagens completas e otimiza diretamente o desempenho da detecção. Este modelo unificado tem vários benefícios sobre os métodos tradicionais de detecção de objetos. O processamento de imagens com YOLO é simples e direto (REDMON et al., 2016).

Figura 28 – Exemplo da classificação em um único estágio por YOLO.



Fonte: adaptado de (REDMON et al., 2017).

O modelo possui uma ordem de magnitude mais rápida do que outros algoritmos de detecção de objetos. A limitação do modelo está nos objetos pequenos dentro da imagem, por exemplo, dificuldades em detectar um bando de pássaros, devido às restrições espaciais do algoritmo.

Este método funciona dividindo a imagem de entrada em uma grade  $S$  e se o centro de um objeto cair em uma célula da grade, essa célula é responsável por detectar esse objeto. Cada célula da grade prevê  $B$  caixas delimitadoras, junto com as pontuações de confiança delas. Essas pontuações de confiança refletem o quão confiante o modelo está de que a caixa contém um objeto e também o quão preciso ele acha que a caixa é o que o ele está prevendo.

Formalmente, definimos confiança como  $Pr(Object) * IOU_{pred}^{truth}$ . Se não existir nenhum objeto na célula, as pontuações de confiança, *confidence score* (cs), obrigatoriamente devem ser zero. Caso contrário, queremos que a pontuação de confiança seja igual à interseção sobre a união, *Intersection over Union* (IoU), entre a caixa prevista e a verdade.

Cada caixa delimitadora consiste em 5 previsões:  $x, y, w, h, cs$ . As coordenadas  $(x, y)$  representam o centro da caixa em relação aos limites da célula da grade. A largura e a altura são previstas em relação à imagem inteira.

## 2.8 ROBOT OPERATING SYSTEM

O Robot Operating System (ROS) é um framework de código aberto com uma diversidade de bibliotecas e coleções de ferramentas para padronizar uma comunicação de software entre os componentes do robô como sensores, câmeras, atuadores em recursos de computação distribuídos. O conceito visa simplificar a tarefa de criar um comportamento robótico complexo e robusto em uma ampla variedade de plataformas robóticas (OPEN SOURCE ROBOTICS FOUNDATION, 2014; QUIGLEY; GERKEY; SMART, 2015).

Lidar com variações do mundo real em tarefas e ambientes complexos é tão difícil que nenhum indivíduo ou instituição pode esperar construir um sistema completo do zero. Como resultado, o ROS foi criado desde o início para incentivar o desenvolvimento de software de robótica colaborativa. Por exemplo, no problema de “buscar um item”, uma organização pode ter especialistas em mapeamento de ambientes internos e pode contribuir com um sistema de produção de mapas internos. Outro grupo pode ter experiência no uso de mapas para navegar em ambientes internos. Outro grupo pode ter descoberto uma abordagem específica de visão computacional para reconhecer pequenos objetos. O ROS inclui muitos recursos projetados especificamente para simplificar esse tipo de colaboração em larga escala.

O ROS é chamado de Meta-Sistema Operacional de código aberto para robôs. Embora não seja uma palavra do dicionário, ela representa um sistema que fornece os serviços esperados de um sistema operacional, incluindo abstração de hardware, controle de dispositivo de baixo nível, implementação de funcionalidade comumente usada, passagem de mensagens entre processos e gerenciamento de pacotes (JOSEPH, 2018; YOONSEOK PYO, HANCHEOL CHO, LEON JUNG, 2017).

### 2.8.1 Comunicação

O conceito de comunicação no ROS é baseado em processos de nós (*nodes*) onde realiza a necessidade de computação para troca de informações. Os nós devem operar como pequenos processos. Normalmente, um robô combina uma grande quantidade de nós combinados em um gráfico e se comunicam entre si usando tópicos de streaming, serviços e servidores de parâmetros. Um sistema de controle de robô geralmente compreende muitos nós, por exemplo, um nó realiza a aquisição de imagens de uma câmera, outro nó fornece um mapeamento de pontos homólogos de um sistema de câmera estéreo, outro nó calcula todos esses pontos para reconstruir

o ambiente para localizar o robô, e assim por diante (OPEN SOURCE ROBOTICS FOUNDATION, 2014; QUIGLEY; GERKEY; SMART, 2015).

Existem três métodos usados entre os nós para se comunicar. Um tópico fornece uma transmissão/recepção de mensagem unidirecional; um servidor que fornece uma solicitação/resposta de mensagem bidirecional e uma ação que fornece uma mensagem bidirecional com uma meta/resultados/feedback intermediário de resposta. A comunicação da mensagem é resumida na Tabela 1.

Tabela 1 – Características dos métodos de comunicação do ROS.

<b>Tipo</b>	<b>Características</b>		<b>Descrição</b>
<b>Topic</b>	Assíncrono	Unidirecional	Troca contínua de dados
<b>Service</b>	Síncrono	Bidirecional	Solicitação de processamento e responder no estado atual
<b>Action</b>	Síncrono	Bidirecional	Para retornar um valor de feedback intermediário ou quando tiver um longo tempo de resposta após a solicitação

Fonte: (JOSEPH, 2015).

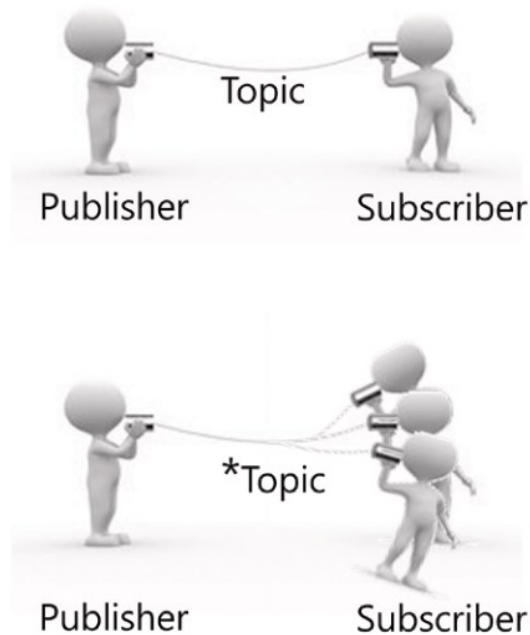
### 2.8.1.1 Tópicos

Os tópicos (*Topics*) são barramentos nomeados sobre os quais os nós trocam mensagens. Como os nós caracterizam um pequeno processo do robô, eles não precisam saber com quem estão se comunicando, apenas recebem ou enviam dados periodicamente. Publicadores (*Publishers*) são tarefas realizando leituras periódicas de informações proveniente dos sensores ou tarefas paralelas publicando tais mensagens cíclicas nos tópicos. Os assinantes (*Subscribers*) são as tarefas que processam algum ato e precisam das informações publicadas nos tópicos para executar. Eles funcionam como uma semântica publicador/assinante anônima, que desvincula a produção de informação de seu consumo.

A estrutura *Publisher/Subscriber* é o método mais comum para troca de dados em um sistema distribuído e pode ser usado em vários nós ao mesmo tempo, conforme mostrado na Figura 29. Antes que os nós comecem a transmitir dados sobre tópicos, eles devem anunciar o nome do tópico e o tipo de mensagem que será enviada. Os tópicos são unidirecionais e permanecem conectados para enviar ou receber mensagens continuamente, é adequado para dados de sensores que exigem que as mensagens sejam publicadas periodicamente. Tópicos funciona com vários assinantes recebendo mensagens de um editor e vice-versa (JOSEPH, 2018; YOONSEOK PYO, HANCHEOL CHO, LEON JUNG, 2017).



Figura 29 – Troca de mensagens por tópicos. Permitindo não somente uma troca 1:1, mas também 1:N, N:1 e N:N.



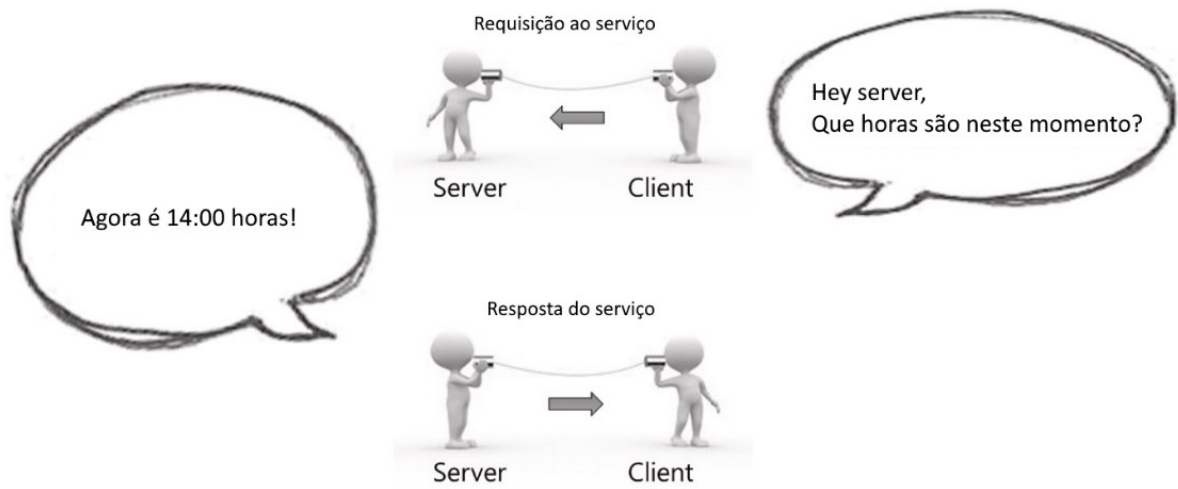
Fonte: adaptado de (YOONSEOK PYO, HANCHEOL CHO, LEON JUNG, 2017).

#### 2.8.1.2 Serviços

Os serviços (*Services*) são outra maneira de passar dados entre nós no ROS. Os serviços são apenas chamadas de procedimento remoto (RPC) síncronas. Eles permitem que um nó chame uma função que é executada em outro nó como uma analogia de solicitação e resposta. Um nó ROS oferece um serviço sob um nome único, e um cliente chama o serviço enviando a mensagem de solicitação e aguardando a resposta.

Um serviço consiste em um agente que responde apenas quando há uma solicitação e um cliente de serviço que pode enviar solicitações e receber respostas. Ao contrário do tópico, os serviços são comunicações de mensagem única, quando a solicitação e a resposta do serviço forem concluídas, a conexão entre os nós será desconectada. Onde o cliente solicita ao servidor a hora atual, o servidor verificará a hora e responderá, após responder a conexão será encerrada (QUIGLEY; GERKEY; SMART, 2015).

Figura 30 – Comunicação por serviço.



Fonte: adaptado de (YOONSEOK PYO, HANCHEOL CHO, LEON JUNG, 2017).

Essa revisão bibliográfica é fundamental para embasar o desenvolvimento deste trabalho, fornecendo o conhecimento necessário sobre os princípios e as técnicas relacionadas ao modelo proposto.

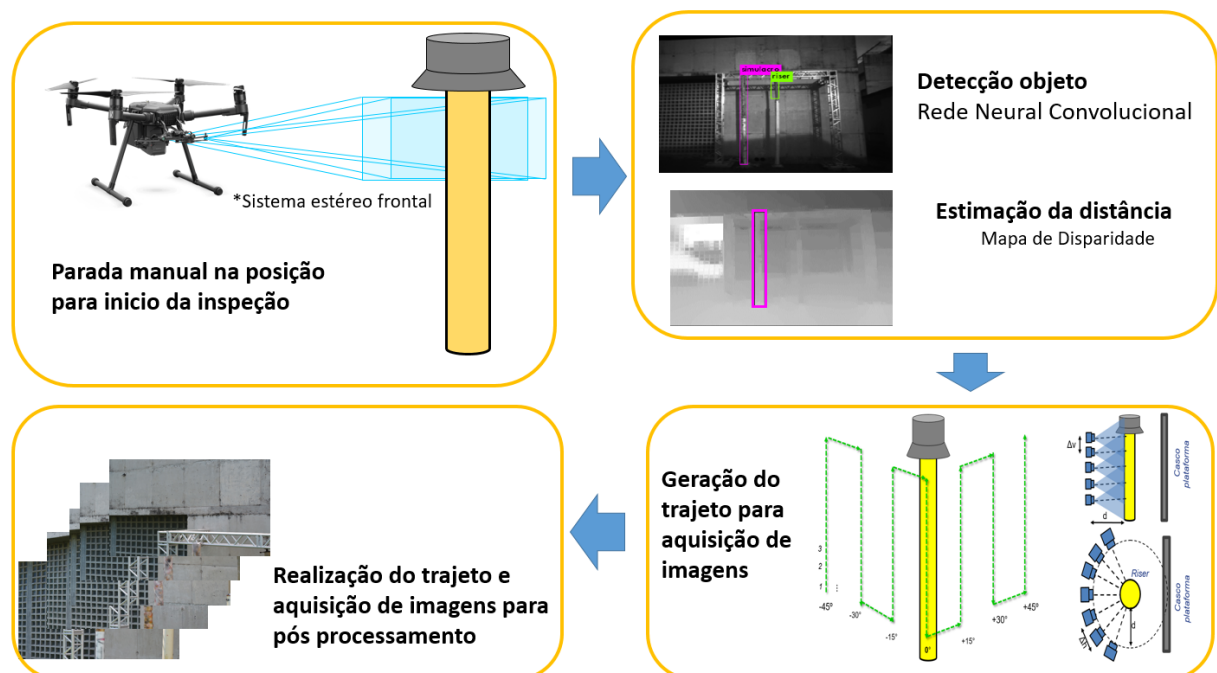
### 3 MODELO PROPOSTO

Neste capítulo será apresentado o modelo proposto para automatização do voo de inspeção de dutos com suas características de funcionamento.

#### 3.1 AUTOMATIZAÇÃO DE VOO DE INSPEÇÃO

O objetivo deste trabalho é realizar uma automatização do voo de RPAS para inspeção tridimensional de dutos de extração de petróleo em alto mar. Através deste objetivo foi proposto o desenvolvimento de um sistema de controle em alto nível para tomada de decisão e realização da trajetória previamente estabelecida utilizando um computador embarcado à aeronave e realizando a comunicação entre sensores e periféricos através do ROS. A utilização do ROS deve-se ao prévio conhecimento do autor para realizar toda a interligação de diferentes pacotes existentes para a construção deste trabalho. A Figura 31 ilustra funcionamento do controle proposto, onde ao ir manualmente ao ponto inicial do trajeto, computador de bordo irá processar as imagens do sistema estéreo nativo do drone, identificando o objeto e estimando sua distância para enfim gerar o trajeto de inspeção. Após gerar o trajeto de inspeção o controle deve realizá-lo e adquirir as imagens para o pós-processamento delas.

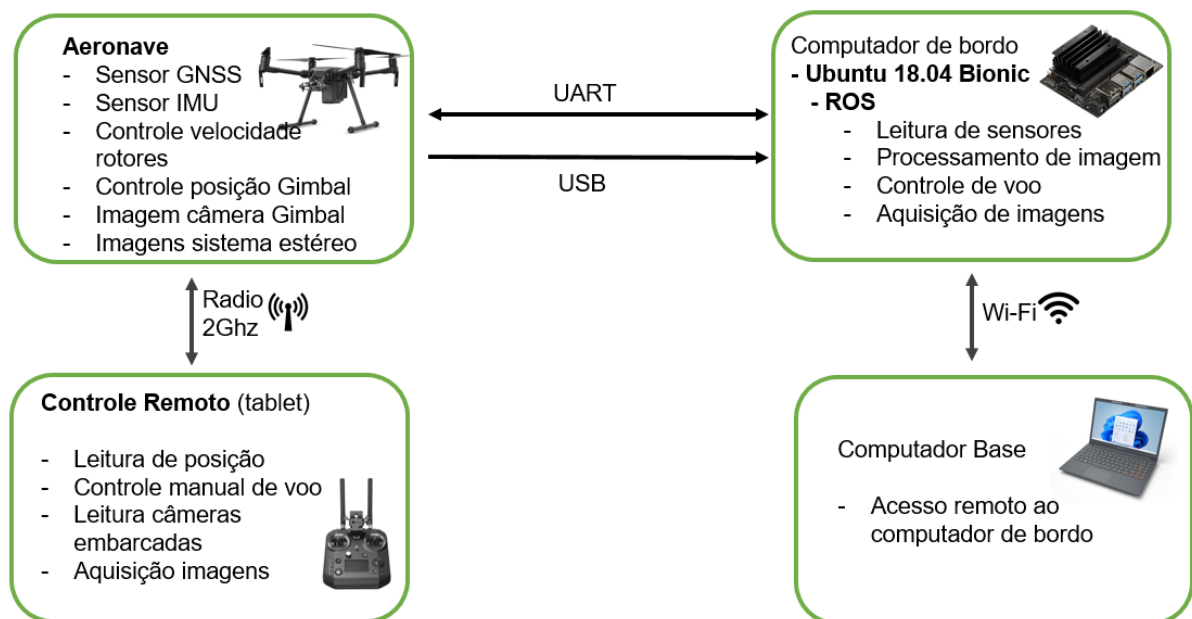
Figura 31 – Proposta de funcionamento do sistema automático de inspeção tridimensional de dutos em plataformas *offshore*.



Fonte: Autor.

Para que o objetivo seja realizado, é necessário adicionar um computador embarcado à aeronave para leitura dos sensores, processamento dos dados e comandar a movimentação do drone e aquisição de imagens de alta resolução. Este computador de bordo irá comunicar com a aeronave através da comunicação UART e um cabo USB para transferência de dados como imagens. O computador de bordo irá realizar todo o controle e por sua vez, será acessado por um computador base através de uma conexão Wi-fi. Além do controle realizado pelo computador de bordo, há um controle na mão do piloto, comunicando através de rádio frequência com o RPA, para intervenções manuais e refinamento do posicionamento para inicializar o controle de voo. A Figura 32 apresenta as tarefas de cada hardware e como é feita a comunicação entre eles.

Figura 32 – Comunicação entre hardwares do sistema proposto.



Fonte: Autor.

A Figura 33 apresenta o fluxograma do processo de inspeção automática proposta. Para iniciar o controle do voo de inspeção, a aeronave é posicionada manualmente ortogonalmente ao duto a ser inspecionado, através de sensores GNSS para obter informações de localização precisa. Em seguida, ao solicitar ao sistema de controle que realize a inspeção, é estimada a distância entre o duto e a aeronave por meio de técnicas de processamento de imagem, que incluem a detecção de objetos e a geração de um mapa de disparidade para estimar essa distância.

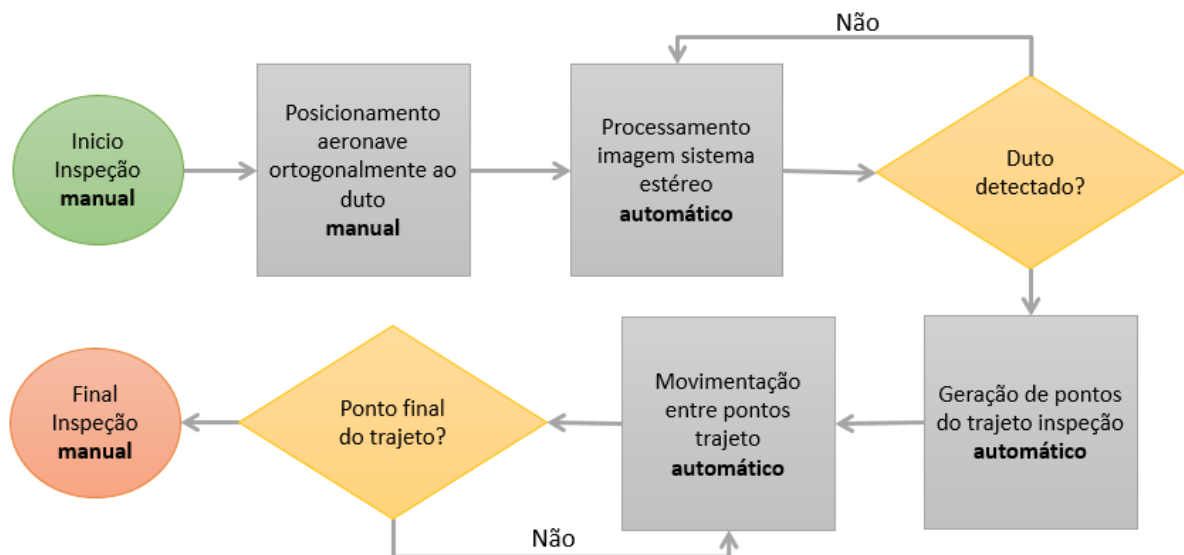
Com base na distância estimada, são calculados os pontos que comporão a trajetória pré-estabelecida para a inspeção. Esses pontos são definidos de forma a

cobrir a região de interesse do duto, permitindo a captura de imagens adequadas para a reconstrução tridimensional.

Uma vez calculada a sequência de pontos da trajetória, o sistema implementado no ROS assume o controle da aeronave e realiza sua movimentação, utilizando a fusão de dados dos sensores GNSS e IMU para estimar e controlar a posição da aeronave durante o voo de inspeção.

Essa abordagem integrada de medição, processamento de imagem e controle autônomo permite que o sistema execute de forma automatizada a inspeção dos dutos de extração offshore, minimizando a exposição humana a riscos e obtendo resultados mais precisos e confiáveis.

Figura 33 – Fluxograma do processo de inspeção tridimensional de dutos automático.



Fonte: Autor.

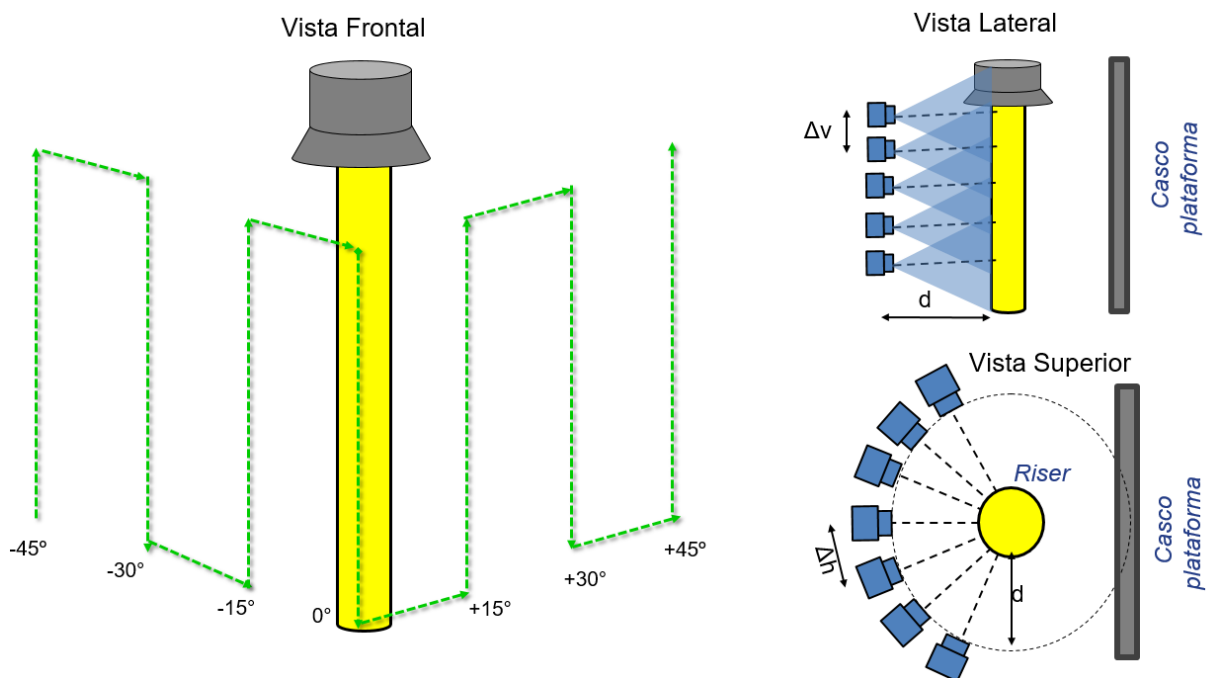
### 3.2 TRAJETO DE INSPEÇÃO

A inspeção de dutos em plataformas *offshore* utilizando RPAS requer que a aeronave realize um determinado trajeto, semelhante ao trajeto de mapeamento de terreno, porém verticalmente. Em (BUSCHINELLI et al., 2020b) foi realizado um comparativo entre diferentes técnicas de inspeção de dutos, concluindo a necessidade de uma variação de altura do RPA assim como uma mudança do ponto de vista horizontal, mantendo certos parâmetros da câmera fixos como distância de inspeção, resolução espacial e sobreposição. Assim, o trajeto semicircular serpentina vertical descrito no artigo, abrange as necessidades de sobreposição de imagem, resolução

espacial e triangulação de pontos para convergência da geometria para uma boa reconstrução.

O trajeto proposto, apresentado na Figura 34, realiza em passos horizontais definidos ( $\Delta h$ ) em ângulos com uma distância do objeto ( $d$ ) fixa. Ao visualizar o trajeto da vista superior, assemelha-se à superfície de um cilindro de raio ( $d$ ) concêntrico ao riser a ser inspecionado. Deste modo é possível manter a distância entre câmera e objeto constantes, fixando a resolução espacial (*pixel/mm*), dentro de um nível de detalhe exigido. Esta variação horizontal parcial sobre a superfície deste cilindro também auxilia na convergência geométrica ao realizar a triangulação de pontos, tendo em vista que não é possível inspecionar toda região dos risers devido à distância deles ao casco da plataforma. As distâncias verticais ( $\Delta v$ ) de cada trecho são definidas com base na sobreposição desejada das imagens.

Figura 34 – Trajeto semicircular para inspeção de risers em plataformas *offshore*.



Fonte: Autor.

### 3.3 CONTROLE DE VOO AUTOMÁTICO

A técnica de controle de posicionamento proposto neste trabalho utiliza de pontos relativos em relação à posição atual da aeronave para realização da movimentação desejada. O sistema deve identificar a posição do duto pelo processamento de imagem, gerar o trajeto de inspeção em relação à posição atual para efetuar o controle de voo para esta lista de pontos de inspeção. A comunicação

entre sensores, processamento de dados e tomada de decisão foi projetado para utilização do ROS.

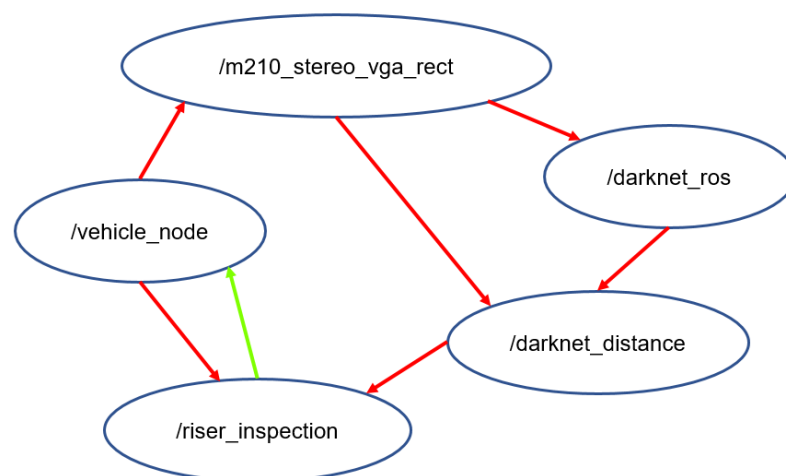
### 3.3.1 Comunicação ROS

Através do pacote disponibilizados pela empresa DJI, *djiosdk\_ros* (DJI, 2018), é aberto um *nodo*, **/vehicle\_node**, pelo ROS e realizado a comunicação com sensores e periféricos embarcados à aeronave para realizar o controle de voo e aquisição de imagens. O processamento do sistema estéreo, detecção de objetos, e estimação da distância é realizado através de três *nodos* **/m210\_stereo\_vga\_rect**: utilizado para retificação e geração do mapa de disparidade; **/darknet\_ros**: através da CNN YOLO v3 é realizado a detecção de objetos (BJELONIC, 2018); **/darknet\_distance**: realizando a transformação de imagens e estimação da distância do objeto pelo mapa de disparidade.

O controle de voo desenvolvido pelo projeto utiliza dos *nodos* descritos anteriormente para processar dados e tomar decisão em um quinto *nodo* denominado **/riser\_inspection**, conforme Figura 35.

Para estes pontos relativos serem criados, foi construído um algoritmo de geração de trajetória integrado à um *nodo* em ROS para o controle de voo chamado *riser\_inspection*. As seções seguintes têm como propósito a explanação de funcionamento deste algoritmo e como foi realizado a integração entre diferentes pacotes ROS utilizados.

Figura 35 – Diagrama de *nodos* do ROS para realização do trabalho proposto, em vermelho a troca de informação por tópicos e em verde a requisição de serviço.



Fonte: Autor.

### 3.3.2 Geração de trajetória

A geração de trajetória semicircular foi desenvolvida para atender as necessidades do sistema desenvolvido em ROS. O modelo utiliza de parâmetros de entrada para a geração, descritos na Tabela 2, e a partir destes dados é gerado uma lista de *waypoints* a serem realizados.

Tabela 2 - Parâmetros de entrada para algoritmo de geração de trajetória.

<b>Parâmetros</b>	<b>Descrição</b>
<b><i>dist</i></b>	Distância entre riser e aeronave (valor definido através dos mapas de disparidade)
<b><i>nh</i></b>	número de paradas horizontais (definido em experimentos utilização de cinco)
<b><i>nv</i></b>	número de paradas verticais (distância entre imagens para sobreposição desejada da região de interesse)
<b><i>delta_v</i></b>	variação entre pontos horizontais (definido em simulação uso de 15°)
<b><i>delta_h</i></b>	variação entre pontos verticais (definido através de parâmetros intrínsecos da câmera)
<b><i>pos_gps</i></b>	Posição atual da aeronave (latitude, longitude, altitude, ângulo em relação ao norte)

Fonte: Autor.

Com base nas informações de entrada o algoritmo irá gerar um número  $nh * nv$  de *waypoints* com as distâncias verticais estabelecidas em *delta\_v* para sobreposição de 80% de imagens com base nas configurações de câmera e o raio da superfície cilíndrica do trajeto é definido em *dist*.

Inicialmente os pontos são gerados em coordenadas polares para incorporar aos valores de  $[x, y]$  a orientação que a aeronave está e removido os valores de  $[x_{ref}, y_{ref}]$  na posição inicial que a aeronave está. O ângulo utilizado para cada valor de *waypoint* é referente a posição inicial da aeronave mais a variação horizontal, *delta\_h*, do trajeto. Estes valores de  $[x_{wp}, y_{wp}]$  são adicionados à uma lista representando os pontos sequenciais das fotos.

$$x_{ref} = dist * \cos(DEG_2RAD(RPA_{yaw})) \quad (19)$$



$$y_{ref} = dist * \text{sen}(DEG_2RAD(RPA_{yaw})) \quad (20)$$

$$angulo = RPA_{yaw} + delta_h \quad (21)$$

$$x_{wp} = dist * \cos(DEG_2RAD(angulo)) - x_{ref} \quad (22)$$

$$y_{wp} = dist * \cos(DEG_2RAD(angulo)) - y_{ref} \quad (23)$$

O sistema de controle desenvolvido em ROS utiliza de pontos cartesianos incrementais, sendo somente a variação de deslocamento necessário entre *waypoints* que deve ser enviado para *serviço* desenvolvido para controle de voo. As equações subsequentes descrevem como é calculado estes pontos cartesianos para realizar o trajeto semicircular.

$$dx_{wp} = x_{wp}[n - 1] - x_{wp}[n] \quad (24)$$

$$dy_{wp} = y_{wp}[n - 1] - y_{wp}[n] \quad (25)$$

$$z_0 = delta_v \quad (26)$$

O algoritmo gera, baseado na orientação atual da aeronave, os pontos de inspeção em coordenadas cartesianas e estes pontos são transformados em posições GNSS através das transformações descritas nas equações abaixo. Ao utilizar os valores atuais de posição do RPAS, *pos\_gps*, resultamos em valores cartesianos representando a posição inicial  $[x_0, y_0, z_0]$  e somado às posições cartesianas da lista gerada.

$$x_0 = R * \cos(lat_0) * \cos(lon_0) \quad (27)$$

$$y_0 = R * \cos(lat_0) * \text{sen}(lon_0) \quad (28)$$

$$z_0 = R * \text{sen}(lon_0) \quad (29)$$

Onde  $R$  é o raio aproximado da terra, 6371 km, utilizado nos cálculos.

A utilização da posição inicial é utilizada para transformação de cartesiano para GNSS somente para exportação dos *waypoints* para utilização de softwares comerciais é realizada pelas seguintes equações:

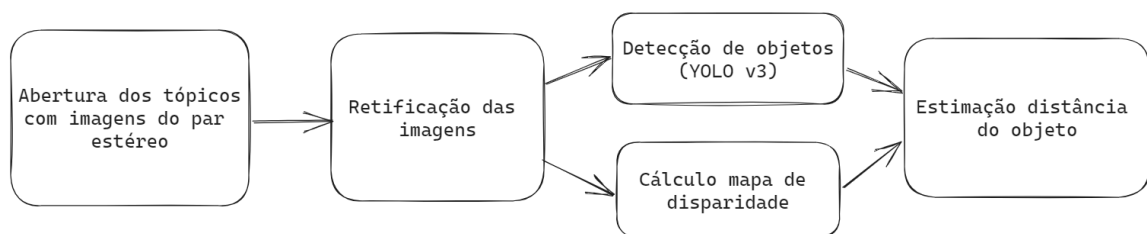
$$lat_{wp} = RAD_2DEG \left( \frac{y_{wp} + y_0}{R} \right) \quad (30)$$

$$lon_{wp} = RAD_2DEG \left( \frac{x_{wp} + x_0}{R * \cos(lon_0[rad])} \right) \quad (31)$$

### 3.3.3 Processamento de Imagem

O processamento de imagem para detecção de objeto e estimação da sua distância é realizado em duas grandes etapas, estimação da distância através de mapas de disparidade e detecção objetos pela CNN YOLO v3 utilizada. A metodologia aplicada a cada uma destas técnicas está descrita nos seguintes subtópicos. O fluxo de processamento de imagem pode ser compreendido na Figura 36, onde inicialmente é disponibilizado um tópico ROS fornecendo imagens do sistema estéreo numa frequência de 15 Hz, realizado uma retificação das imagens com os parâmetros de calibração, processado pela CNN treinada e, em paralelo, gerado o mapa de disparidade do sistema retificado. Através da intensidade dos pixels localizados no espaço delimitado pelo objeto detectado é estimado sua distância.

Figura 36 – Fluxo de processamento para detecção e estimação da distância do objeto.



Fonte: Autor.

Os conceitos apresentados neste capítulo servem como base para a compreensão das etapas seguintes, em que abordaremos os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do sistema proposto. No próximo capítulo, detalharemos os equipamentos e softwares empregados, além de descrevermos a metodologia adotada para o desenvolvimento da aplicação.

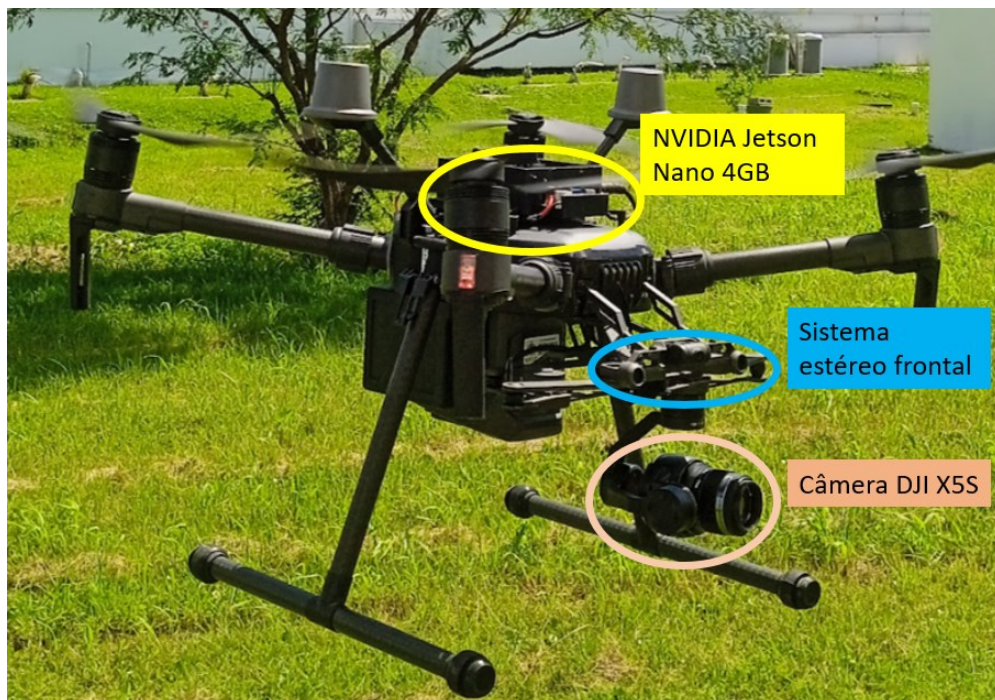
## 4 MATERIAS E MÉTODOS

Neste capítulo será descrito os materiais e métodos para desenvolvimento da proposta de automatização do voo de inspeção tridimensional de *risers*.

### 4.1 AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA – RPA

A aeronave escolhida para realização deste projeto foi DJI Matrice 210 V2 RTK (DJI, 2019a) adquirida pelo projeto de pesquisa VANT3D em 2018, ano que inicializou a parceria entre universidade e Petrobrás. Este RPA é projetado e comercializado para utilização em inspeções industriais, possuindo grande robustez na controlabilidade de voo, além de possuir sistemas de visão estéreo frontal e inferior para detecção e desvio de obstáculos em seu caminho.

Figura 37 – Aeronave Matrice 200 V2 RTK com câmera X5S acoplada e embarcado com computador de bordo Jetson Nano



Fonte: Autor.

#### 4.1.1 Sistema estéreo frontal

Para detecção e estimação da distância do duto a ser inspecionado será utilizado o sistema estéreo frontal disposto na aeronave M210 V2, Figura 38. Esta aeronave dispõe de um par de câmeras, com imagens em escala de cinza, e resoluções de 480x640 pixels, além de comprimento focal fixo desconhecido. Este sistema é utilizado para evitar colisões frontais a partir do cálculo do mapa de

disparidade, bloqueando a movimentação frontal da aeronave caso o sistema identifique algum objeto com distâncias mínimas de 3 metros (DJI, 2019a).

Figura 38 – Aeronave DJI Matrice 210 V2 RTK, em destaque o sistema de visão estéreo frontal para detecção e desvio de objetos.



Fonte: Autor.

#### 4.1.2 Câmera gimbal DJI X5S

Para a inspeção tridimensional de dutos é necessário que RPA possua uma câmera de alta resolução embarcada para aquisição das imagens no trajeto de inspeção e posteriormente realizar a reconstrução fotogramétrica. O projeto VANT3D dispõe da câmera DJI Zenmuse X5S, desenvolvida para ser utilizada como *payload* da aeronave M210 V2 para inspeções industriais. A Tabela 3 contém as especificações técnicas da câmera e a lente utilizada.

Tabela 3 – Especificações técnicas câmera disponíveis Projeto VANT3D.

<b>Parâmetros</b>	<b>DJI Zenmuse X5S</b>
<b>Dimensão</b>	140x98x132 mm (461 g)
<b>Lente</b>	Olympus M.Zuiko 45 mm/1.8
<b>Sensor</b>	CMOS 4/3"
<b>Dimensão do pixel</b>	3,28 $\mu$ m
<b>Resolução</b>	(4:3) 5280 x 3956 pixels
<b>Shutter</b>	1/1000 s (Rolling shutter)
<b>Mecanismo gimbal</b>	Tilt: [+40, -130] <sup>o</sup> ; Pan: $\pm$ 320 <sup>o</sup> ; Roll: $\pm$ 20 <sup>o</sup>

Fonte:(DJI, 2023).

Com base nas características técnicas da câmera foi determinado os parâmetros de resolução espacial e passo vertical para sobreposição entre imagens desejada. A Tabela 4 apresenta estes parâmetros para três distâncias de com a câmera Zenmuse DJI X5S utilizando uma lente de 45 mm de comprimento focal.

Tabela 4 – Parâmetros para a inspeção fotogramétrica para diferentes distâncias.

<i>Descrição</i>	<i>Valor</i>		
<b><i>Distância</i></b>	6 metros	8 metros	10 metros
<b><i>Resolução espacial</i></b>	0,44 mm/pixel	0,58 mm/pixel	0,73 mm/pixel
<b><i>Sobreposição imagens</i></b>	80%	80%	80%
<b><i>Passo vertical</i></b>	0,35 m	0,46 m	0,58 m

Fonte: Autor.

#### 4.1.3 Kit da DJI de Desenvolvimento de Software

O Kit de Desenvolvimento de Software, *Software Development Kit (SDK)*, é uma coleção de ferramentas e recursos de desenvolvimento de software fornecidos pela DJI. O SDK permite que os desenvolvedores criem aplicativos que podem interagir com produtos DJI, incluindo drones, gimbal, câmeras e outros acessórios.

O DJI SDK fornece um conjunto de ferramentas para desenvolvedores que desejam criar aplicativos que interajam com os produtos DJI, oferecendo suporte a várias linguagens de programação, incluindo Java, Python, Swift e C++. O SDK também inclui um conjunto de ferramentas de desenvolvimento, incluindo acesso a uma ampla variedade de recursos e funcionalidades, como: controle de voo, controle de câmera, dados de telemetria (DJI, 2019b).

Além da funcionalidade para diferentes linguagens de programação e sistemas operacionais, o SDK disponibiliza uma integração com o ROS para versões até ROS Melodic Morenia construído para Ubuntu Bionic 18.04 (ROS.ORG, 2018).

#### 4.2 COMPUTADOR DE BORDO

O computador de bordo definido para utilização no trabalho foi o kit de desenvolvimento NVIDIA Jetson Nano 4GB (NVIDIA, 2021). Além do alto desempenho e baixo peso para embarcar à aeronave, a NVIDIA fornece suporte técnico para resolução de problemas de integração.

Figura 39 ilustra o computador embarcado à aeronave montado em uma caixa projetada e manufaturada para tal funcionalidade.

Figura 39 – Montagem NVIDIA Jetson Nano 4GB sobre aeronave M210 V2 destacado em vermelho.



(a) Vista superior.



(b) Vista perspectiva isométrica.

Fonte: Autor.

Os kit de desenvolvimento da NVIDIA possuem um pacote de sistema operacional, JetPack SDK (NVIDIA, 2023), fornecido pela NVIDIA com o sistema operacional Linux Ubuntu, e os softwares necessários para integração dos hardwares no computador, juntamente com as bibliotecas de desenvolvimento para inteligência artificial e processamento de imagens. Tabela 5 apresenta as configurações de hardware do computador de bordo.

Tabela 5 – Especificações técnicas do computador Jetson Nano 4 GB.

**Especificações Técnicas**

<b>GPU</b>	GPU de arquitetura NVIDIA Maxwell™ de 128 núcleos
<b>CPU</b>	Processador Quad-Core ARM® Cortex®-A57 MPCore
<b>Memória</b>	LPDDR4 de 4GB e 64 bits
<b>Armazenamento</b>	microSD
<b>Redes</b>	Gigabit Ethernet, M.2 de chave E
<b>Câmera</b>	2x conectores de câmera de 15 pinos e 2 camadas MIPI CSI-2
<b>Monitor</b>	1x HDMI 2.0, 1x DP 1.2
<b>USB</b>	4x conectores USB 3.0 Tipo A 1x conector Micro-B USB 2.0
<b>Dimensões</b>	100mm x 79mm x 30,21mm

Fonte: (NVIDIA, 2021).

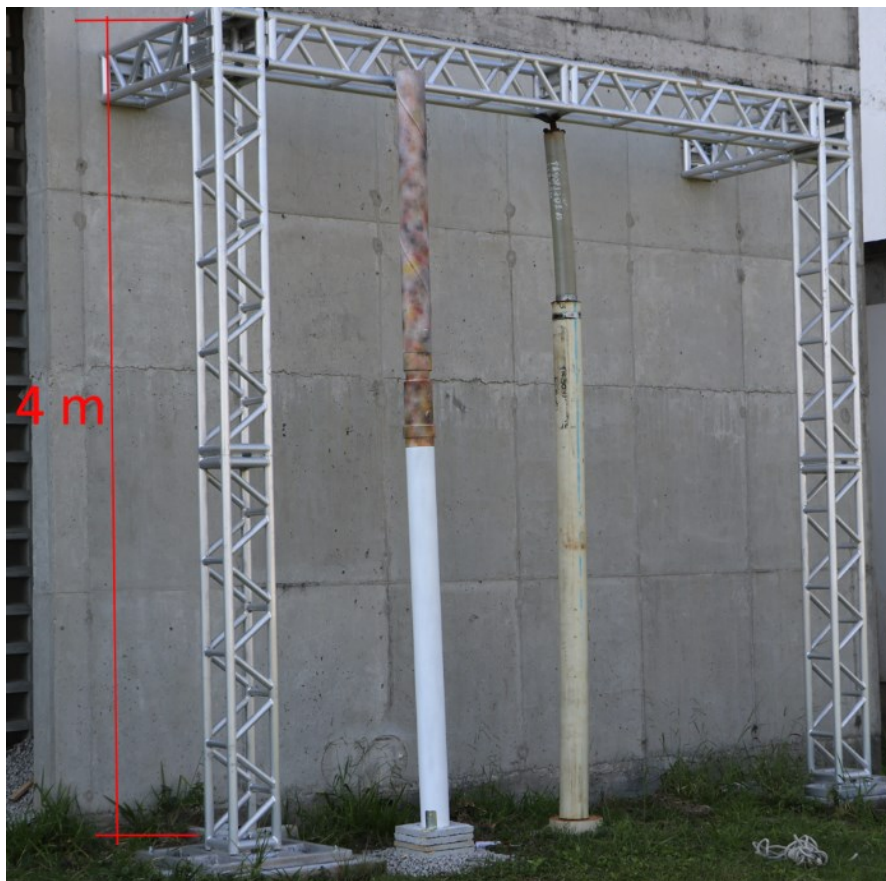


### 4.3 BANCADA DE TESTES

Para avaliação das incertezas do sistema de medição proposto, o projeto VANT3D construiu uma bancada de testes em uma área externa das dependências do galpão de inovação do Centro de Inovação, Pesquisa, Empreendedorismo e Tecnologia da Universidade Federal de Santa Catarina - InPETU Hub – localizado no bairro Cachoeira do Bom Jesus em Florianópolis - SC.

Esta bancada de testes, Figura 40, foi projetada para realizar experimentos relacionados à pesquisa e avaliação de diferentes métodos de inspeção tridimensional de dutos na extração de P&G *offshore*. Ela é formada por uma estrutura de sustentação para fixação de um simulacro de *riser* com defeitos sintéticos utilizado para avaliação do método de inspeção, além de conter um trecho de *riser* real instalado para testes para simulação da inspeção.

Figura 40 – Bancada de testes localizada nas dependências do InPETU hub.

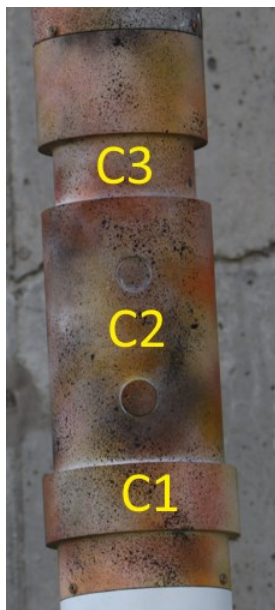


Fonte: Autor.

A bancada de testes possui uma altura total de 4 metros, entretanto a região de interesse para inspeção do simulacro é definida por duas seções de dutos com defeitos sintéticos totalizando 2 metros. A primeira seção do simulacro foi projetada

para avaliação na medição de diâmetro, contendo três segmentos de diferentes diâmetros (C1, C2, C3) e dois defeitos de profundidade, apresentado na Figura 41a. A segunda seção possui um defeito típico encontrado em inspeções periódicas, simulando o rompimento de uma das fitas da camada de armadura reproduzindo uma protuberância helicoidal ao longo do trecho para avaliação de superfície, Figura 41b. Além dos defeitos para análise, foi criada uma textura favorável para inspeções fotogramétricas, tornando-a mais heterogênea.

Figura 41 – Seções projetadas do simulacro de *riser* para bancada de testes.



(a) Trecho de variação de diâmetros.



(b) Trecho defeito helicoidal.

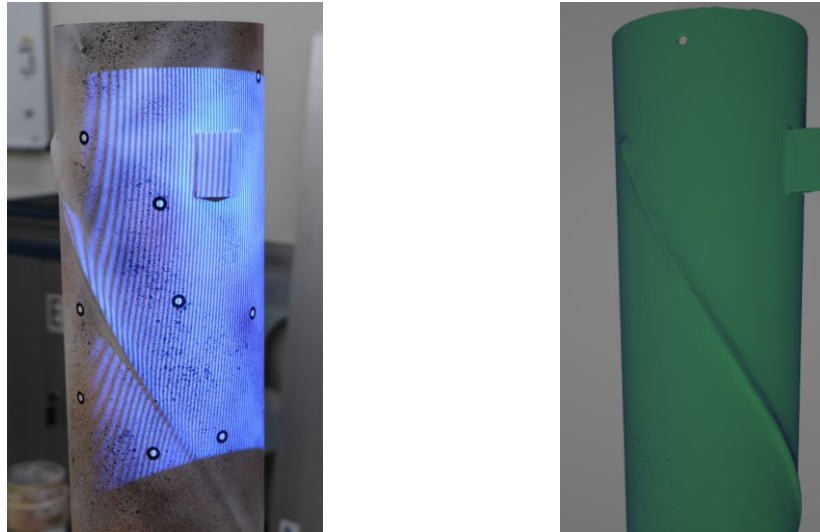
Fonte: Autor.

#### 4.3.1 Calibração simulacro

Com objetivo de avaliar o sistema de medição de *riser* utilizando RPA, ambas partes do simulacro foram calibradas em laboratório individualmente com o auxílio do sistema de medição óptico GOM Atos Scan Box (GOM, 2022). A reconstrução gerada pela medição em laboratório, exemplificada nas Figuras Figura 42 e Figura 43, foi utilizada como *Ground Truth* para análise do erro na reconstrução efetuando a inspeção por RPA. A incerteza de medição do sistema GOM Atos Scan Box é considerada desprezível (da ordem de centésimos de mm) se comparada à incerteza de medição da reconstrução fotogramétrica avaliada.



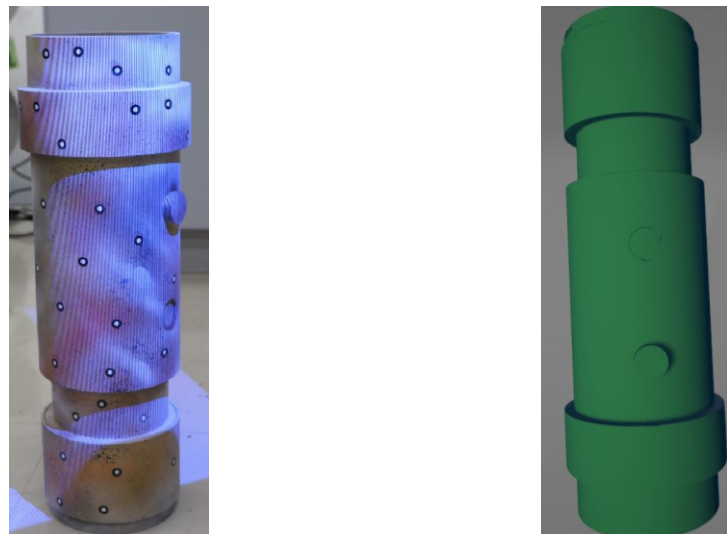
Figura 42 – Reconstrução tridimensional para GT do simulacro da seção helicoidal.



(a) Procedimento de reconstrução. (b) Resultado reconstrução.

Fonte: Autor.

Figura 43 - Reconstrução tridimensional para GT do simulacro da seção defeitos diâmetro.



(a) Procedimento de reconstrução. (b) Resultado reconstrução.

Fonte: Autor.

#### 4.4 RECONSTRUÇÃO E ANÁLISE FOTOGRAMÉTRICA

A reconstrução e análise fotogramétrica do trabalho é realizada após a coleta de dados referente a inspeção dos dutos dentro do trajeto pré-estabelecido e mantendo sobreposição das imagens da câmera acoplada ao RPA idealmente em torno de 80%. O processamento e análise é dividido em duas grandes partes: reconstrução da cena, através do software Agisoft Metashape 2.0 (AGISOFT, 2023);

avaliação da nuvem de pontos da reconstrução pelo software GOM Inspect (GOM, 2023).

#### **4.4.1 Agisoft Metashape**

Agisoft Metashape, versão 2.0.1, é um software de fotogrametria que permite aos usuários criar modelos 3D, ortomosaicos e modelos digitais de elevação a partir de um conjunto de fotografias 2D. A fotogrametria é a ciência de medir e interpretar características do ambiente por meio do uso de fotografias, e o Metashape é uma ferramenta que automatiza grande parte desse processo (AGISOFT, 2021).

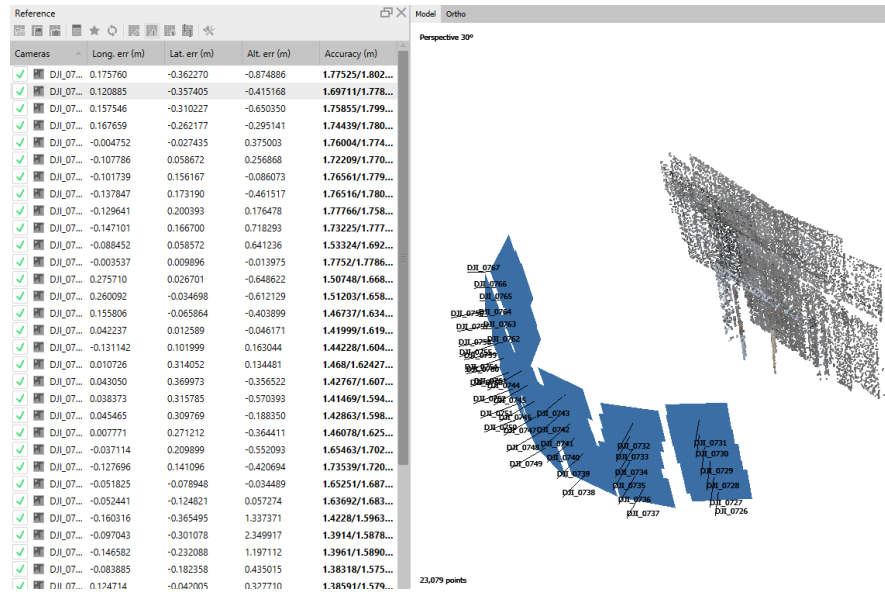
O Metashape usa uma técnica chamada estrutura de movimento, que envolve a detecção de recursos comuns em várias fotografias e o uso desses recursos para calcular a posição e a orientação da câmera em cada local da foto. O software usa essas informações para criar uma nuvem de pontos 3D, que pode ser usada para gerar um modelo 3D.

##### *Reconstrução da cena*

Para reconstrução da cena com escala, é necessário que seja conhecida a posição e orientação da câmera no instante que a foto é realizada através da posição GNSS proveniente do RPAS, ou através de escalas fotogramétricas introduzidas na cena. Neste trabalho foi utilizado a posição da aeronave registrada em cada imagem. Com o auxílio dos dados de posição e variância salvos automaticamente na imagem no momento da aquisição é realizado o alinhamento das imagens pelo processo fotogramétrico, como ilustra a Figura 44. O software identifica pontos homólogos entre imagens e dentro da variância de posição ajusta as imagens para um melhor alinhamento. O Alinhamento é realizado na resolução original das imagens.

Anteriormente ao alinhamento das imagens, é definida uma compensação de *rolling shutter*, esta definição permite que exista uma movimentação de translação em X e Y dos pixels. A opção de correção foi habilitada recentemente na versão 2.0.1 *Professional* (AGISOFT, 2021). Esta compensação mostra-se com bons resultados ao utilizar as câmeras industriais disponíveis no projeto.

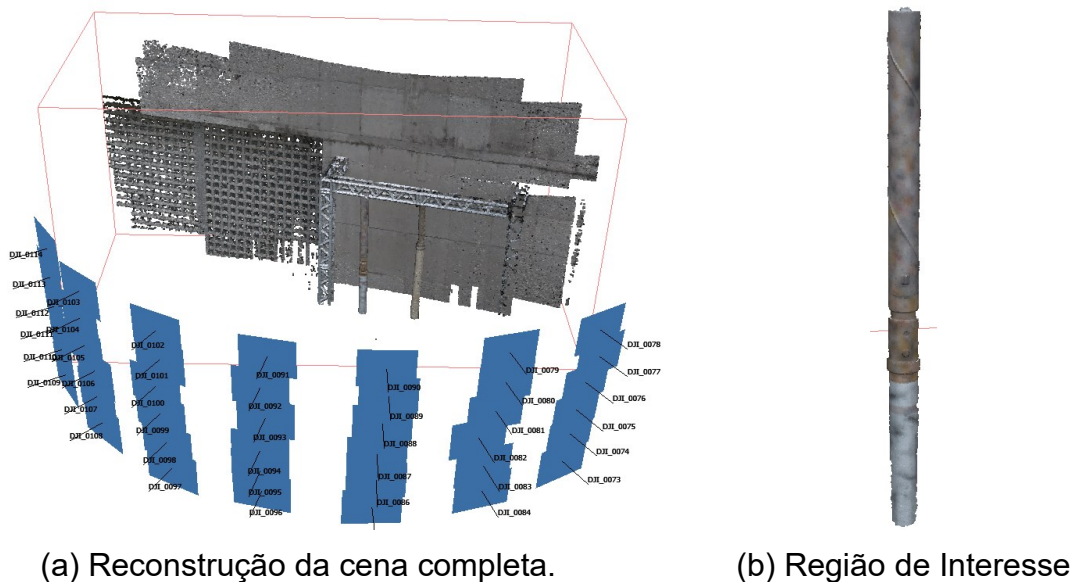
Figura 44 – Referências de posição de cada imagem e alinhamento das imagens para inicialização do processamento.



Fonte: Autor.

Após marcar a compensação de *rolling shutter* e realizar o alinhamento de imagens, o software está apto a reconstruir a cena com uma nuvem de pontos mais densa, Figura 45a, onde será extraído a região de interesse (ROI), Figura 45b, e a nuvem de pontos densa exportada para avaliação no software GOM Inspect.

Figura 45 – Reconstrução de nuvem de pontos densa da cena.



(a) Reconstrução da cena completa.

(b) Região de Interesse

Fonte: Autor.

#### 4.4.2 GOM Inspect

O GOM Inspect, versão 2017, é um software gratuito para análise dimensional, edição de malha e inspeção de nuvens de pontos 3D e dados de malha. É desenvolvido pela GOM, empresa especializada em metrologia e digitalização 3D (GOM, 2023).

O software permite que os usuários importem e analisem dados de escaneamento 3D de várias fontes, incluindo scanners a laser, tomógrafos e scanners de luz estruturada. Ele pode lidar com vários formatos de arquivo, como arquivo texto com nuvem de pontos, STL, PLY e OBJ, e também oferece suporte a muitos formatos CAD.

Um dos principais recursos do GOM Inspect são seus recursos avançados de medição e análise. Ele permite que os usuários realizem medições precisas em nuvens e malhas de pontos 3D, como distâncias, ângulos e volumes. O software também inclui ferramentas para inspeção baseada em ajuste de primitivas como planos e cilindros e comparação com modelos CAD.

#### 4.4.3 Análise da Região de Interesse

Após gerar a nuvem de pontos do duto a ser inspecionado gerado pelo software Metashape deve-se importar no software GOM Inspect conforme formato exportado para análise dimensional da ROI. Para cada seção de diferentes diâmetros é ajustado um cilindro conforme o passo a passo subsequente. O resultado da criação pode ser visualizado na Figura 46.

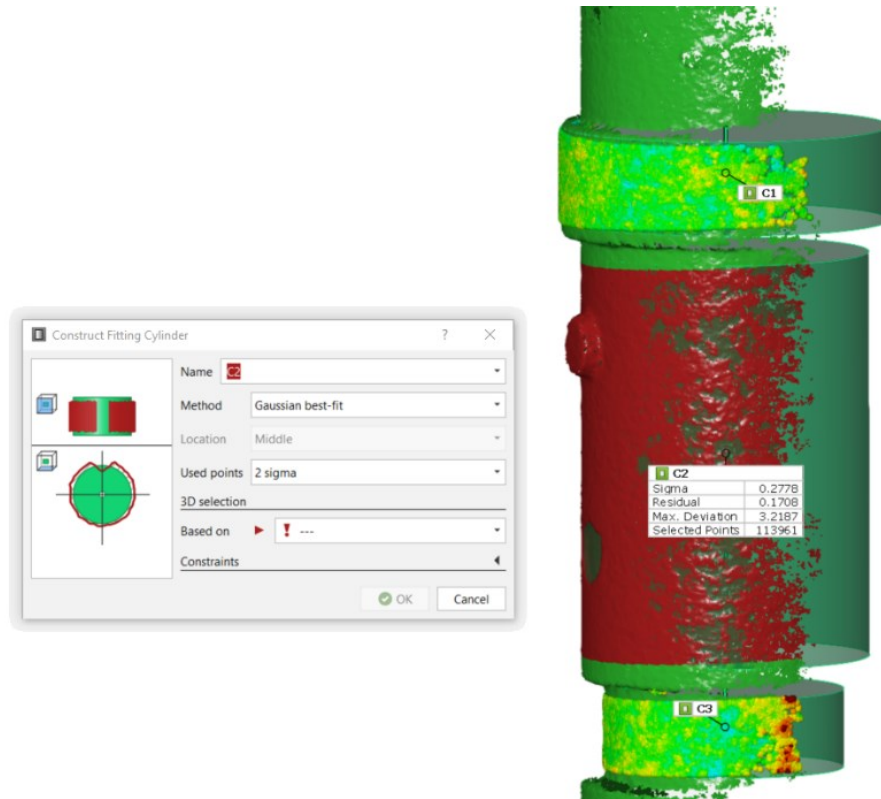
Estes três cilindros criados servem para avaliar o diâmetro resultante da reconstrução e comparar com o valor utilizado como *Ground Truth* da reconstrução realizada em laboratório, seção 4.3.1, de modo a determinar o erro de reconstrução de cada ensaio.

Instruções para análise do diâmetro da ROI na nuvem de pontos importada:

1. Criar um novo projeto no software GOM Inspect;
2. Arquivo – Importar – PointCloud [m];
3. Selecionar todos pontos – Operações – Point Cloud – Computar normais para melhor visualização da nuvem de pontos;
4. Na ROI a ser inspecionada, selecionar pontos de superfície;
5. Construir – Cilindro – *Fitting Cylinder*:
  - a. **Método:** Gaussian Best-fit;

- b. **Pontos usados:** 2 sigmas;
- c. **Baseado em:** pontos selecionados na etapa 4.

Figura 46 – Construção do cilindro apropriado para a nuvem de pontos da ROI utilizando  $2\sigma$ .



Fonte: Autor.

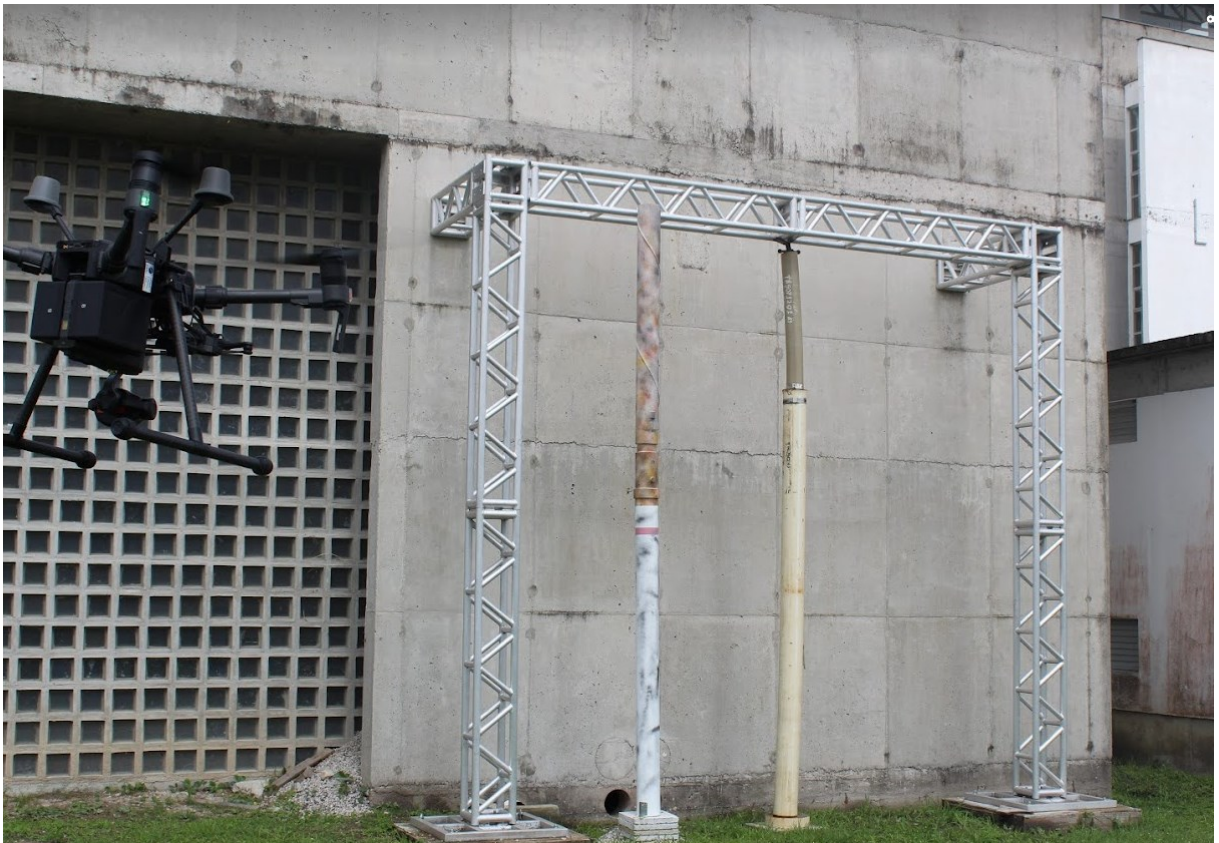
O procedimento é realizado para cada trecho de variação dos cilindros e computado a medição do diâmetro e inserido em uma tabela para posterior avaliação do método de inspeção através do erro de medição em relação ao *Ground Truth* resultante da reconstrução tridimensional das partes do simulacro descrito na seção 4.3.1.

## 5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos em todo o desenvolvimento do projeto proposto. Desde a calibração do sistema estéreo, análise da CNN para detecção, análise do mapa de disparidade para estimação da distância, como resultados de reconstrução fotogramétrica utilizando somente os dados de posição de GNSS, ou com a fusão da posição GNSS e escalas fotogramétricas na cena, além de um comparativo entre inspeção manual e automatizada.

O simulacro utilizado para realizar as medições possui um diâmetro nominal de 150 mm, porém os valores reais não serão expressos por questões de sigilo. Os dados apresentados e analisados estão baseados no erro da medição em relação ao *Ground Truth*.

Figura 47 – Utilização da aeronave M210 V2 para inspeção do simulacro.



Fonte: Autor.

## 5.1 CALIBRAÇÃO SISTEMA ESTÉREO

O sistema estéreo frontal foi calibrado utilizando técnicas descritas na seção 2.5.1, através o processo de calibração disponível no software matlab (MAHTWORKS, 2020). Os parâmetros intrínsecos do sistema estéreo estão descritos na Tabela 6, assim como Figura 48 apresenta a estimação de posição do padrão de calibração em relação ao sistema estéreo. Lembrando que pela baixa resolução o sistema foi calibrado para uma distância média de 1 metro, muito inferior à distância do campo de visão a ser utilizado de 8 metros.

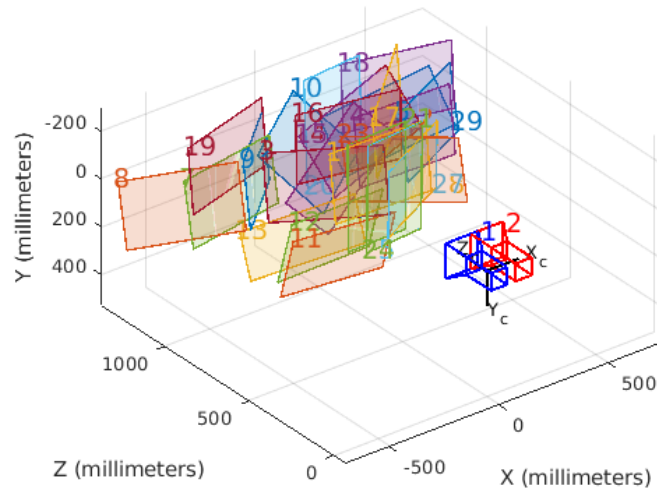
Tabela 6 – Parâmetros de intrínsecos do sistema estéreo frontal.

<b>Parâmetro</b>	<b>Câmera Esquerda</b>	<b>Câmera Direita</b>
<b>Dist. Focal</b>	$f_E = \begin{bmatrix} 456,061 \\ 456,075 \end{bmatrix}$	$f_D = \begin{bmatrix} 459,716 \\ 459,692 \end{bmatrix}$
<b>Centro</b>	$C_E = \begin{bmatrix} 321,135 \\ 234,226 \end{bmatrix}$	$C_D = \begin{bmatrix} 331,481 \\ 236,588 \end{bmatrix}$
<b>Matriz</b>	$K_E = \begin{bmatrix} 456,061 & 0,2474 & 321,135 \\ 0 & 456,075 & 234,226 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$K_D = \begin{bmatrix} 459,716 & -0,0292 & 331,481 \\ 0 & 459,692 & 236,588 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	$k_1 = 0,0501$	$k_1 = 0,0365$
	$k_2 = -0,0553$	$k_2 = 0,0193$
<b>Parâmetros de Distorção</b>	$k_3 = 0,0178$	$k_3 = -0,1027$
	$\zeta_1 = -0,0012$	$\zeta_1 = 0,0016$
	$\zeta_2 = 0,000746$	$\zeta_2 = -0,0026$

Fonte: Autor.

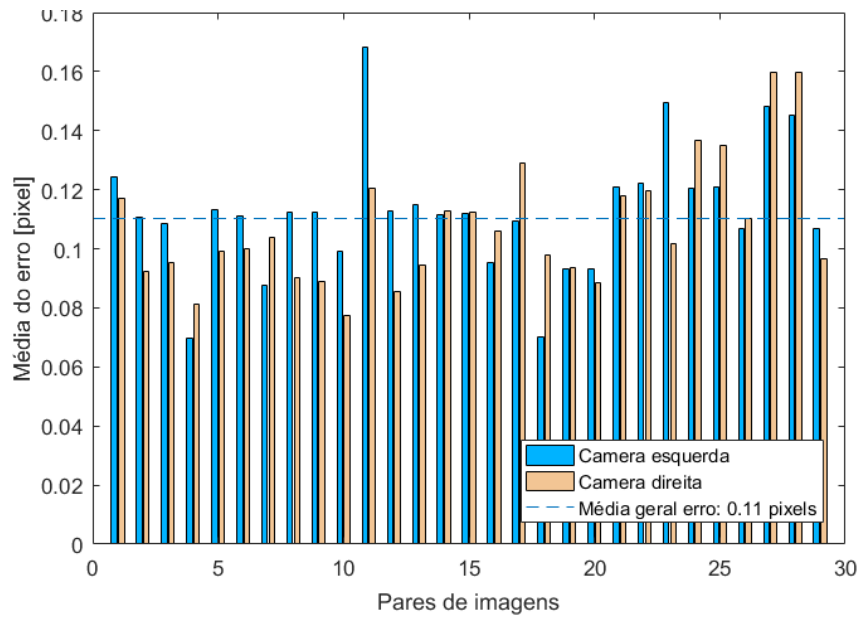


Figura 48 – Posições do padrão após realizada calibração do sistema estéreo.



Fonte: Autor.

Figura 49 – Erro de reprojeção para cada conjunto de imagens da calibração.



Fonte: Autor

Correlacionando as câmeras da direita e esquerda para calibração do sistema estéreo obtemos os vetores de rotação e translação, Tabela 7, do sistema para realizar a reprojeção e retificação do par estéreo.



Tabela 7 – Parâmetros de calibração sistema estéreo frontal M210 V2. Câmera direita em relação a câmera esquerda.

<b>Parâmetro</b>	<b>Calibração sistema estéreo</b>
<b>Rotação</b>	$R_{DE} = \begin{bmatrix} 1 & 0,0048 & 0,0064 \\ -0,0048 & 1 & 0,0016 \\ -0,0054 & -0,0016 & 1 \end{bmatrix}$
<b>Translação</b>	$t_{DE} = \begin{bmatrix} -112,8967 \\ -0,2740 \\ -0,1557 \end{bmatrix}$
<b>Baseline</b>	$B = \ t_{DE}\  = 112,8972 \text{ mm}$
<b>Fundamental</b>	$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -0,0008 \\ 0 & 0 & 0,2445 \\ -0,0012 & -0,248 & 0,7522 \end{bmatrix}$
<b>Essencial</b>	$E = \begin{bmatrix} -0,001 & 0,1552 & -0,2742 \\ 0,5661 & 0,1807 & 112,8953 \\ -0,2645 & -112,8966 & 0,1816 \end{bmatrix}$

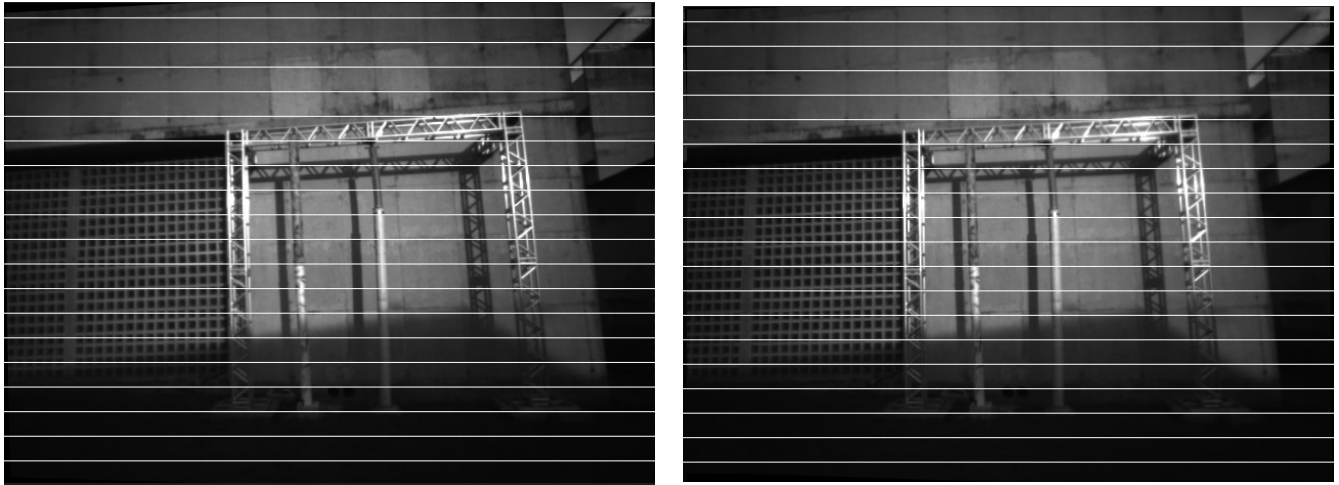
Fonte: Autor.

### 5.1.1 Retificação de imagens

Com objetivo de otimizar e reduzir o esforço de processamento na busca de pontos correspondentes para geração do mapa de disparidade, as imagens provenientes das câmeras do par estéreo foram retificadas com base na calibração realizada anteriormente.

Para retificação, foi desenvolvido um algoritmo de retificação utilizando a biblioteca de processamento de imagem *OpenCV* (INTEL®, 2000), a qual dispõe das funções *stereoRectify* (OPENCV, 2020a) e *initUndistortRectifyMap* (OPENCV, 2020b), onde é realizado através dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos da calibração a matriz de projeção para a nova imagem retificada e a remoção das distorções de lente desta nova imagem. Figura 50 apresenta ambas imagens retificadas e linhas epipolares colineares. Lembrando que este sistema de visão é utilizado apenas para detectar e estimar a distância do duto, apesar do campo de visão ser muito maior que o necessário, não há possibilidades de alterar o comprimento focal das câmeras para um melhor enquadramento do objeto.

Figura 50 – Imagens estéreo retificadas com linhas epipolares colineares.



(a) Imagem retificada câmera esquerda.

(b) Imagem retificada câmera direita.

Fonte: Autor.

## 5.2 MAPA DE DISPARIDADE

Para computar o mapa de disparidade do sistema estéreo, foi utilizado a classe *StereoBM (Block Matching)* (KONOLIGE; OPENCV, 2020) para processar as imagens e gerar em tempo real um mapa de disparidade.

*StereoBM* é um algoritmo de correspondência estéreo implementado no OpenCV, que é usado para encontrar a disparidade entre duas imagens estéreo. Ele segue as etapas básicas do algoritmo de correspondência de blocos, mas com algumas modificações para otimizar o desempenho da correspondência estéreo (KONOLIGE; OPENCV, 2020).

O algoritmo *StereoBM* no OpenCV possui vários parâmetros que podem ser ajustados para melhorar seu desempenho, incluindo o tamanho do bloco, o intervalo de pesquisa e o limite de textura. O tamanho do bloco define o tamanho dos blocos usados para correspondência, enquanto o intervalo de pesquisa determina a disparidade máxima a ser pesquisada. O limite de textura é usado para rejeitar regiões de baixa textura, que são difíceis de corresponder com precisão. A Tabela 8 apresenta uma descrição dos parâmetros disponíveis para ajuste do algoritmo e os valores utilizados para o sistema em questão.

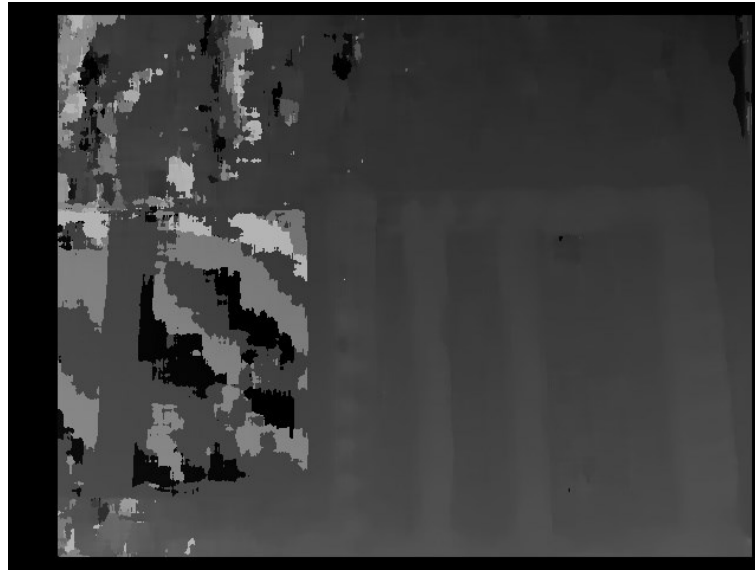
Tabela 8 – Parâmetros de sintonia do algoritmo *StereoBM*.

<b>Item</b>	<b>Valor</b>	<b>Faixa</b>	<b>Descrição</b>
<b><i>blockSize</i></b>	33	[1,100] - ímpares	Define o tamanho da matriz correspondente usado no algoritmo. Tamanhos grandes podem capturar menos detalhes, mas também aumenta o erro de correspondência.
<b><i>numDisparities</i></b>	23	[0,100]	Determina o intervalo de disparidades a ser pesquisado. Um valor maior resulta em um intervalo de pesquisa mais amplo, mas também aumenta o custo computacional.
<b><i>preFilterType</i></b>	1	Verdadeiro ou Falso	especifica o tipo de pré-filtragem aplicada às imagens de entrada antes da correspondência.
<b><i>preFilterSize</i></b>	25	[0,100]	o tamanho do kernel de pré-filtragem. Quanto maior o valor há supressão do ruído, mas também desfoca a imagem.
<b><i>preFilterCap</i></b>	59	[0,100]	o valor máximo dos pixels da imagem pré-filtrada. Valores elevados pode melhorar o contraste, mas também resulta em um custo computacional mais alto.
<b><i>textureThreshold</i></b>	0	[0,100]	Determina o limite mínimo de textura para um pixel ser considerado válido para correspondência. Valores altos resultam em rejeição de regiões de baixa textura, mas podem resultar em correspondências ausentes ou incorretas
<b><i>uniquenessRatio</i></b>	30	[0,100]	Determina a proporção da melhor correspondência para a segunda melhor correspondência. Valores elevados aumenta a confiabilidade, porpem resulta em ausencia de correspondencia

Fonte: adaptado de (KONOLIGE; OPENCV, 2020).

Ao computar o mapa de disparidade com os parâmetros especificados na Tabela 8, obteve-se o resultado apresentado na Figura 51, onde fica evidente a identificação de alguns objetos na imagem, porém com muito ruído devido ao elevado tamanho de janela.

Figura 51 – Mapa de disparidade computado por *StereoBM*.



Fonte: Autor.

Com objetivo a melhorar o mapa de disparidade resultante, foi utilizado uma biblioteca do OpenCV para filtrar mapa de disparidade com base na imagem da câmera da direita, *DisparityWLSFitter*.

*DisparityWLSFilter* é uma classe no OpenCV que representa um filtro WLS (*Weighted Least Squares*) para pós-processamento do mapa de disparidade obtido de algoritmos de correspondência estéreo (*StereoBM*). É usado para reduzir o ruído e melhorar a precisão do mapa de disparidade, incorporando informações adicionais sobre a imagem e o sistema estéreo (OPENCV, 2022b).

O filtro, funciona baseado em duas suposições para o mapa de disparidade a ser usados. São elas: O mapa deve ser suave e contínuo, ou seja, os pixels vizinhos devem ter valores de disparidade semelhantes; deve respeitar a geometria epipolar, ou seja, os pixels correspondentes nas imagens da esquerda e da direita devem ter valores de disparidade semelhantes.

A partir destas suposições, é calculado um peso para cada pixel do mapa de disparidade, que reflete sua confiabilidade com base nas suposições de suavidade e consistência. O peso é então usado para ajustar os valores de disparidade na vizinhança de cada pixel usando uma otimização de mínimos quadrados ponderada.

Figura 52 – Mapa de disparidade filtrado.

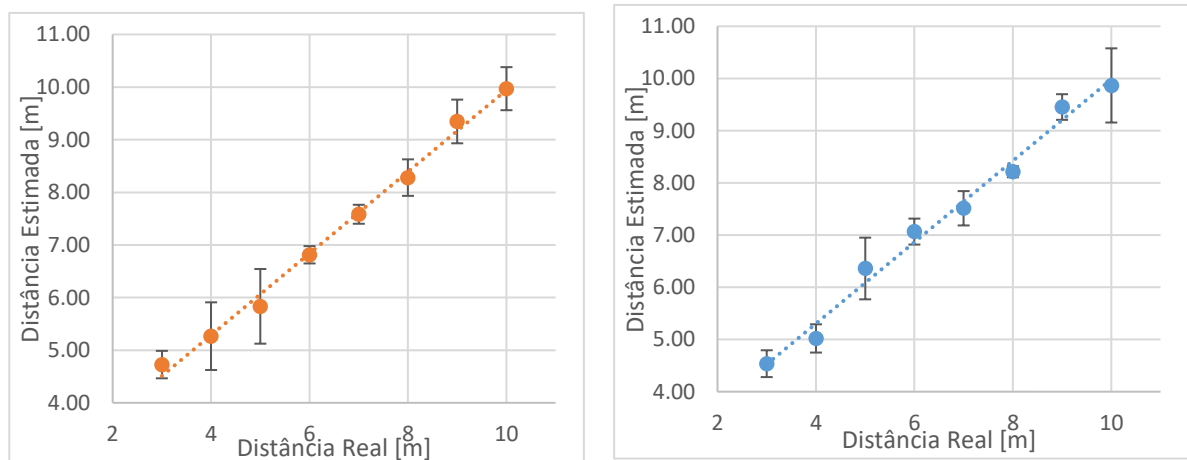


Fonte: Autor.

### 5.2.1 Avaliação do mapa de disparidade

Para melhor compreender o resultado do mapa de disparidade do sistema estéreo frontal, foi realizado um experimento onde a aeronave é posicionada em distâncias conhecidas e adquirido os mapas de disparidades originais e filtrados para identificação da distância medida. Foram realizados 3 ensaios deste experimento e construído um gráfico, Figura 53, comparando a distância real com a distância estimada para ambas abordagens do mapa de disparidade.

Figura 53 – Comparação distância estimada para utilização de mapa de disparidade original ou filtrado.



(a) Mapa de disparidade original.

(b) Mapa de disparidade filtrado.

Fonte: Autor.

Para ambos os mapas de disparidade, existe uma saturação na medição para distâncias inferiores a 6 metros. Para a região desejada de medição, 7 a 9 metros, ambos métodos possuem uma repetibilidade, para 95,45% de confiança, de 0,85 e 0,65 metros referentes ao mapa original e filtrado, respectivamente. Assim, considera-se que há possibilidade de identificação da distância com qualidade suficiente para a geração da trajetória automática de aquisição.

### 5.3 DETECÇÃO DE OBJETOS

Para detecção de objetos em tempo real foi utilizado o modelo YOLOv3 (REDMON; FARHADI, 2018) onde é realizado uma predição em três diferentes escalas utilizando camadas de detecção por convolução, adquirindo características nas diferentes escalas para produzir um tensor tridimensional, codificando as caixas delimitadoras (4 valores), objetividade (1 valor) e a previsão de classe (N classes).

O treinamento da rede é realizado na estrutura de rede neural de código aberto, *darknet* (REDMON, 2013a), desenvolvida em C e CUDA para utilização das redes treinadas em tempo real através do processamento em placas gráficas.

#### 5.3.1 Treinamento CNN

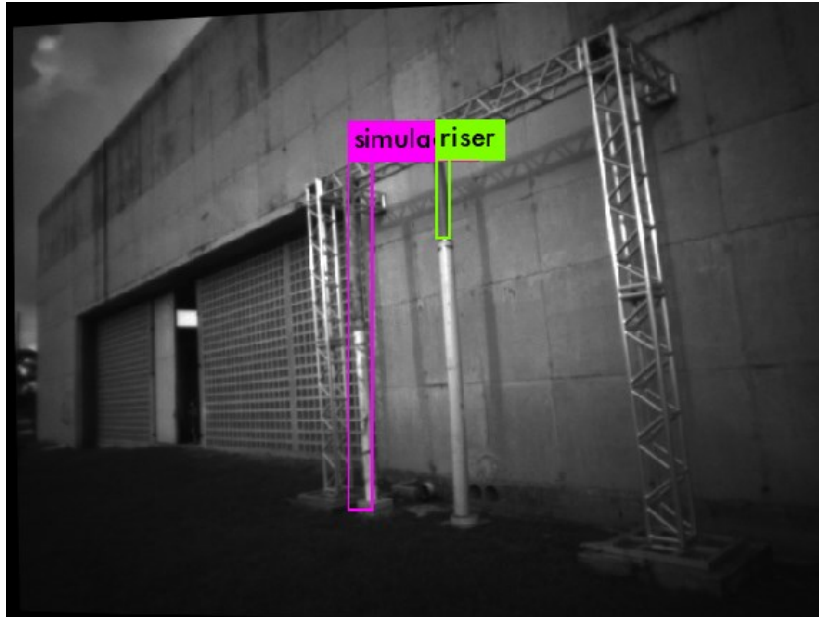
Para treinamento da CNN foi utilizado um *dataset* de 1350 imagens divididas em um grupo de treinamento (80%), validação (10%) e teste (10%) extraídos de imagens de testes anteriores na bancada provenientes das câmeras X5S e do sistema estéreo frontal da aeronave.

O modelo treinado possui duas classes, *simulacro* e *riser*, onde foi realizado uma marcação manual dos objetos no *dataset* através da plataforma CVAT (OPENCV, 2022c), obtendo-se uma precisão de 92,8% para detecção destas duas classes nas imagens de teste.

Devido ao elevado custo de processamento em tempo real e o baixo esforço computacional disponível no computador Jetson Nano 4GB, foi utilizado o modelo *yolov3-tiny* como base para treinamento. Este modelo contém um número reduzido de convoluções e parâmetros, trabalhando com arquivo de tamanho máximo de 28 MB e apenas 800 milhões de operações em pontos flutuantes, diferente de outros modelos que consome 2,3 bilhões (REDMON, 2013b).

Após realizado o treinamento, o modelo foi embarcado na aeronave e incorporado ao pacote ROS, *darknet\_ros*, para realizar a inferência em tempo real na imagem retificada da câmera esquerda do sistema estéreo frontal, ilustrado na Figura 54. Esta rede processada no computador de bordo utilizado possibilita uma detecção em tempo real com uma taxa de processamento de 10 Hz.

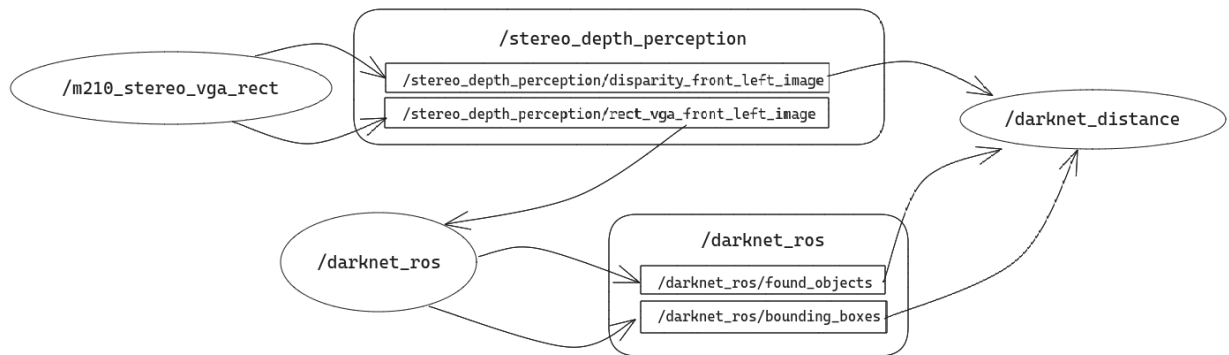
Figura 54 – Detecção em tempo real dos objetos utilizando a rede *yolov3-tiny*.



Fonte: Autor.

Ao realizar a inferência em tempo real através do pacote ROS *darknet\_ros*, é aberto um *nodo* para processar os dados da CNN e apresentar estas informações nos tópicos ilustrados na Figura 55. O *nodo* se inscreve no tópico de imagem da câmera esquerda, já retificada, do sistema estéreo no tópico aberto pelo processo de retificação */stereo\_depth\_perception/rectified\_vga\_front\_left\_image* para realizar a inferência. Os objetos detectados são publicados no tópico */darknet\_ros/found\_objects*, assim como as informações de classe e posições na imagem no tópico */darknet\_ros/bounding\_boxes*.

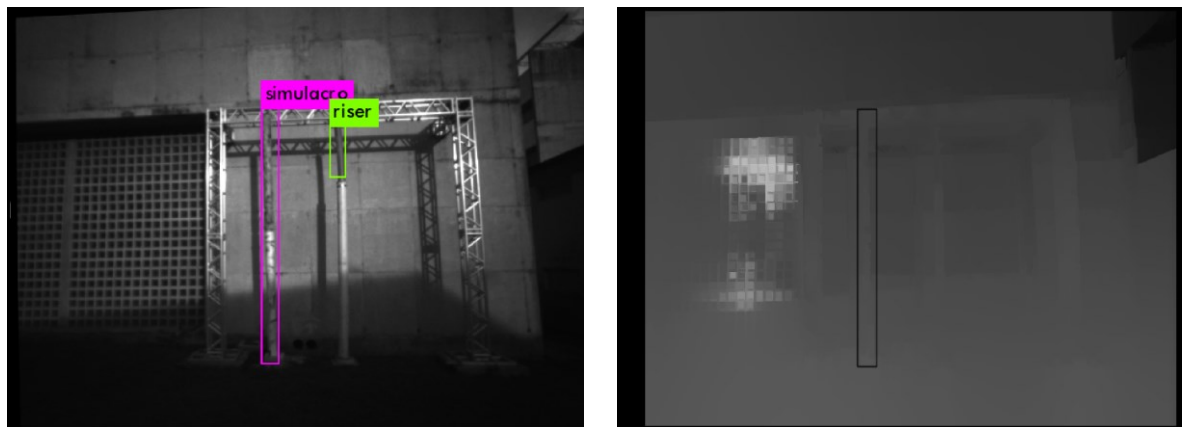
Figura 55 – Gráfico para troca de dados entre *nodos* de processamento de imagem.



Fonte: Autor.

Como o mapa de disparidade é gerado a partir da posição e orientação da imagem retificada da câmera esquerda, ao realizar a inferência na imagem retificada a posição do objeto em pixel é o mesmo no mapa de disparidade. Assim, transferindo a caixa delimitadora para o mapa de disparidade, basta realizar o cálculo da média de intensidade dos pixels da região e aplicar as equações (16), (17) e (18) para estimar a distância tridimensional do objeto. A Figura 56 apresenta a transformação da região detectada como simulacro para o mapa de disparidade filtrado.

Figura 56 – Transformação da caixa delimitadora do objeto detectado para o mapa de disparidade.



(a) Detecção CNN.

(b) Estimação profundidade.

Fonte: Autor.



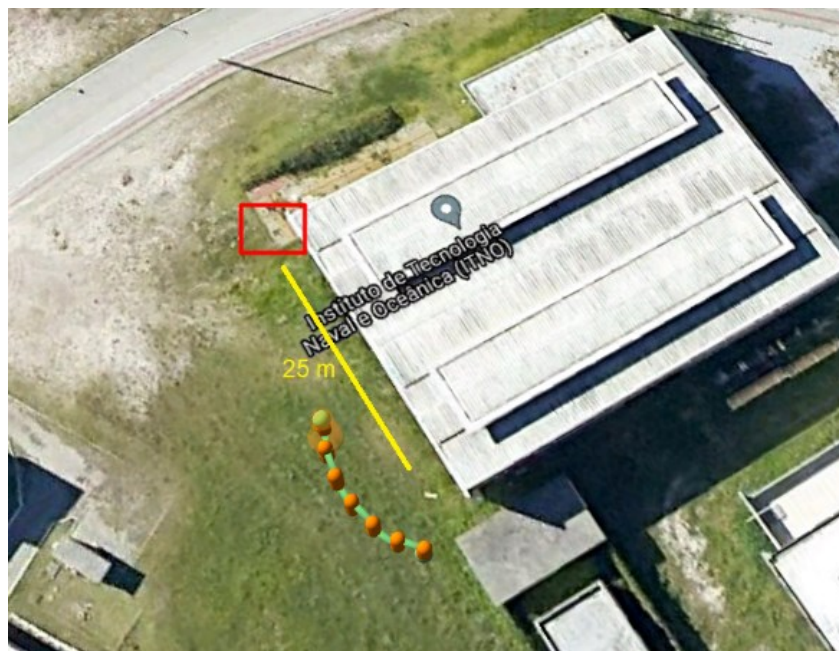
## 5.4 TRAJETO DE INSPEÇÃO

Para análise do trajeto de inspeção utilizado, foi proposto a realização manual e comparando seus resultados com o sistema automático proposto neste trabalho.

### 5.4.1 Avaliação do trajeto de inspeção

Entre os grandes problemas da inspeção proposta em ambiente *offshore* é a realização do trajeto manualmente mantendo uma mesma distância entre duto e aeronave para cada ponto horizontal da inspeção, além da variação da orientação do RPAS para que o trajeto seja realizado sob a superfície de um cilindro centrado no duto. Para avaliação dos resultados, foram realizados 4 ensaios manuais simulando situações de voo em plataformas *offshore*. Nestas situações, o piloto fica em uma posição tal que o campo de visão para a aeronave impossibilita a clara noção de posição. Figura 57 apresenta a posição de inspeção da aeronave e a posição do piloto para observar a aeronave.

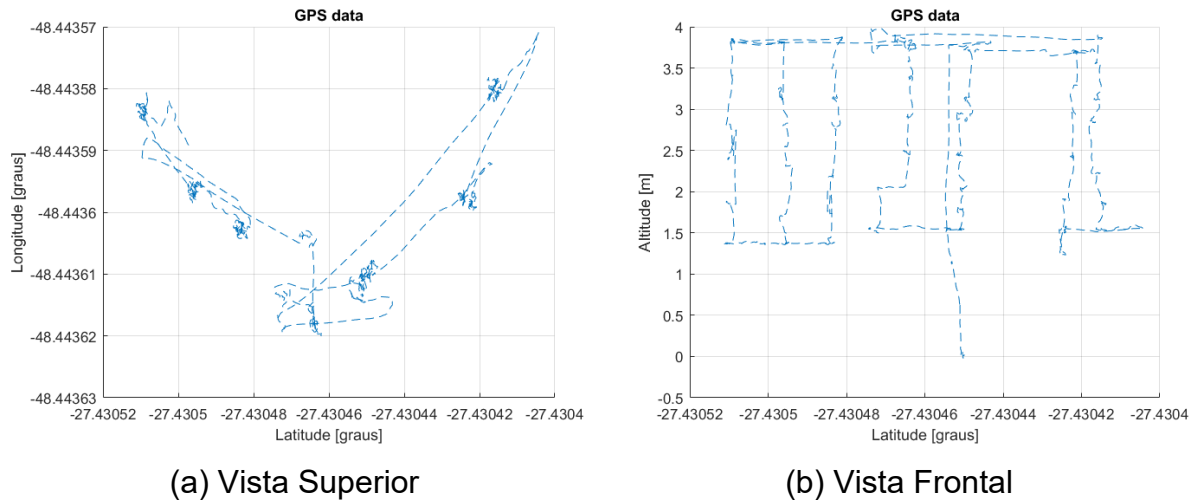
Figura 57 – Pontos laranja indicam a posição estimada do trajeto de inspeção e no quadrado vermelho a posição do piloto a 25 metros do centro de inspeção.



Fonte: Autor.

Figura 58 apresenta as vistas superiores e frontais de um dos ensaios realizados manualmente. Dentre a dificuldade e tempo de execução, ressalta o problema de manter uma distância entre objeto e câmera constante, assim havendo uma variação na resolução espacial e na sobreposição das aquisições.

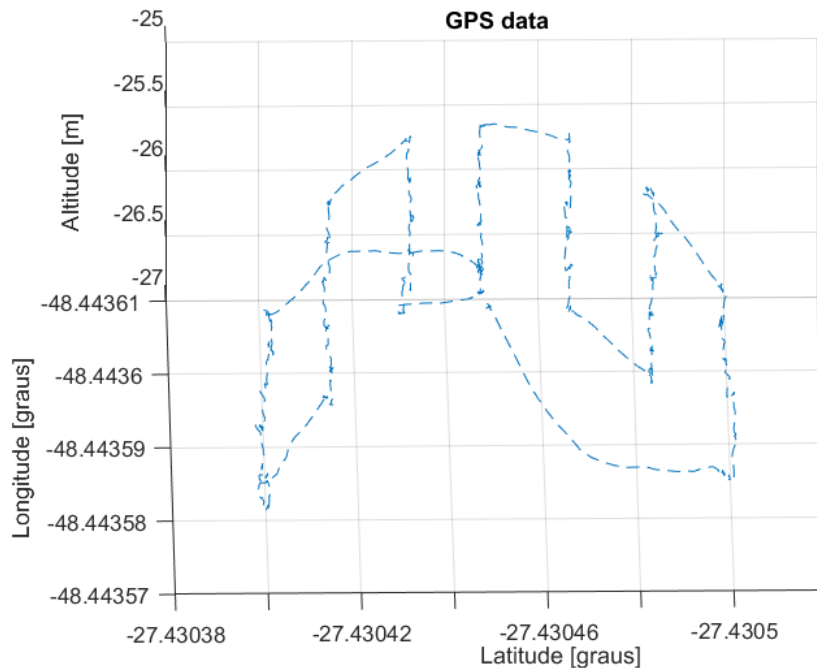
Figura 58 – Trajeto da inspeção realizada manualmente.



Fonte: Autor.

O trajeto automático resultante do controle apresenta uma distribuição uniforme dos pontos horizontais. A Figura 59 apresenta a posição GNSS da aeronave enquanto estava realizando um dos ensaios. Ao requisitar para o sistema a realização a inspeção, a aeronave deve estar perpendicularmente a frente do duto e costado com a distância medida através do processamento de imagem e então iniciará o trajeto calculado para estas condições e ao finalizar a aeronave retornará ao ponto inicial.

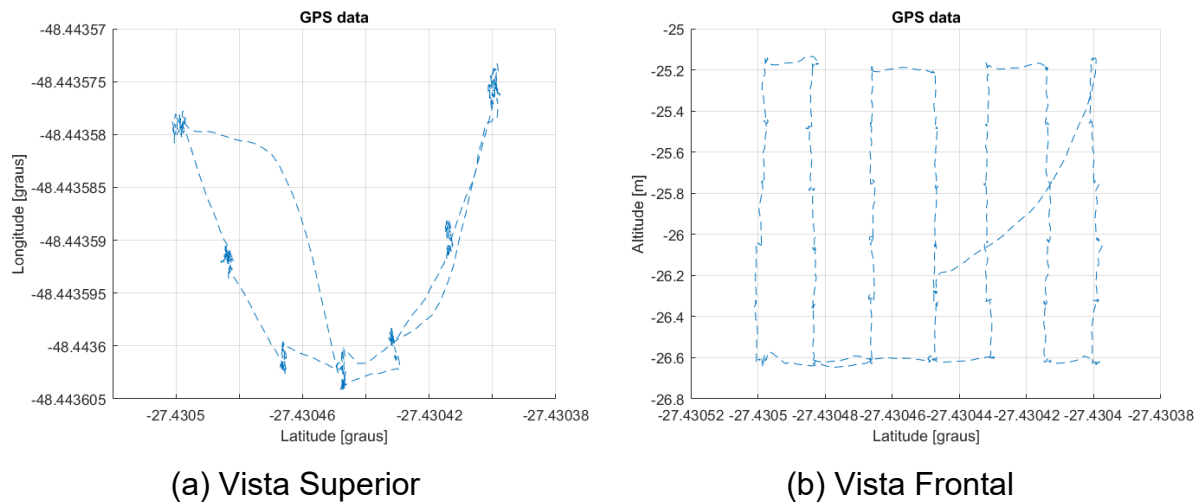
Figura 59 – Posição GNSS registrada do RPAS enquanto realizava a inspeção requisitada atunomamente.



Fonte: Autor.

Ao verificar o gráfico em vistas diferentes, percebe-se na vista superior, Figura 60a, um ponto horizontal circulado em vermelho com deslocamento de posição desejada. Isto pode ser causado devido à proximidade da aeronave às dependências do galpão onde está localizado a bancada de testes, criando uma sobra nos satélites GNSS. A vista frontal, Figura 60b, evidencia a variação de altura constante para cada parada horizontal realizada.

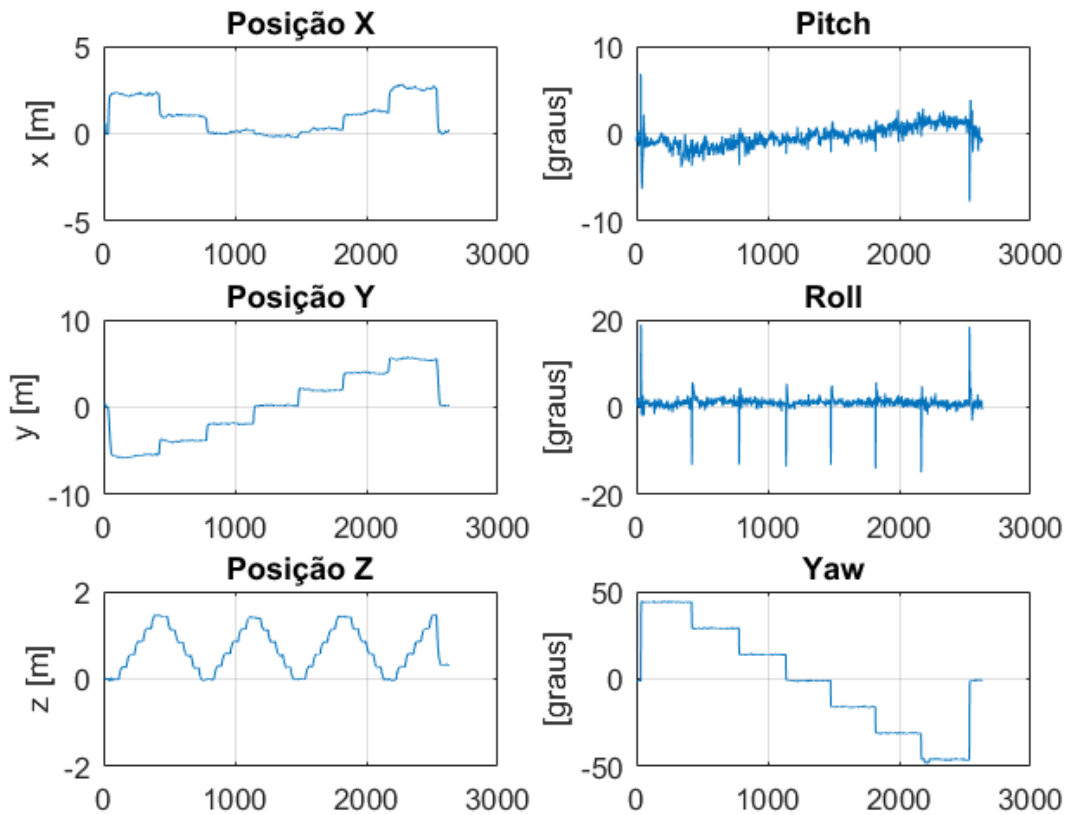
Figura 60 – Vistas superior e frontal do trajeto resultante utilizando voo automático.



Fonte: Autor.

O controle utilizado para realização do trajeto realiza voo com dados da fusão dos sensores de posição GNSS e estimação da movimentação relativa proveniente do sensor IMU. Ao avaliar a movimentação incremental sob o sistema de coordenada cartesiano a Figura 61 apresenta a variação nos três eixos cartesianos e os ângulos de Euler resultantes da movimentação angular da aeronave.

Figura 61 – Movimentação cartesiana e ângulos de Euler da aeronave ao realizar o trajeto.

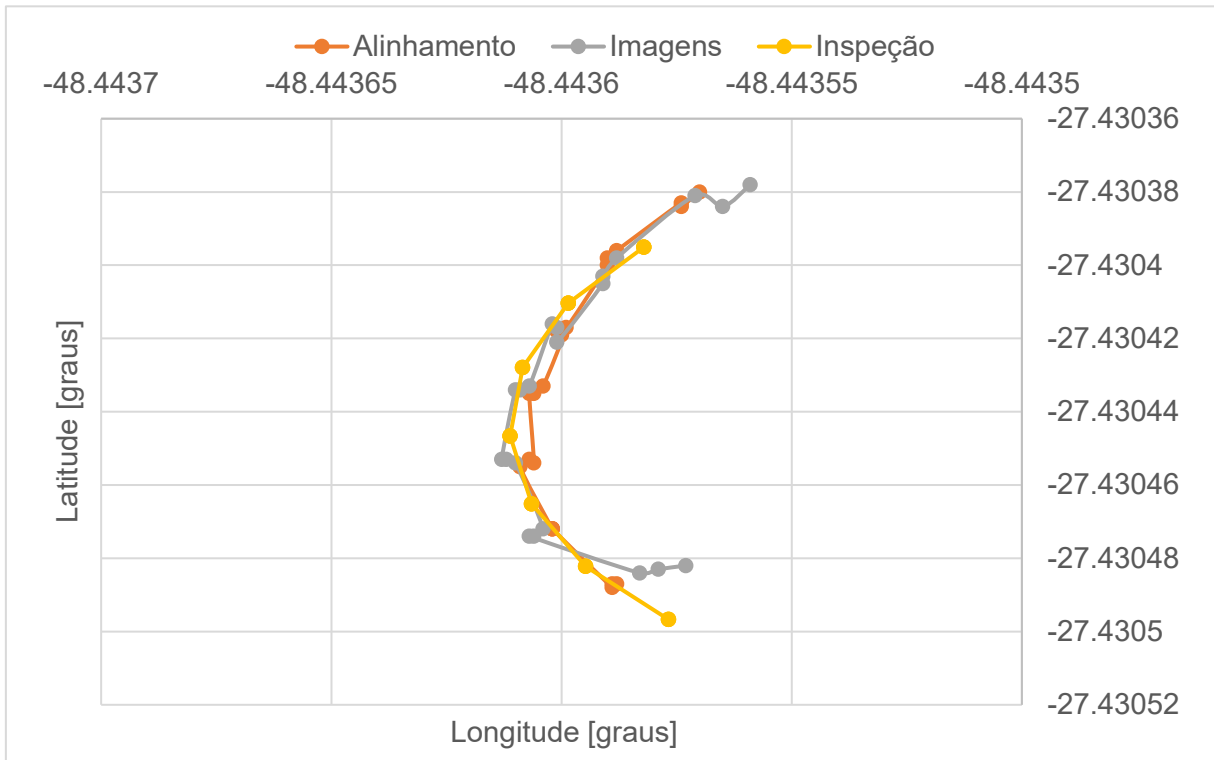


Fonte: Autor.

Ao inicializar o trajeto, o ponto atual da aeronave é definido como a origem do sistema e sua movimentação é relativa à esta origem. Percebe-se que a variação do ângulo *Pitch* é utilizada somente para estabilização do voo e refinamento da posição Y nas mudanças de pontos horizontais. Já a movimentação entre cada parada horizontal é realizada através do ângulo *Roll*, devido à aeronave estar se deslocando de lado para o próximo ponto. A variação abrupta de *Roll* é realizada simultaneamente à variação de *Yaw* para manter a aeronave com a câmera direcionada ao simulacro. A movimentação do eixo Z descreve as paradas verticais das fotos.

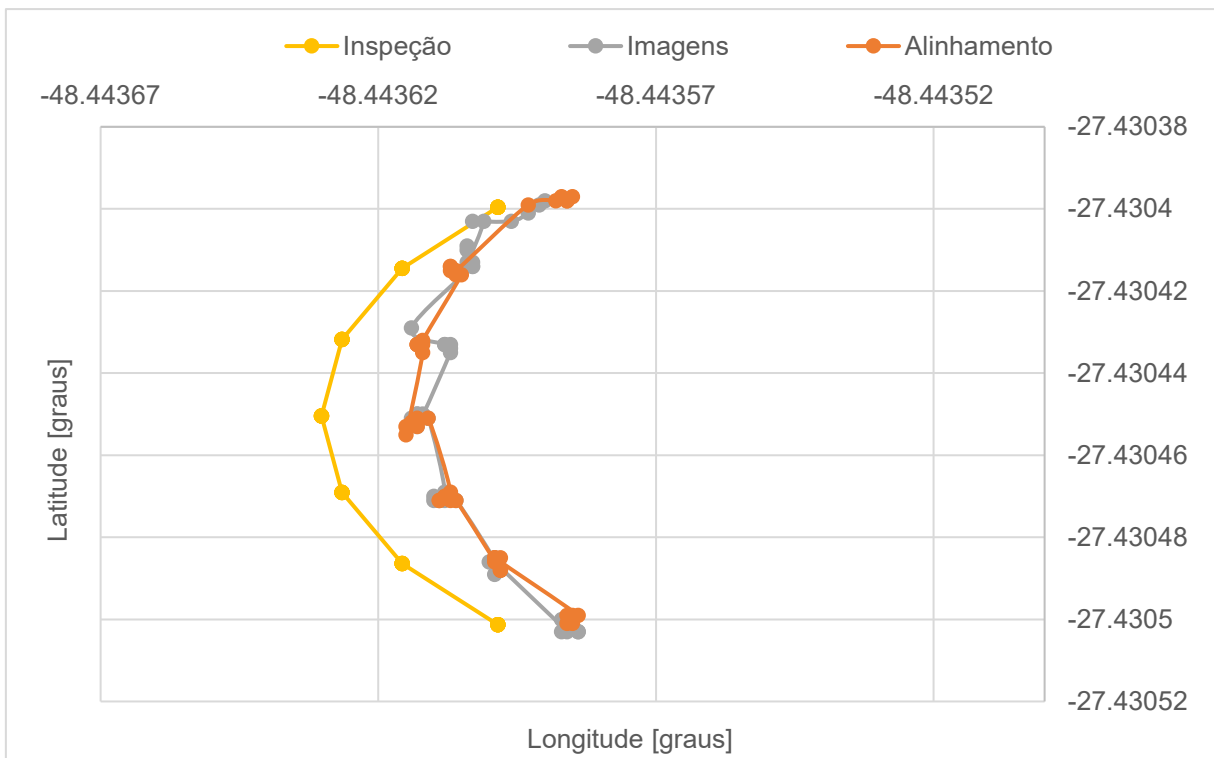
Outro estudo realizado sob o trajeto semicircular proposto, foi a avaliação do trajeto requisitado no momento da inspeção, com o resultante registrado no conjunto de imagens e após realizar o alinhamento das imagens para a busca dos pontos correspondentes pelo software Metashape. Figura 62 e Figura 63 apresentam a análise para dois ensaios em dias diferentes, evidenciando um possível erro na medição final do diâmetro em relação à incerteza do sinal de GNSS registrado nas imagens. As tendências nas medições dos diâmetros resultaram em, respectivamente, -0,18% e -7,0%.

Figura 62 – Comparação da posição do trajeto gerado, registrado na imagem e alinhado no metashape com dados de GNSS. 1º Ensaio dia 21/04/23 medição do diã



Fonte: Autor.

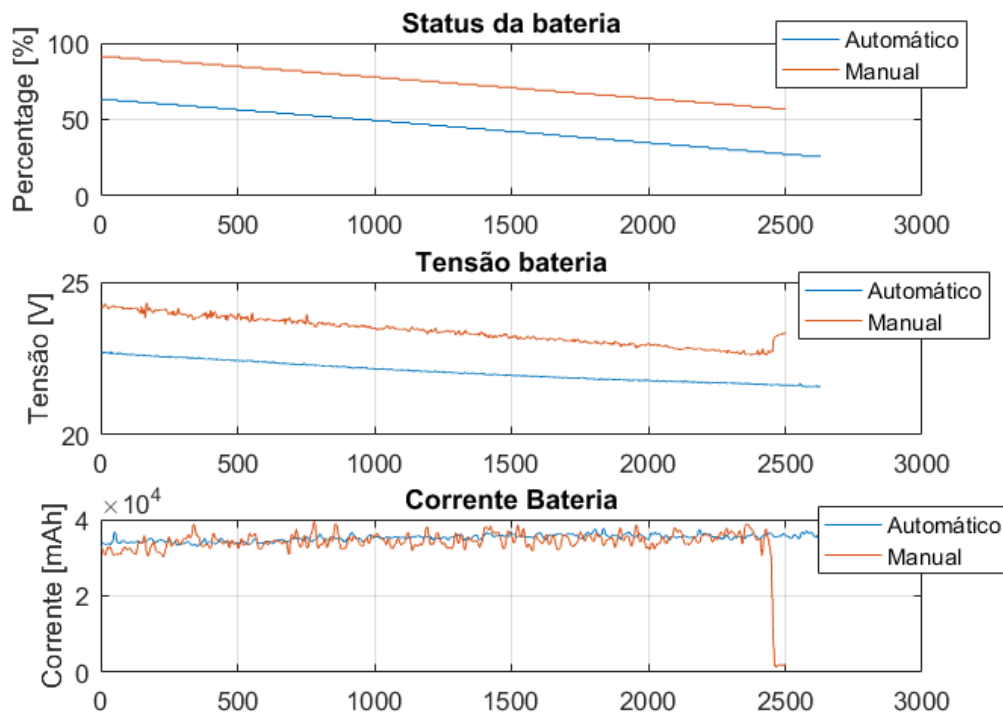
Figura 63 - Comparação da posição do trajeto gerado, registrado na imagem e alinhado no metashape com dados de GNSS. 3º Ensaio dia 22/04/23



Fonte: Autor.

Para compreender e comparar o desempenho do sistema automático em relação à inspeção manual, a Figura 64 ilustra a dinâmica da bateria, mostrando a tensão e corrente consumida durante uma inspeção. Observa-se que ambos os consumos de bateria são semelhantes, o que é atribuído ao extenso treinamento que o operador recebeu ao longo do desenvolvimento deste trabalho. No entanto, é importante ressaltar que a inspeção automatizada não requer esse nível de treinamento, tornando o processo ainda mais simples e acessível. Essa simplificação é uma das vantagens significativas da abordagem automatizada em comparação com a inspeção manual, facilitando sua implementação e utilização em campo.

Figura 64 – Comparação de status da bateria ao realizar o voo automático e manual.



Fonte: Autor.

## 5.5 AVALIAÇÃO DA RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL

Com objetivo de identificar a forma de distribuição do sistema de medição proposto, foram realizados 44 ensaios com os parâmetros de inspeção apresentados na Tabela 9 onde, a partir dos resultados apresentados em (REGNER et al., 2022), foi realizado o trajeto com uma distância de 8 metros na inspeção, 7 paradas

horizontais com 15° de variação entre os pontos, e, cada parada horizontal contendo 6 imagens verticais com passo de 0,5 metros, totalizando 42 imagens.

Tabela 9 – Parâmetros utilizados para avaliação metrológica do sistema

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Descrição</b>
<b>distância</b>	8 metros	Distância entre duto e aeronave
<b>nh</b>	7 pontos	Número de paradas horizontais
<b>nv</b>	6 pontos	Número de paradas verticais
<b>delta_v</b>	0,5 metros	distância vertical entre waypoints
<b>delta_h</b>	15 graus	Ângulo entre pontos horizontais do trajeto
<b>Sobreposição</b>	78%	Sobreposição entre imagens
<b>GSD</b>	0,58 mm/px	Resolução Espacial

Fonte: Autor.

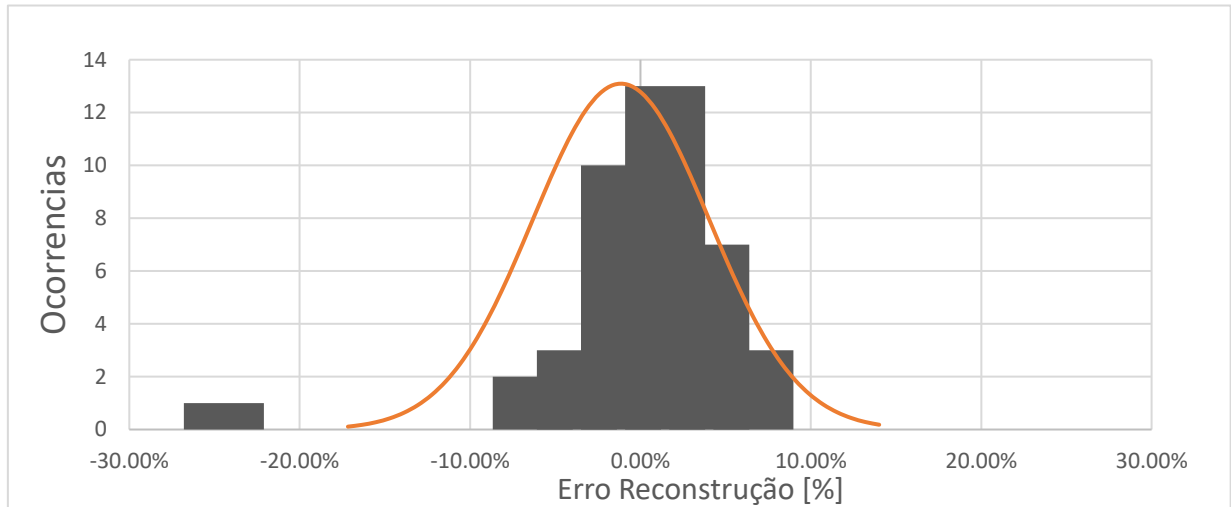
Dentre os 44 ensaios, foram retirados os primeiros 5 ensaios, devido a pequenos problemas iniciais de ajustes, obtiveram imagens desfocadas, distorcendo os resultados de avaliação posteriores.

### 5.5.1 Reconstrução tridimensional

Para cada ensaio realizado, foram extraídos três valores de diâmetro distintos e transformados com base no erro em relação ao *GT* e realizado uma média entre os erros de cada ensaio. A Figura 65, apresenta a distribuição destes ensaios, sendo possível aplicar uma distribuição normal com uma média de -1,14% e um desvio padrão de 5,18%.

Ao avaliar a distribuição das medições, o ensaio número 5 de um dia de testes resultou em uma tendência no erro do diâmetro de -25,37%, com afastamento maior que  $5\sigma$  do valor médio e considerado espúrio. Como não foi possível identificar qualquer anomalia do ensaio como nitidez da foto, ou fenômenos meteorológicos únicos, a partir deste ponto este ensaio será descartado para que não haja tendência nos resultados a serem posteriores de avaliação.

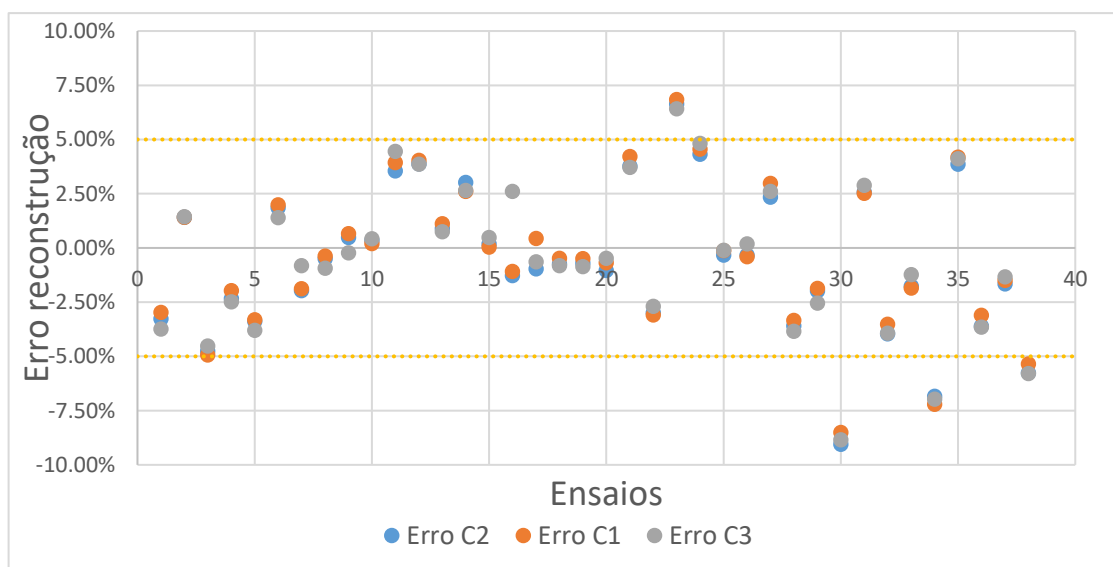
Figura 65 – Distribuição das medições de diâmetro realizadas no total de experimentos.



Fonte: Autor.

Os 38 ensaios restantes avaliados resultaram em uma tendência de 0,04% e um desvio padrão de 3,95% na medição do diâmetro referenciado ao GT. Entretanto, como apresentado na Figura 66, mesmo que a grande parte dos ensaios estão na faixa de erros  $\pm 5\%$ , existe uma aleatoriedade na reconstrução em testes realizados praticamente nas mesmas condições exteriores, necessitando uma análise mais aprofundada. Também pode-se notar que há uma forte correlação entre as medições de diâmetros realizadas nos mesmos ensaios, existindo apenas um fator de escala errôneo no momento da reconstrução tridimensional.

Figura 66 – Comportamento das reconstruções ao longo dos ensaios realizados.



Fonte: Autor.



Para uma melhor análise do motivo dos resultados, foi proposto duas avaliações: utilização de escalas fotogramétricas na cena sugerido por (LUHMANN et al., 2014) em fotogrametria de curta distância, e a correlação entre parâmetros de entrada para a reconstrução tridimensional extraídas do grupo de imagens de cada ensaio.

### 5.5.2 Utilização de escalas na cena

Para avaliar o erro associado a cada reconstrução utilizando somente dados de GNSS e uma fusão de dados de GNSS com escalas fotogramétricas na cena. Estas escalas foram calibradas em laboratório, Figura 67, com a utilização de um interferômetro onde os resultados estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Tabela de medições da distância entre alvos fotogramétricos.

	<i>Medição 1</i>	<i>Medição 2</i>	<i>Medição 3</i>	<i>Média (mm)</i>	<i>Incerteza (mm)</i>
<b>Esca 1</b>	1154,7781	1154,7721	1154,7739	1154,7747	0,0031
<b>Esca 2</b>	652,4971	652,4995	652,4985	652,4984	0,0013

Fonte: Autor.

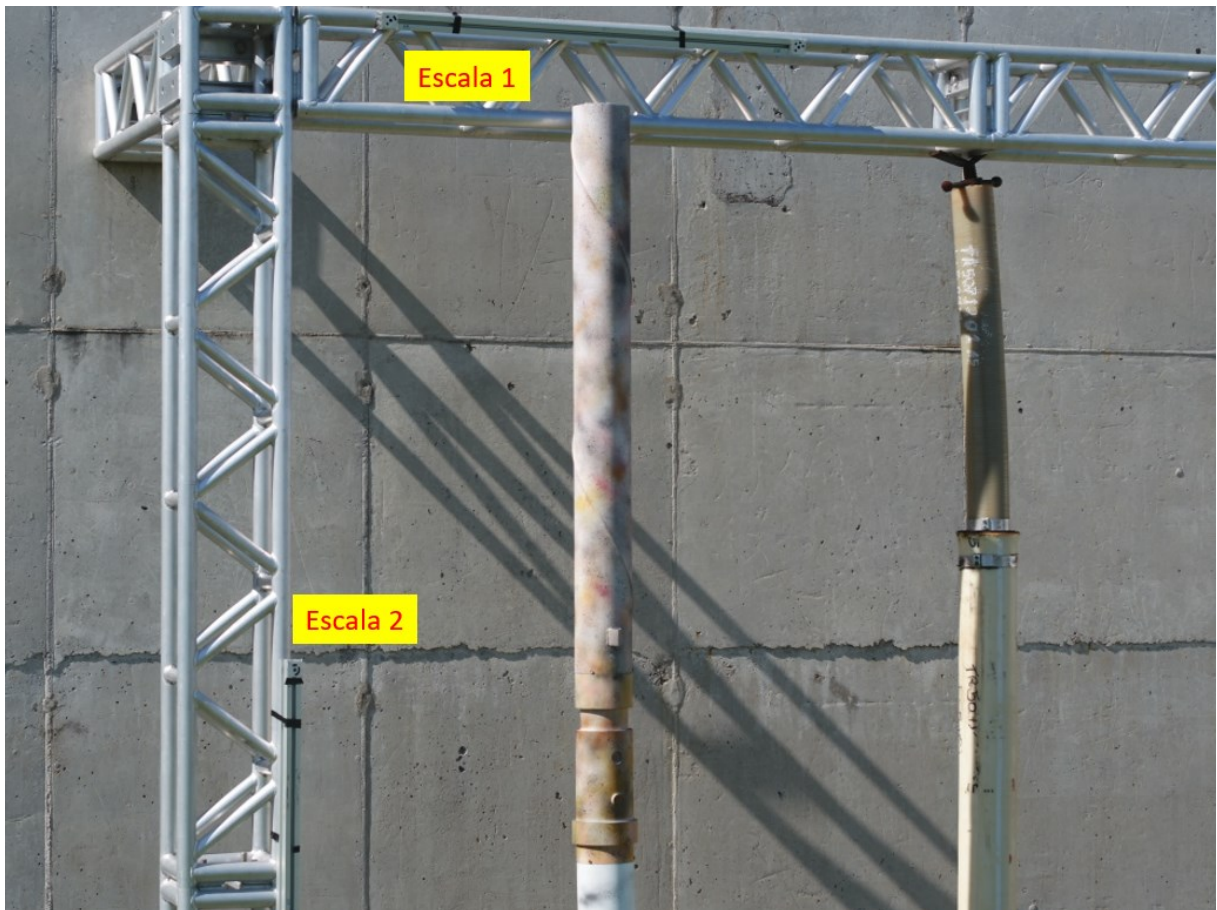
Figura 67 – Ensaio com interferômetro para medir a distância entre os alvos fotogramétricos na escala 1.



Fonte: Autor.

Foram realizados quatro ensaios com o controle proposto e adicionado duas escalas fotogramétricas na cena, exemplificado na Figura 68. Para avaliar a influência das escalas. O pós-processamento de dados no software Metashape, as imagens introduzidas de três modos diferentes: utilizando somente a informação de posição e variância registrada em cada imagem, importando somente os valores de posição GNSS das imagens, mantendo a incerteza de posição padrão (10 m), utilizando somente a escala 1 na cena para aplicar o alinhamento das imagens, e utilizando as escalas 1 e 2 para alinhamento das imagens.

Figura 68 – Posição das duas escalas fotogramétricas para avaliação da reconstrução tridimensional.



Fonte: Autor.

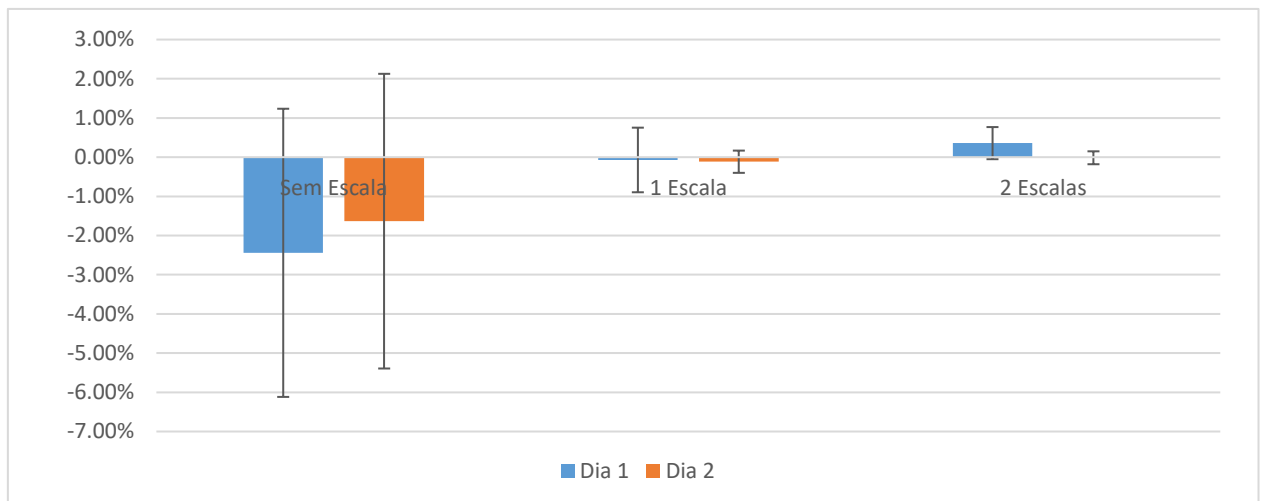
O software Metashape, ao aumentar a incerteza associada a posição da foto permite que haja uma movimentação maior sobre a posição da imagem para melhorar o alinhamento dos pontos correspondentes entre fotos.

### 5.5.2.1 Avaliação da reconstrução com escalas

Para a utilização das escalas na cena, foi introduzido ao software Metashape as informações de distância e incertezas apresentadas na Tabela 10, deste modo o software realiza os cálculos de alinhamento tendo mais confiança nos dados da escala que as posições de GNSS. Com resultado deste teste, obteve-se reduções expressivas nos erros das medições do diâmetro da nuvem de pontos construídas com informações das escalas na cena.

A Figura 69 apresenta os resultados de reconstrução e medição dos cilindros de dois dias subsequentes dos testes realizados em abril de 2023. Foram realizados quatro ensaios, totalizando 12 medições de diâmetro para cada tipo de reconstrução, definindo a tendência e desvio padrão apresentados na Tabela 11.

Figura 69 – Tendência e desvio padrão de reconstrução na medição de diâmetro para ensaios sem escala, 1 escala e 2 escalas fotogramétricas.



Fonte: Autor.

A utilização de uma única escala na cena contribui para melhorar as medições de diâmetro com erros na ordem de até 1%. Mesmo sendo possível reconstruir a cena utilizando somente dados de GNSS proveniente da aeronave, a fotogrametria industrial de curta distância comprova a necessidade de ao menos uma escala na cena para melhor definição da escala da reconstrução.

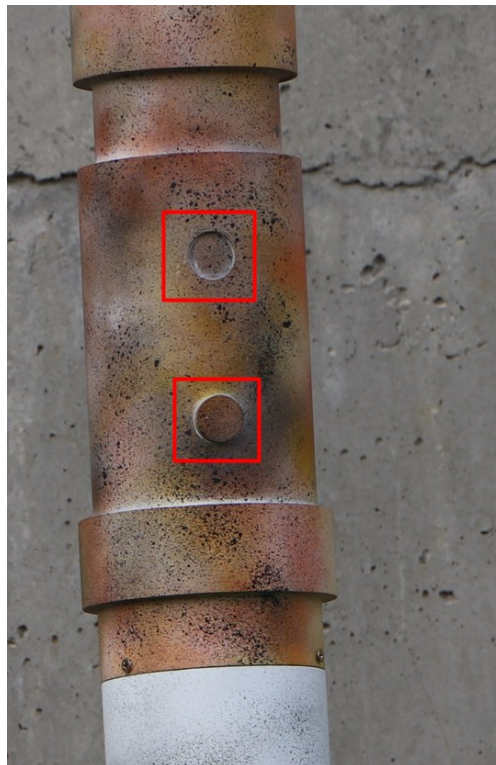
Tabela 11 – Informações da média e desvio padrão do erro de reconstrução para medições de diâmetro.

<b>Teste</b>	<b>Média</b>		<b>Desvio padrão</b>	
	Dia 1	Dia 2	Dia 1	Dia 2
<b>Data</b>				
<b>GNSS</b>	-2,44%	-1,63%	3,68%	3,76%
<b>GNSS + 1 escala</b>	-0,07%	-0,12%	0,82%	0,28%
<b>GNSS + 2 escalas</b>	0,36%	-0,02%	0,41%	0,16%

Fonte: Autor.

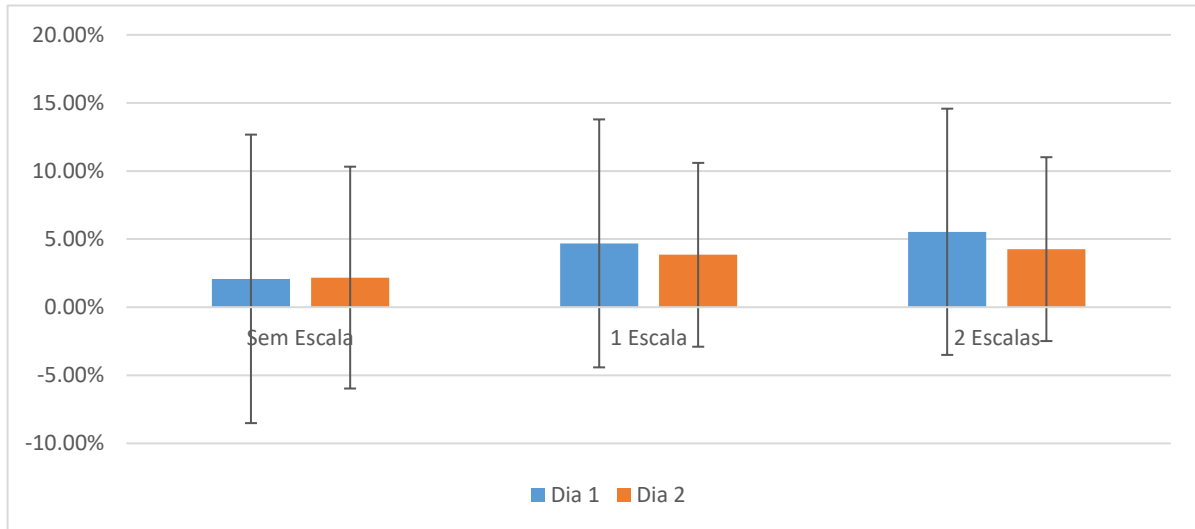
Figura 71 apresenta a comparação do erro na medição de ressaltos, representados na Figura 70, encontrados na região de variação de diâmetros do simulacro inspecionado nas três abordagens de reconstruções utilizadas para avaliação.

Figura 70 – Ressaltos avaliados para compreensão do erro de reconstrução em defeitos de profundidade.



Fonte: Autor.

Figura 71 - Erro de reconstrução na medição de resalto e rebaixo para ensaios sem escala, 1 escala e 2 escalas fotogramétricas.



Fonte: Autor.

Apesar do baixo erro de medição de diâmetros, para medições de profundidade, com dimensões nominais de 4 mm, existe um erro semelhante para os três métodos de reconstrução. A Tabela 12 apresenta os valores de média e desvio padrão dos ensaios, apresentando uma média inferior na reconstrução com dados de GNSS, porém com desvio padrão elevado, resultando em um erro máximo de 15% nas três abordagens.

Tabela 12 – Informações da média e desvio padrão do erro de reconstrução.

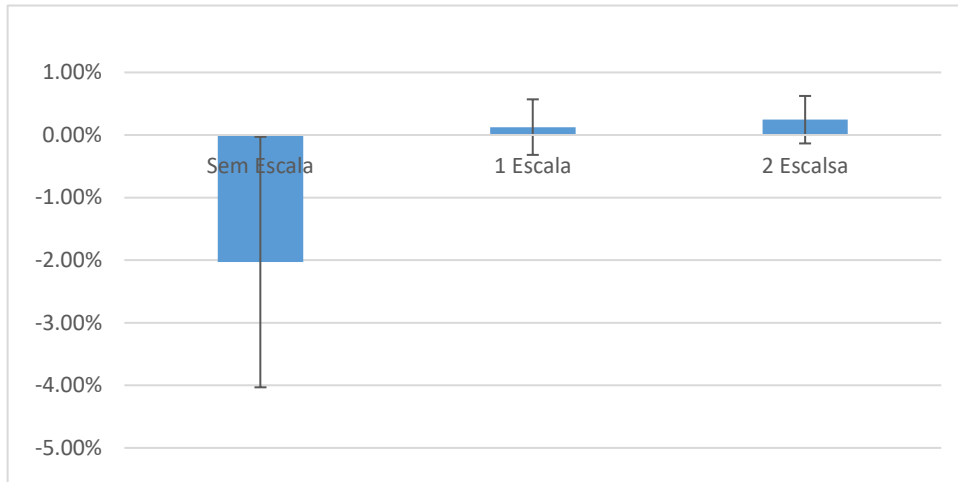
<b>Teste</b>	<b>Tendência</b>		<b>Repetibilidade</b>	
	Dia 1	Dia 2	Dia 1	Dia 2
<b>Data</b>				
<b>GNSS</b>	2,08%	2,17%	10,59 %	8,15%
<b>GNSS + 1 escala</b>	-4,69%	3,85%	9,11%	6,75%
<b>GNSS + 2 escalas</b>	5,54%	4,26%	9,04%	6,75%

Fonte: Autor.

#### 5.5.2.2 Avaliação trajeto manual

Com objetivo de avaliar um estudo comparativo com a realização da inspeção manualmente, foram realizados quatro ensaios manuais utilizando escalas na cena e posteriormente reconstruídos iguais às seções anteriores, utilizando somente dados de posição registrados nas imagens e com dimensões das escalas na cena. Figura 72 apresenta o erro médio e desvio padrão para os quatro ensaios manuais reconstruídos com e sem escala, Tabela 13 resume os valores.

Figura 72 – Erro de reconstrução na medição de diâmetro para ensaios sem escala, 1 escala e 2 escalas fotogramétricas.



Fonte: Autor.

Tabela 13 – Informações da média e desvio padrão do erro de reconstrução nos ensaios manuais para medições de diâmetro.

<i>Teste</i>	<i>Tendência</i>	<i>Repetibilidade</i>
<b>GNSS</b>	-2,0%	4%
<b>GNSS + 1 escala</b>	-0,13%	0,88%
<b>GNSS + 2 escalas</b>	0,24%	0,76%

Fonte: Autor.

Conforme esperado, a média e a repetibilidade do erro de reconstrução em voos manuais utilizando apenas dados de GNSS sejam semelhantes à média dos resultados obtidos com a inspeção automática, é importante ressaltar que a praticidade do sistema automático dispensa grandes tempos de treinamentos do piloto para realizar o devido trajeto de inspeção. Ressalvo que, em condições reais de medição na plataforma, a visualização da cena pode se tornar ainda mais desafiadora, o que pode afetar ainda mais os resultados. Um estudo realizado por (REGNER et al., 2022) apresentou os primeiros resultados da inspeção manual realizada pelo autor, demonstrando uma média de -0,38% e repetibilidade de 9,28% para uma confiabilidade de 95,45%. Esses dados evidenciam a influência do treinamento do piloto no desempenho da inspeção manualmente.

## 5.6 ANÁLISE PARÂMETROS DO PROCESSO

Com objetivo de compreender a instabilidade do erro de reconstrução dos ensaios realizados, foi realizado um estudo de correlação entre variáveis disponíveis

no arquivo EXIF associado a cada imagem de cada ensaio. Dentre os parâmetros associados a câmera está o *f-number*, o qual representa o tamanho de abertura da íris. Esta abertura da íris é inversamente proporcional à profundidade de foco, quanto menor o valor do parâmetro, maior a profundidade de foco (LUHMANN et al., 2014). Como a aquisição das imagens foram realizadas no modo automático da câmera e definida para manter o tempo de exposição constante de 1 milissegundo a abertura da íris oscila dependendo do ajuste automático. Para o conjunto de imagens de cada ensaio, foram retirados o valor médio e o desvio padrão do parâmetro *f-number*.

Outro parâmetro de importância para análise é a incerteza de posição tridimensional do sensor GNSS disponível no EXIF das imagens. Ao extrair estes parâmetros, foi construído uma única grandeza tridimensional através da distância euclidiana, equação (32), e extraindo o desvio padrão do conjunto de dados associado às imagens de cada ensaio.

$$q_{3D} = \sqrt{q_x^2 + q_y^2 + q_z^2} \quad (32)$$

Definido os parâmetros de avaliação, Tabela 14, foi realizado um estudo de correlação entre os parâmetros e a média do erro da reconstrução tridimensional para avaliação dos diâmetros.

Tabela 14 – Parâmetros utilizados para estudo de correlação em relação ao erro médio do diâmetro medido em cada ensaio.

<b>Parâmetros</b>	<b>Influência</b>	<b>Unidade</b>
<b>Média <i>f-number</i></b>	Câmera	millímetros
<b>Desv. Pad. <i>f-number</i></b>	Câmera	adimensional
<b>Média RMS incerteza 3D GNSS</b>	Posição Imagem	metros
<b>Desv. Pad. incerteza 3D GNSS</b>	Posição Imagem	metros

Fonte: Autor.

A equação de correlação é uma medida estatística que descreve o grau de relação linear entre duas variáveis. Ela é usada para determinar se existe uma relação entre as variáveis e qual a intensidade dessa relação. A correlação é representada por um valor chamado de coeficiente de correlação, que varia de -1 a 1 (COX; HINKLEY, 1974).

Existem diferentes métodos para calcular o coeficiente de correlação, sendo os mais comuns o coeficiente de correlação de Pearson descrita abaixo, onde x e y são as variáveis a serem estudadas.

$$r = \frac{n\sum x_i y_i - (\sum x_i * \sum y_i)}{\sqrt{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (33)$$

Através da equação (33), foi realizado um estudo de correlação dos parâmetros da Tabela 14 em relação à média do erro resultante na medição dos diâmetros de cada ensaio realizado. Tabela 15 apresenta os resultados desta análise, e o Apêndice A dispõe de todos os dados utilizados para esta análise.

Tabela 15 – Análise de correlação dos parâmetros em relação à média do erro na medição do diâmetro.

	<b>Média aritmética erro medição</b>
<b>Média aritmética f-number</b>	24,32%
<b>Desvio Padrão f-number</b>	20,32%
<b>Média geométrica incerteza GNSS</b>	18,68%
<b>Desvio Padrão RMS incerteza GNSS</b>	10,79%

Fonte: Autor.

Embora não haja uma correlação definida entre os parâmetros avaliados e a média do erro de medição para cada ensaio testado, é necessária uma avaliação mais profunda para identificar se há diferença na reconstrução ao utilizar o tempo de exposição da câmera fixo ao invés da abertura da íris além da análise da incerteza do sinal GNSS para os dias de testes. Estes parâmetros, mesmo sem grande correlação, podem afetar a precisão da reconstrução tridimensional e introduzir erros de escala nas medições.

Para evitar esses possíveis problemas, é aconselhável realizar ajustes manuais dos parâmetros da câmera. Isso significa ter um cuidado especial ao configurar a câmera, selecionando os valores adequados para tempo de exposição, abertura da íris e profundidade de foco, além de avaliar a qualidade do sinal GNSS.



Ao ajustar manualmente esses parâmetros, reduzem-se as possibilidades de erros de escala na reconstrução tridimensional.

Essa abordagem de ajuste manual permite um maior controle sobre os parâmetros da câmera e ajuda a minimizar os problemas na reconstrução associados aos parâmetros da câmera. Entretanto, ao realizar estes ajustes manuais, muitas vezes, pode retornar uma qualidade da imagem inferior devido a condições ambientais variáveis resultantes da variação de posição da aeronave em relação a cena a ser inspecionada.

## 5.7 DISCUSSÃO

O sistema proposto se mostrou apto a realizar uma inspeção automatizada a partir de um posicionamento manual inicial do drone. A automatização deste tipo de inspeção é de grande importância para a incorporação de trabalhos desenvolvidos em projetos de P&D no ambiente industrial, reduzindo problemas decorrentes do trajeto realizado manualmente.

A realização do trajeto de inspeção de forma automática simplifica a utilização e realização da inspeção em diferentes condições climáticas. Através do processamento de imagens do sistema estéreo frontal da aeronave, tornou possível identificar e estimar a distância entre objeto-câmera para inspeções com distância nominal de oito metros, porém ao avaliar os mapas de disparidade, há erros máximos superiores a 2 metros.

Apesar do resultado de medição da distância entre objeto-câmera do sistema estéreo frontal da aeronave M210 V2, existem limitações de utilização. Para a distância estabelecida de 8 metros, o sistema é capaz de estimar com boa repetibilidade, porém saindo da faixa de  $8 \pm 1$  metros, não é possível manter a exatidão na medição. Isto pode ocorrer devido à baixa resolução do sistema estéreo, além das imagens ser em escala de cinza, dificultando a identificação de pontos correspondentes.

A utilização de técnicas de fotogrametria de curta distância se mostrou conforme o esperado pela literatura, é possível realizar a medição com a utilização da posição geoespacial da câmera, porém os erros reduzem significante ao introduzir uma escala fotogramétrica na cena. A Tabela 16 apresenta os resultados de correção tendência e repetibilidade para uma confiança de 95,45% tanto para voos automáticos e manuais.

Tabela 16 – Informações da tendência e desvio padrão do erro de reconstrução.

<i>Ensaio</i>	<i>Voo Manual</i>		<i>Voo Automático</i>	
	<i>Tendência</i>	<i>Rebetibilidade</i>	<i>Tendência</i>	<i>Rebetibilidade</i>
<b>GNSS</b>	-2,03%	4,00%	-2,04%	7,52%
<b>GNSS + 1 escala</b>	0,13%	0,88%	-0,19%	1,10%
<b>GNSS + 2 escalas</b>	0,24%	0,76%	0,17%	0,58%

Fonte: Autor.

Apesar dos resultados dos voos manuais e automáticos serem semelhantes, a utilização deste sistema de voo automático possibilita a alteração do trajeto para utilização em diferentes estruturas sem que seja necessários elevados níveis de treinamento do piloto para realização das inspeções.

Embora não tenha sido possível identificar a fonte exata do erro aleatório nas reconstruções, é importante considerar diversas variáveis que podem influenciar nesse resultado. Durante os ensaios, foram realizadas medições em diferentes dias, o que implica em possíveis variações nas condições climática, podendo afetar a qualidade das imagens capturadas e, conseqüentemente, a precisão da reconstrução tridimensional.

Além disso, as incertezas associadas ao sinal dos satélites de geolocalização também devem ser levadas em consideração. A disponibilidade e a precisão dos sinais de satélite podem variar de acordo com a localização geográfica, a presença de obstáculos e interferências.

Outro aspecto a ser considerado são os parâmetros e configurações do software de reconstrução tridimensional utilizado, como o Metashape. Diferentes configurações de alinhamento e processamento podem ser aplicadas durante o processo, e essas escolhas podem ter impacto na qualidade dos resultados obtidos.

Diante da complexidade e da interação de múltiplas variáveis envolvidas nesse processo, a análise dos erros na determinação dos diâmetros medidos requer uma investigação mais detalhada, que envolva a análise de cada uma dessas variáveis e a realização de testes controlados. Essa análise aprofundada pode fornecer percepções valiosas para compreender e mitigar estes erros, garantindo resultados mais confiáveis nas medições dos diâmetros dos dutos.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como principal objetivo desenvolver um sistema de controle automático de drones e aquisição de imagens para a inspeção tridimensional de dutos de extração de petróleo em plataformas offshore. A ideia fundamental por trás da geração da trajetória automática foi oferecer uma abordagem eficiente e segura para inspecionar os dutos, eliminando a necessidade de intervenção humana direta durante o voo. O sistema de controle, utilizando a tecnologia embarcada da NVIDIA Jetson Nano 4 GB e a aeronave M210 V2, permite a leitura dos sensores, o processamento de dados e a tomada de decisões para executar o trajeto pré-estabelecido. Essa trajetória é cuidadosamente planejada para cobrir de forma completa e precisa todas as áreas dos dutos. Durante o voo, a câmera DJI Zenmuse X5S captura as imagens necessárias para o posterior processamento dos dados no software Metashape e a análise detalhada da reconstrução no software GOM Inspect. Essa abordagem automatizada proporciona maior eficiência, segurança e precisão nas inspeções dos dutos, contribuindo significativamente para melhorar a integridade e o desempenho das operações offshore de extração de petróleo.

Ao comparar os resultados do sistema proposto à realização da inspeção manual, torna-se nítida a simplificação da tarefa. A realização da inspeção, devido ao seu trajeto, sempre foi um obstáculo para a realização manualmente, muitas vezes pela falta de treinamento e sensibilidade da tarefa a ser realizada no ambiente tão adverso das plataformas em alto mar.

Apesar de existir restrições de condições climáticas como intensidade do vento, sensibilidade da trilateração dos satélites de posicionamento e adição de periféricos extras embarcados à aeronave, o sistema foi capaz de simplificar a inspeção, não necessitando de um pré-processamento para geração do trajeto como os softwares comerciais requerem.

Com o material utilizado, é possível realizar a automação do voo de inspeção, porém devido as restrições físicas do sistema estéreo utilizado para identificação do objeto e estimação da distância, a técnica utilizada para estimação da distância contém uma incerteza elevada ao variar a distância de inspeção. O computador embarcado a aeronave também se mostrou válido para a proposta, mas limitando a performance do sistema ou utilização de técnicas mais avançadas de processamento de imagem.

Para fotogrametria de curta distância a literatura indica o uso de escalas fotogramétricas na cena para definição de escala da cena reconstruída. Conforme os resultados apresentados, a inserção destas escalas para a inspeção tridimensional de dutos reduz as incertezas de escalas ocasionadas pela variância da trilateração da posição GNSS da aeronave, reduzindo os erros máximos da análise tridimensional. Como os testes foram realizados em um ambiente controlado, a utilização de escalas na cena torna-se fácil, entretanto para a instalação destas escalas para inspeções realizadas em plataformas talvez seja necessário o desenvolvimento de alguma estrutura de fixação no balcão de *risers* com escalas e identificador de qual duto está sendo realizada a inspeção.

Com objetivo de expandir a utilização da inspeção remota por RPAS, o sistema desenvolvido pode ser modularizado para diferentes trajetos pré-estabelecidos para inspeção tridimensional de diferentes estruturas da área de P&G.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

A experiência e o aprendizado adquirido ao longo do desenvolvimento deste sistema proposto possibilitam propor novas ideias de melhorias que possam repercutir em trabalhos futuros, tais quais as melhorias nos algoritmos desenvolvidos, fusão de sensores para mapeamento e localização em tempo real, integração com sistemas embarcados para utilização de diferentes técnicas de fotogrametria. As sugestões de trabalhos são:

- Análise da causa do erro aleatório associado à reconstrução tridimensional, se é causada por um parâmetro de câmera, condições climáticas, variância do sinal de GNSS, ou até mesmo algoritmo utilizado para reconstrução tridimensional pelo software Metashape.
- Integração com sistema estéreo desenvolvido em (MACHADO, 2021) para realização do trajeto automático e aquisição de dados, sem a necessidade de utilizar escalas na cena.
- Integração com sistema de rastreamento de objeto (REGNER et al., 2021) para reduzir a variabilidade de posição e perda de imagens por falta de posicionamento da câmera acoplada ao mecanismo gimbal.
- Utilização da fusão de dados dos sensores LiDAR e o mapa de disparidade gerado pelo sistema estéreo para melhor estimativa do ambiente e distância do objeto a ser inspecionado.

- Construção de uma estrutura para encaixe na bancada de *risers* nas plataformas para utilização de escalas fotogramétricas na cena, reduzindo a incerteza de reconstrução.

## REFERÊNCIAS

- 4SUBSEA. **Flexible Pipeline Engineering**. Disponível em: <<https://www.4subsea.com/solutions/flexible-risers/flexible-pipeline-engineering/>>. Acesso em: 5 jan. 2023.
- AGISOFT. Agisoft Metashape User Manual version 2.0. **Agisoft Metashape**, 2021.
- AGISOFT. **Agisoft Metashape**. Disponível em: <<https://www.agisoft.com/>>. Acesso em: 7 abr. 2023.
- ASSOCIATION, N. O. I. **The basics of offshore oil & gas**. Disponível em: <<https://www.noia.org/basics-offshore-oil-gas>>. Acesso em: 5 jan. 2023.
- AZEVEDO, P. **Objet Detection State of the Art 2022**. Disponível em: <<https://medium.com/@pedroazevedo6/object-detection-state-of-the-art-2022-ad750e0f6003>>. Acesso em: 18 jun. 2022.
- BALLARD, D. H.; BROWN, C. M. **Computer Vision**. [s.l.] Prentice Hall 1982, 1982.
- BAY, H.; TUYTELAARS, T.; VAN GOOL, L. SURF: Speeded Up Robust Features. In: **Computer Vision ECCV 2006**. [s.l.: s.n.]. p. 404–417.
- BECERRA, V. M. Autonomous control of unmanned aerial vehicles. **Electronics (Switzerland)**, v. 8, n. 4, 2019.
- BJELONIC, M. **{YOLO ROS}: Real-Time Object Detection for {ROS}**, 2018. Disponível em: <[https://github.com/leggedrobotics/darknet\\_ros](https://github.com/leggedrobotics/darknet_ros)>
- BRADSKI, G.; KAEHLER, A. **Learning OpenCV**. [s.l.] O'Reilly, 2009. v. 16
- BUSCHINELLI, P. et al. **Targetless Photogrammetry Network Simulation for Inspection Planning in oil and gas industry**. ISPRS 2020. **Anais...Nice, France: 2020a**. Disponível em: <[www.isprs2020-nice.com](http://www.isprs2020-nice.com)>
- BUSCHINELLI, P. et al. TARGETLESS PHOTOGRAMMETRY NETWORK SIMULATION FOR INSPECTION PLANNING IN OIL AND GAS INDUSTRY. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. V-1–2020, p. 285–291, 3 ago. 2020b.
- CHAKRABARTI, S. **Handbook of offshore Engineering**. [s.l.: s.n.].
- COCCHIONI, F.; MANCINI, A.; LONGHI, S. Autonomous navigation, landing and recharge of a quadrotor using artificial vision. **2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2014 - Conference Proceedings**, n. May, p.

418–429, 2014.

COSTA, W. M. DA. A Petrobrás e a indústria de petróleo no Brasil: geopolítica e estratégia nacional de desenvolvimento. **Confins**, n. 39, 2 mar. 2019.

COX, D. R.; HINKLEY, D. V. **Theoretical Statistics**. New York: Chapman and Hall/CRC, 1974.

CULTURAL HERITAGE IMAGING. Guidelines for Calibrated Scale Bar Placement and Processing. **Cultural Heritage Imaging**, p. 1–11, 2015.

DECEA. **RPA / Drone**. Disponível em: <<https://www.decea.gov.br/?i=utilidades&p=rpa-drone>>. Acesso em: 10 jan. 2019.

DEVOLD, H. **Oil and Gas Production Handbook: An Introduction to Oil and Gas Production**. [s.l.] Lulu.com, 2013.

DJI. **DJI-OnBoardSDK-ROS**. Disponível em: <<https://github.com/dji-sdk/Onboard-SDK-ROS>>. Acesso em: 10 ago. 2022.

DJI. Matrice 200 Series V2. **DJI.com**, 2019a.

DJI. **OnBoard SDK Documentation**. Disponível em: <<https://developer.dji.com/onboard-sdk/documentation>>. Acesso em: 16 abr. 2020b.

DJI. **DJI Website**. Disponível em: <<https://www.dji.com/br/>>. Acesso em: 2 abr. 2023.

ENGINEERING, S. **UgCS**. Disponível em: <<https://www.ugcs.com/>>. Acesso em: 11 out. 2021.

FENG, Y. et al. Learning-based autonomous uav system for electrical and mechanical (E&m) device inspection. **Sensors (Switzerland)**, v. 21, n. 4, p. 1–23, 2021.

FENG, Y.; WANG, J. GPS RTK Performance Characteristics and Analysis. **Journal of Global Positioning Systems**, v. 7, n. 1, p. 1–8, 2008.

FISCHLER, M. A.; BOLLES, R. C. Random sample consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. **Communications of the ACM**, v. 24, n. 6, p. 381–395, 1981.

GEOSENSORI. **GSD – Ground Sample Distance – e sua relação com a fotogrametria**. Disponível em: <<https://www.geosensori.com.br/2020/07/22/gsd-e-sua-relacao-com-a-fotogrametria/>>. Acesso em: 6 jan. 2023.

GOLDBERG, S. B.; MAIMONE, M. W.; MATTHIES, L. Stereo vision and rover navigation software for planetary exploration. **IEEE Aerospace Conference Proceedings**, v. 5, n. March, p. 2025–2036, 2002.

GOM. **GOM Atos.** Disponível em:  
<<https://www.gom.com/index.php?id=1371&L=16>>. Acesso em: 3 set. 2022.

GOM. **Gom Inspect Pro.** Disponível em:  
<[https://www.gom.com/en/products/zeiss-quality-suite/gom-inspect-pro?keyword=gom-inspect&device=c&network=g&gclid=Cj0KCQjw\\_r6hBhDdARIsAMIDhV89zclGYmGWEynSKmqR503KXdbVAXoSpaDuSntyIGLxUB-6QXPS0sUaApkBEALw\\_wcB](https://www.gom.com/en/products/zeiss-quality-suite/gom-inspect-pro?keyword=gom-inspect&device=c&network=g&gclid=Cj0KCQjw_r6hBhDdARIsAMIDhV89zclGYmGWEynSKmqR503KXdbVAXoSpaDuSntyIGLxUB-6QXPS0sUaApkBEALw_wcB)>.  
Acesso em: 7 abr. 2023.

GOODBODY, T. R. H. et al. Benchmarking acquisition parameters for digital aerial photogrammetric data for forest inventory applications: Impacts of image overlap and resolution. **Remote Sensing of Environment**, v. 265, n. February, p. 112677, 2021.

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, 2006.

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.

GROVES, P. D. **Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems**. 1. ed. [s.l.] Artech House, 2008.

HE, K. et al. Mask R-CNN. 20 mar. 2017.

HOFMANN, A. C. H. Sistema Endoscópico Estereoscópico para Medição Geométrica de Uniões Soldadas de Dutos. p. 94, 2006.

HUANG, T. S. Computer Vision: Evolution and Promise. **19th CERN School of Computing**, p. 21–25, 1997.

INERTIALSENSE. **RTK Precision Positioning**. Disponível em:  
<[https://docs.inertialsense.com/user-manual/gnss/rtk\\_positioning\\_overview/](https://docs.inertialsense.com/user-manual/gnss/rtk_positioning_overview/)>.  
Acesso em: 2 jun. 2022.

INSTITUTE, A. P. Recommended practice for flexible pipe. **API Recommended Practice**, n. 17 B2, 1998.

INTEL®. **OpenCV Library**. Disponível em: <<https://docs.opencv.org/>>.  
Acesso em: 10 abr. 2020.

JIMÉNEZ-JIMÉNEZ, S. I. et al. Digital terrain models generated with low-cost UAV photogrammetry: Methodology and accuracy. **ISPRS International Journal of**



**Geo-Information**, v. 10, n. 5, 2021.

JOSEPH, L. **Mastering ROS for Robotics Programming**. [s.l.: s.n.]. v. 22

JOSEPH, L. **Robot Operating System (ROS) for Absolute Beginners**. 1. ed. [s.l.] Apress, Berkeley, CA, 2018.

JPT. Hybrid Ultradeepwater-Riser Configuration Saves Costs, Pushes Depths.

**Jornal of Petroleum Technology**, 2020.

KABBABE POLEO, K.; CROWTHER, W. J.; BARNES, M. Estimating the impact of drone-based inspection on the Levelised Cost of electricity for offshore wind farms. **Results in Engineering**, v. 9, n. December 2020, p. 100201, 2021.

KEMAJOU, V. N.; BAO, A.; GERMAIN, O. Wellbore schematics to structured data using artificial intelligence tools. **Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference**, v. 2019-May, n. May, 2019.

KHALOO, A. et al. Unmanned aerial vehicle inspection of the Placer River Trail Bridge through image-based 3D modelling. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 14, n. 1, p. 124–136, 2018.

KONOLIGE, K.; OPENCV. **cv::StereoBM Class Reference**. Disponível em: <[https://docs.opencv.org/3.4/d9/dba/classcv\\_1\\_1StereoBM.html](https://docs.opencv.org/3.4/d9/dba/classcv_1_1StereoBM.html)>. Acesso em: 14 nov. 2020.

KRIZHEVSKY, A.; SUTSKEVER, I.; HINTON, G. E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. **Communications of the ACM**, v. 60, n. 6, p. 84–90, 24 maio 2017.

LAMBERT, J. **Stereo and Disparity**. Disponível em: <<https://johnwlambert.github.io/stereo/>>. Acesso em: 4 jun. 2022.

LANGÅKER, H. A. et al. An autonomous drone-based system for inspection of electrical substations. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, v. 18, n. 2, p. 1–15, 2021.

LECUN, Y.; BENGIO, Y.; HINTON, G. Deep learning. **Nature**, v. 521, n. 7553, p. 436–444, 2015.

LEUTENEGGER, S.; CHLI, M.; SIEGWART, R. Y. BRISK: Binary Robust invariant scalable keypoints. **Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision**, p. 2548–2555, 2011.

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

LINDER, W. **Digital Photogrammetry**. 4. ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.

LIU, W. et al. SSD: Single Shot MultiBox Detector. 7 dez. 2015.

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

MACHADO, M. **Sistema estéreo embarcado em RPAS aplicado a fotogrametria para medição de cenas não preparadas**. [s.l: s.n.].

MAHTWORKS. **Matlab**.

MARCELLINO, G. C. **Influência de Parâmetros Fotogramétricos na Inspeção Tridimensional de Risers Flexíveis**. [s.l: s.n.].

MAURO DE MORAIS, J. **PETRÓLEO EM ÁGUAS PROFUNDAS**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada ipea, 2013a.

MAURO DE MORAIS, J. **Petróleo em águas profundas: Uma história tecnológica da PETROBRAS na exploração e produção offshore**. [s.l: s.n.].

MENNA, F. et al. Towards online UAS-based photogrammetric measurements for 3D metrology inspection. **The Photogrammetric Record**, v. 35, n. 172, p. 467–486, 18 dez. 2020.

METASHAPE. **Coded targets and Scale bars**. Disponível em: <<https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000148855-coded-targets-and-scale-bars>>.

MORE, J. J; SORENSEN, D. C. Newthon's Method. **Laboratorio Nacional de Argonne**, p. 1–48, 1982.

MOREL, J.; YU, G. On the consistency of the SIFT Method. **Preprint, CMLA**, p. 1–17, 2008.

NIKOLIC, J. et al. A UAV system for inspection of industrial facilities. **IEEE Aerospace Conference Proceedings**, n. October 2015, 2013a.

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

NOORALISHAHI, P. et al. Drone-based non-destructive inspection of industrial sites: A review and case studies. **Drones**, v. 5, n. 4, p. 1–29, 2021.

NVIDIA. **Kit Desenvolvimento Jetson Nano 4GB**. Disponível em: <<https://www.nvidia.com.br/kit-desenvolvedor-jetson-nano-4gb/>>. Acesso em: 2 abr. 2023.

NVIDIA. **JetPack SDK**. Disponível em:

<<https://developer.nvidia.com/embedded/jetpack>>. Acesso em: 5 out. 2022.

OPEN SOURCE ROBOTICS FOUNDATION. **ROS Concept**. Disponível em: <<http://wiki.ros.org/ROS/Concepts>>. Acesso em: 10 abr. 2020.

OPENCV. **Geometric Image Transformations - stereoRetify**. Disponível em:

<[https://docs.opencv.org/3.4/d9/d0c/group\\_\\_calib3d.html#ga617b1685d4059c6040827800e72ad2b6](https://docs.opencv.org/3.4/d9/d0c/group__calib3d.html#ga617b1685d4059c6040827800e72ad2b6)>. Acesso em: 11 nov. 2022a.

OPENCV. **Geometric Image Transformations - initUndistortRectifyMap**. Disponível em:

<[https://docs.opencv.org/3.4/da/d54/group\\_\\_imgproc\\_\\_transform.html#ga7dfb72c9cf9780a347fbe3d1c47e5d5a](https://docs.opencv.org/3.4/da/d54/group__imgproc__transform.html#ga7dfb72c9cf9780a347fbe3d1c47e5d5a)>. Acesso em: 5 nov. 2022b.

OPENCV. **OpenCV.org**. Disponível em: <<https://opencv.org/>>. Acesso em: 10 out. 2022a.

OPENCV. **DisparityWLSFilter Class Reference**. Disponível em: <[https://docs.opencv.org/3.4/d9/d51/classcv\\_1\\_1ximgproc\\_1\\_1DisparityWLSFilter.html](https://docs.opencv.org/3.4/d9/d51/classcv_1_1ximgproc_1_1DisparityWLSFilter.html)>. Acesso em: 15 dez. 2022b.

OPENCV. **Computer Vision Anotation Tool**. Disponível em: <<https://www.cvat.ai/>>. Acesso em: 12 out. 2022c.

PAOLI, O. A. M. DE. **Localização em Redes GSM II: Métodos de Localização**. Disponível em: <[https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutoriallocgsm2/pagina\\_2.asp](https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutoriallocgsm2/pagina_2.asp)>. Acesso em: 2 jun. 2022.

PETROBRAS. **Bacia de Campos**. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/bacias/bacia-de-campos.htm>>. Acesso em: 4 jan. 2023a.

PETROBRAS. **Petrobras**. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/pt/>>. Acesso em: 4 jan. 2023b.

PETROBRAS. **Pré-Sal**. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>>. Acesso em: 4 jan. 2023.

PINTO, T. L. F. DA C. **Medição óptica, comparação e sinalização de superfícies com forma livre de grande extensão**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

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

REDMON, J. **Darknet: Open Source Neural Networks in C.** Disponível em: <<http://pjreddie.com/darknet/>>. Acesso em: 5 out. 2022a.

REDMON, J. **Tiny Darknet.** Disponível em: <<https://pjreddie.com/darknet/tiny-darknet/>>. Acesso em: 10 out. 2022b.

REDMON, J. et al. You only look once: Unified, real-time object detection. **Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**, v. 2016- Decem, p. 779–788, 2016.

REDMON, J. et al. YOLO - You Only Look Once. 2017.

REDMON, J.; FARHADI, A. YOLOv3: An Incremental Improvement. 2018.

REGNER, D. J. et al. Object tracking control using a gimbal mechanism. 2018.

REGNER, D. J. et al. OBJECT TRACKING CONTROL USING A GIMBAL MECHANISM. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLIII-B1-2, p. 189–196, 28 jun. 2021.

REGNER, D. J. et al. **Inspeção Tridimensional Remota de Risers em Plataformas Offshore Utilizando Drones.** Anais do 11º Congresso Brasileiro de Petróleo e Gás. **Anais...Galoa**, 2022. Disponível em: <[https://proceedings.science/proceedings/100328/\\_papers/159495](https://proceedings.science/proceedings/100328/_papers/159495)>

REN, S. et al. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 39, n. 6, p. 1137–1149, 2017.

RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L. G.; TASSINARI, C. C. G. Pré-sal: geologia e exploração. **Revista USP**, v. 0, n. 95, p. 33, 2012.

ROS.ORG. **ROS Melodic Morenia.** Disponível em: <<http://wiki.ros.org/melodic>>. Acesso em: 10 maio. 2022.

RUBLEE, E. et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF. **Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision**, p. 2564–2571, 2011.

RUDER, S. An overview of gradient descent optimization algorithms. p. 1–14, 2016.

SCHOBBERL, M. et al. **Modeling of image shutters and motion blur in analog and digital camera systems.** 2009 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). **Anais...IEEE**, nov. 2009. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5413842/>>

SHAH, B. **Complete guide to Object Detection using Deep Learning.**

Disponível em: <<https://17bce011.medium.com/complete-guide-to-object-detection-using-deep-learning-23ffc99ab072>>. Acesso em: 16 jun. 2022.

SHAHMORADI, J. et al. A comprehensive review of applications of drone technology in the mining industry. **Drones**, v. 4, n. 3, p. 1–25, 2020.

SRIVANTAVA, P.; PETROPOULOS, G.; KERR, Y. H. **Satellite Soil Moisture Retrieval**. 1. ed. [s.l.] Elsevier, 2016.

STIVANELLO, M. E. Desenvolvimento De Uma Biblioteca Para Sistemas De Visão Estereoscópica Para Robótica Móvel. p. 116 f, 2008.

THOMAS LUHMAN, STUART ROBSON, STEPHEN KYLE, I. H. **Close range photogrammetry: Principles, techniques and applications**. [s.l.] Gardners Books, Luhmann, Thomas., Robson, Stuart,Whittles Publishing, 2011.

VERAS, F. B. Fusão da visão estéreo passiva e ativa para inspeção industrial. 2022.

VIERA, G. DA S. **Disparity map production : an architectural proposal and a refinement method design**. [s.l: s.n.].

VIOLA, P.; JONES, M. Robust Real-time Object Detection. **International Journal of Computer Vision**, 2001.

WANNINGER, L.; HESSELBARTH, A.; FREVERT, V. Garmin GPSMAP 66sr : Assessment of Its GNSS Observations. n. March, 2022.

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

ZHAN, W. et al. An improved Yolov5 real-time detection method for small objects captured by UAV. **Soft Computing**, v. 26, n. 1, p. 361–373, 2022.

ZHANG, X. et al. How well do deep learning-based methods for land cover classification and object detection perform on high resolution remote sensing imagery? **Remote Sensing**, v. 12, n. 3, p. 1–29, 2020.

ZHANG, Y. et al. UAV low altitude photogrammetry for power line inspection. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 6, n. 1, 2017.

ZHAO, Z. Q. et al. Object Detection with Deep Learning: A Review. **IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems**, v. 30, n. 11, p. 3212–3232, 2019.

ZHENG, L.; TIDROW, M. Analyses of infrared focal plane array figure of merit and its impact on sensor system trades. **Infrared Physics & Technology**, v. 52, n. 6, p. 408–411, nov. 2009.



## APÊNDICE A – Análise Correlação Parâmetros

Tabela dos parâmetros utilizados para análise de correlação separada por ensaio realizado com sua data específica.

<i>Data</i>	<i>Ensaio</i>	<i>Média E medição</i>	<i>Fnumber AVG</i>	<i>Fnumber STD</i>	<i>RMS VAR GPS</i>	<i>RMS STD GPS</i>
19/01/2023	ROS_T01	-3.32%	3.6071	0.2076	3.7121	0.0654
19/01/2023	ROS_T02	1.42%	3.2786	0.2425	3.695	0.097
19/01/2023	ROS_T03	-4.74 %	4.1357	0.5207	4.5207	1.0634
19/01/2023	ROS_T04	-2.26%	5.7738	1.1445	3.8613	0.1741
19/01/2023	ROS_T05	-3.50%	7.1071	1.4254	3.7015	0.2239
19/01/2023	ROS_T06	1.75%	6.269	2.0379	3.8456	0.4509
19/01/2023	ROS_T07	-1.55%	3	0.7622	3.7583	0.2508
19/01/2023	ROS_T08	-0.60%	3.3595	0.3313	3.8884	0.4005
17/03/2023	ROS_T01	0.30%	3.4714	0.594	4.2713	0.2325
17/03/2023	ROS_T02	0.33%	4.1071	0.6937	4.3622	0.5675
17/03/2023	ROS_T03	3.78%	4.3429	1.1443	4.845	0.8061
17/03/2023	ROS_T04	3.93%	5.4476	0.5832	4.7488	0.6597
17/03/2023	ROS_T05	0.92%	6.2025	0.8377	5.0445	0.4869
17/03/2023	ROS_T06	2.76%	5.6071	1.3582	4.8013	0.4096
25/03/2023	ROS_T01	0.24%	3.1905	0.2116	4.8474	0.3173
25/03/2023	ROS_T02	0.08%	3.6881	0.268	5.3403	0.5385
25/03/2023	ROS_T03	-0.39%	3.8103	0.2469	5.0335	0.3081
25/03/2023	ROS_T04	-0.68%	3.881	0.2422	4.8706	0.522
25/03/2023	ROS_T05	-0.68%	3.75	0.253	4.4084	0.3575
25/03/2023	ROS_T06	-0.73%	3.4238	0.2574	4.2926	0.366
25/03/2023	ROS_T07	3.90%	3.1024	0.2363	3.455	0.1062
02/04/2023	ROS_T01	-2.92%	6.2762	0.3655	6.6948	0.8264
02/04/2023	ROS_T02	6.63%	5.0367	0.6871	5.1338	0.6726
02/04/2023	ROS_T03	4.56%	2.5175	0.6687	4.9715	0.5144

21/04/2023	ROS_T01	-0.18%	3.1238	0.1609	5.0774	0.7989
21/04/2023	ROS_T02	-0.18%	2.981	0.2015	4.2869	0.4422
21/04/2023	ROS_T03	2.64%	3.2881	0.2308	4.2187	0.4245
21/04/2023	ROS_T04	-3.59%	3.7524	0.2856	4.6036	0.3812
21/04/2023	ROS_T06	-8.80%	3.4452	0.303	5.0716	0.5302
21/04/2023	ROS_T07	-2.13%	3.9881	0.3022	4.0182	0.1921
22/04/2023	ROS_T01	2.66%	3.4738	0.1639	4.0663	0.2495
22/04/2023	ROS_T02	-3.81%	3.5905	0.3011	3.7748	0.3058
22/04/2023	ROS_T03	-7.00%	3.881	0.3952	3.4739	0.2517
22/04/2023	ROS_T04	-1.61%	4.4786	0.3886	3.363	0.333
23/04/2023	ROS_T01	4.05%	2.731	0.1522	3.9046	0.0835
23/04/2023	ROS_T02	-3.46%	2.6929	0.1455	3.5612	0.1056
23/04/2023	ROS_T03	-1.50%	2.8667	0.1509	3.3164	0.145
23/04/2023	ROS_T04	-5.63%	3.3974	0.1678	3.2878	0.1966