



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

Vinícius Conti da Costa

**Avaliação de uso de um LiDAR e algoritmos ICP (*Iterative Closest Point*) para inspeção
de curta distância**

Florianópolis
2023

Vinícius Conti da Costa

**Avaliação de uso de um LiDAR e algoritmos ICP (*Iterative Closest Point*) para inspeção
de curta distância**

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

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

Coorientador: Prof. Henrique Simas, Dr. Eng.

Florianópolis

2023

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

Costa, Vinícius Conti da
Avaliação de uso de um LiDAR e algoritmos ICP (Iterative Closest Point) para inspeção de curta distância / Vinícius Conti da Costa ; orientador, Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, coorientador, Henrique Simas, 2023.
114 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. Inspeção industrial. 3. Metrologia óptica. 4. Iterative closest points (ICP). 5. LiDAR. I. Pinto, Tiago Loureiro Figaro da Costa. II. Simas, Henrique. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Vinícius Conti da Costa

**Avaliação de uso de um LiDAR e algoritmos ICP (*Iterative Closest Point*) para
inspeção de curta distância**

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

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

Prof. Mauricio Campos Porath, Dr.-Ing.
Hamburg University of Applied Sciences (HAW Hamburg)

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

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

Prof. Henrique Simas, Dr. Eng.
Coordenação do Programa de Pós-Graduação
Coorientador

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

Florianópolis, 2023.

Este trabalho é dedicado aos meus pais pelo amor incondicional, à minha noiva pela parceria e paciência, à minha irmã pelas palavras de conforto, e à Deus pela perseverança.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me garantiu sanidade e me cercou de pessoas maravilhosas, que me fizeram mais forte e perseverante.

Ao professor Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto pela orientação, paciência e compreensão. A oportunidade de fazer parte do VANT3D e a experiência compartilhada me fizeram ter a certeza do caminho que eu gostaria de seguir.

Ao professor e coorientador Henrique Simas, que se dispôs a corrigir e compartilhar seu ponto de vista técnico e profissional para contribuir com meu desenvolvimento.

Aos meus pais, Simone Conti da Silva Costa e Marco Aurélio da Costa, que fizeram de tudo, possível e impossível, para que eu pudesse sonhar, realizar e chegar até aqui. A minha vida, eu dedico vocês.

À minha irmã, Pâmela Andrade, que foi, é e sempre será um dos mais fortes pilares de minha vida. Tuas palavras de conforto, tua sensatez e firmeza nos momentos de falar sério, e tua empatia; são divinos. O meu mais profundo carinho, eu dedico a ti.

À minha noiva, Natiele Monteiro, meu porto seguro, que lutou ao meu lado, que viveu minhas dores, que segurou minha mão quando as coisas pareciam estar desabando. O meu mais puro e sincero amor, eu dedico a ti.

A todos os colegas do VANT3D e do Labmetro, que contribuíram no desenvolvimento da minha dissertação. Filipe, Guilherme, Tainara, Hamilton, Daniel, Tiago e demais.

Um agradecimento especial aos amigos Moacir e Pedro, que foram parte fundamental do meu crescimento e foram suporte nos momentos mais difíceis. A vocês, dedico minha gratidão.

Ao CNPq e à Petrobras, que forneceram apoio financeiro necessário para concluir meus estudos.

À Fundação CERTI, pela solicitude, pela prontidão e pela disposição em sempre ajudar com procedimentos laboratoriais e apoio intelectual.

Ao Labmetro, por me acolher e me prover todos os recursos necessários para o bom andamento da pesquisa. Um agradecimento especial à Rosana, pelo incessante apoio pedagógico e administrativo ao longo destes anos. Seu papel é fundamental na instituição, e tens meu apreço e admiração.

RESUMO

A indústria de petróleo brasileira é uma das maiores adeptas ao uso de técnicas de extração de petróleo com o uso de *risers* flexíveis, que são estruturas tubulares utilizadas para o transporte seguro do material entre os poços de exploração de petróleo e as plataformas *offshore*. Dada sua importância, é essencial que sejam inspecionados periodicamente. Os procedimentos de inspeção atuais utilizados para a região dos dutos acima da lâmina d'água estão, em sua maioria, atreladas a técnicas de alpinismo industrial, que emprega alto risco nas operações, além de custo e tempo elevados. Como forma de reduzir a periculosidade das inspeções, aeronaves remotamente pilotadas (UAV) podem ser utilizadas para inspecionar a camada externa dos risers com o uso de métodos ópticos. Comumente, câmeras são utilizadas para esse tipo de inspeção, mas há outras opções de sensores e sistemas ópticos a serem utilizados, como é o caso dos radares a laser (LiDAR). Esses sensores utilizam princípios de medição ativos, e emitem feixes laser para capturar a distância entre o mensurando e o sistema de medição, e podem ser utilizados para avaliar quantitativamente as superfícies que o sensor mede através do processamento de nuvens de pontos. As vantagens de uso de um LiDAR para inspeções sem contato se dão por se tratar de um equipamento que não depende de iluminação ambiente para seu uso, podendo ser usado em ambientes de baixa incidência de luz visível; por ter uma alta taxa de aquisição de informação e por seu tempo de processamento ser relativamente baixo quando comparado com outras técnicas de inspeção óptica. No entanto, radares a laser normalmente não possuem sistemas de navegação em sua montagem de fábrica, necessitando muitas vezes a integração com sensores inerciais e de navegação ou de operações matemáticas de refinamento de trajetória, como as técnicas de *Iterative Closest Points* (ICP) e filtros de *Kalman*. Essa dissertação de mestrado trata do desenvolvimento de técnicas de inspeção de curta distância utilizando um LiDAR como sistema de medição, e técnicas de ICP ponto a ponto e ponto a plano para definir posição e orientação do sistema. As análises foram feitas a partir de capturas de nuvens de pontos consecutivas, cada qual com sua respectiva localização, realizando assim a concatenação das nuvens de pontos e a reconstrução 3D de simulacros de riser, possibilitando sua inspeção dimensional. Durante o desenvolvimento, foram exploradas técnicas de estimação de estado e metodologias para calcular incertezas de medição a curtas distâncias utilizando um LiDAR. O sistema foi validado experimentalmente através da comparação entre os resultados adquiridos com o sistema de medição e as superfícies e geometrias de referência, possibilitando avaliar o desempenho de medição a curta distância e a influência do uso de algoritmos de refinamento de trajetória.

Palavras-chave: LiDAR, Estimação de estado, ICP, Inspeção industrial, Nuvem de pontos.

ABSTRACT

The Brazilian oil and gas industry is one of the biggest users of oil extraction techniques based on flexible risers, which are cylindrical structures used for safe extraction between off-shore platforms and the wells. Giving its importance, it's essential that the equipment be inspected periodically. The actual inspection procedures for surface above water are related to industrial climbing, which demands not just high-risk operations, but high cost and time. As a way to reduce inspections dangerousness, unmanned aerial vehicles (UAV) can be used to inspect the risers' external surface with the usage of optical methods, like Light Detection and Ranging (LiDAR). These sensors use active measurement principles and emit laser beams to capture the distance between measurand and measurement system and can be used to quantitatively evaluate surfaces through point cloud processing. The advantages of using a LiDAR for touchless inspection are because it's an equipment that doesn't depend on environment lightning during the usage, which can be used at night or in low light environments; because has high frequency data acquisition and because of its time processing when compared with other optical techniques. However, LiDARs normally don't have navigation systems in themselves, demanding inertial sensors or state estimation mathematical operations to define trajectory, like Iterative Closest Points (ICP) and Kalman filters. This master dissertation talks about the development of short-range inspection techniques using a LiDAR as the measurement system and ICP techniques, point to point and point to plane, to define position and orientation of the system. The analysis was made based on the result of the consecutive point clouds captures, each one with its respective estimated localization, realizing merge of the point clouds and risers 3D reconstruction, being able to do dimensional inspection. During the development, state estimation techniques were explored, as well as methodologies to calculate short range measurement uncertainties using LiDAR. The system was experimentally validated through comparison between acquired results with the measurement system and reference geometries, making possible evaluate short range measurement performance and the influence of the usage of ICP algorithms to trajectory refinement.

Keywords: LiDAR, State Estimation, ICP, Industrial Inspection, Point Clouds.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da produção <i>onshore</i> e <i>offshore</i> no Brasil.	25
Figura 2 – Unidades bombeadoras terrestres em campo de exploração de petróleo <i>onshore</i>	26
Figura 3 – Produção de petróleo no Brasil.	27
Figura 4 – Plataformas <i>offshore</i> . a) Plataforma fixa com sistema de estacas cravadas; b) Navio plataforma FPSO.	28
Figura 5 – <i>Risers</i> flexíveis. a) Plataforma fixa com <i>risers</i> flexíveis em operação; b) Seção de um <i>riser</i> flexível.	29
Figura 6 – Representação da rede de dutos para extração de petróleo.	30
Figura 7 – Configurações de <i>risers</i> . a) <i>Free-hanging catenary</i> ou catenária livre; b) <i>Lazy wave</i> ; c) <i>Steep wave</i> ; d) <i>Lazy S</i> ; e) <i>Steep S</i>	30
Figura 8 – Deformações em <i>risers</i> flexíveis. a) Efeito “gaiola de passarinho”; b) Efeito “coração”.	32
Figura 9 – Defeitos em <i>risers</i> flexíveis. a) <i>Pullout</i> de pressão na camada plástica interna de um <i>riser</i> flexível; b) Colapso da carcaça intertravada; c) Ruptura na armadura de tração causada por fadiga; d) dano na camada plástica externa de um <i>riser</i>	33
Figura 10 – Escalador industrial inspecionando a superfície externa de um <i>riser</i> flexível.	34
Figura 11 – Inspeção industrial utilizando veículos remotamente pilotados. a) Inspeção de aerogerador em parque <i>offshore</i> utilizando UAV; b) Inspeção subaquática de leme náutico utilizando ROUV.	35
Figura 12 – Inspeção termográfica de dutos para transporte de fluidos. a) UAV realizando inspeção; b) Imagem da câmera térmica utilizada na inspeção.	36
Figura 13 – Inspeção óptica de uma ponte utilizando um LiDAR. a) UAV realizando a operação de captura com um LiDAR. b) Resultado da reconstrução 3D a partir dos dados do LiDAR.	37
Figura 14 – Trechos de inspeção de duto flexível.	38
Figura 15 – Elementos que constituem um UAS.	41
Figura 16 – Tipos de sensores para UAVs.	42
Figura 17 – Princípio de triangulação na fotogrametria.	44
Figura 18 – Fotogrametria de curta distância de um objeto. a) Fotografia real de um objeto texturizado com tinta preta. b) Resultado da fotogrametria realizada em a). c)	

Procedimento de rotação sobre o objeto no eixo longitudinal. d) Procedimento de rotação sobre o objeto no eixo transversal.	45
Figura 19 – Desenho representativo de uma câmera <i>pinhole</i>	45
Figura 20 – Modelo de câmera <i>pinhole</i>	46
Figura 21 – Modelo de sistema estéreo caseiro.....	46
Figura 22 – Representação de um sistema estéreo.	47
Figura 23 – Aquisições de uma mesma cena a partir de ângulos diferentes.	48
Figura 24 – Projeção de luz estruturada como forma de adicionar textura na cena para posterior medição.....	48
Figura 25 – Diagrama conceitual de um LiDAR. O sistema inicia no gerador de forma de onda, e essa onda é transmitida pelo transmissor laser. Ao iniciar a transmissão, o tempo de voo começa a ser contado pela eletrônica de controle e processamento. O laser realiza seu curso, saindo de Tx (transmissor), percorrendo a atmosfera local, até encontrar com o alvo. Após isso, o laser é refletido e captado pelo Rx (Receptor), que irá filtrar o sinal de retorno, e chegará ao detector, onde irá parar o contador e registrar a leitura.....	49
Figura 26 – Aplicação de LiDAR 3D com múltiplos emissores em veículos autônomos. a) Veículos autônomos da Google utilizando LiDARs 3D de 64 canais, sinalizados pelas setas vermelhas. b) Representação de captura de uma revolução de um LiDAR 3D de 64 canais em um veículo autônomo.....	51
Figura 27 – Sistema de referência de um LiDAR multicanais rotativo.	52
Figura 28 – Representação de pontos capturados por um LiDAR em um sistema de coordenadas global.	54
Figura 29 – Representação de funcionamento simplificado de um GNSS.	55
Figura 30 – Modelo comercial de um sensor IMU.	56
Figura 31 – Modelo simplificado de um acelerômetro.	56
Figura 32 – Funcionamento de um giroscópio microeletromecânico (MEMS). O frame interno e a massa ressonante se deslocam lateralmente devido ao efeito <i>Coriolis</i> . O deslocamento é calculado pela variação da capacitância do sensor de deslocamento	57
Figura 33 – Princípio de funcionamento de um sistema RTK/PPK.....	61
Figura 34 – Processo de alinhamento de duas nuvens de pontos utilizando ICP.....	63
Figura 35 – Representação do ICP ponto a plano.	64
Figura 36 – Representação do movimento de um sistema UAV + LiDAR para capturas consecutivas de nuvens de pontos para inspeção de dutos.....	65

Figura 37 – Fluxograma de trabalho.	66
Figura 38 – Fluxograma de ICP.	67
Figura 39 – <i>Velodyne Puck-LITE</i>	68
Figura 40 – Setup básico de funcionamento do LiDAR <i>Velodyne Puck-LITE</i>	70
Figura 41 – Representativo das montagens utilizadas para os experimentos 1, 2, 3 e 4. a) Montagem A; b) Montagem B.	71
Figura 42 – Representação do movimento da montagem A.	72
Figura 43 – Representação do movimento da montagem B.	73
Figura 44 – Simulacro <i>riser</i>	74
Figura 45 – Painel em madeira.	75
Figura 46 – Visão geral das montagens. a) Montagem A; b) Montagem B.	76
Figura 47 – Detalhes da Montagem A. a) Interferômetro e simulacro <i>riser</i> ; b) Guia do interferômetro e o painel em madeira; c) Sistema de medição.	76
Figura 48 – Pontos incidentes sobre o painel em madeira após concatenação das nuvens de pontos.	77
Figura 49 – Pontos incidentes sobre simulacro <i>riser</i> após concatenação das nuvens de pontos.	78
Figura 50 – Detalhes da Montagem B. a) Interferômetro e simulacro <i>riser</i> ; b) Guia do interferômetro e sistema de medição; b) Sistema de medição.	79
Figura 51 – Representação gráfica da concatenação de nuvens de pontos usando o ICP ponto a ponto no experimento 01.	81
Figura 52 – Gráfico Erro x Deslocamento do experimento 1.	82
Figura 53 - Representação gráfica da concatenação de nuvens de pontos usando o ICP ponto a ponto no experimento 3.	83
Figura 54 - Gráfico Erro x Deslocamento do experimento 3.	83
Figura 55 – Gráfico Deslocamento x Medição do Experimento 1.	85
Figura 56 – Gráfico Deslocamento x Medição do Experimento 2.	85
Figura 57 – Gráfico Deslocamento x Medição do Experimento 3.	86
Figura 58 – Gráfico Deslocamento x Medição do Experimento 4.	86
Figura 59 – Representação de uma única nuvem de pontos comparada com um plano gerado computacionalmente.	87
Figura 60 – Comparação entre nuvem de pontos do experimento 1 e primitivo geométrico plano gerado computacionalmente. a) Comparação com algoritmo de ICP ponto a ponto; b) Comparação com algoritmo de ICP ponto a plano.	88

Figura 61 – Comparação entre nuvem de pontos do experimento 2 e primitivo geométrico plano gerado computacionalmente. a) Comparação com algoritmo de ICP ponto a ponto; b) Comparação com algoritmo de ICP ponto a plano. 89

Figura 62 – Comparativo entre resultados de análise de desvio entre experimentos 1 e 2 (vista lateral). a) Experimento 1, ICP ponto a ponto; b) Experimento 1, ICP ponto a plano; c) Experimento 2, ICP ponto a ponto; d) Experimento 2, ICP ponto a plano. 90

Figura 63 – Gráfico de erro de diâmetro por captura. 92

Figura 64 – Comparação entre nuvem de pontos do experimento 1 e primitivo geométrico cilíndrico gerado computacionalmente. a) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir de um *bestfit* de todos os pontos com algoritmo de ICP ponto a ponto; b) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir do CAD do simulacro *riser* com algoritmo de ICP ponto a ponto; c) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir de um *bestfit* de todos os pontos com algoritmo de ICP ponto a plano; d) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir do CAD do simulacro *riser* com algoritmo de ICP ponto a plano. 93

Figura 65 – Comparação entre nuvem de pontos do experimento 2 e primitivo geométrico cilíndrico gerado computacionalmente. a) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir de um *bestfit* de todos os pontos com algoritmo de ICP ponto a ponto; b) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir do CAD do simulacro *riser* com algoritmo de ICP ponto a ponto; c) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir de um *bestfit* de todos os pontos com algoritmo de ICP ponto a plano; d) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir do CAD do simulacro *riser* com algoritmo de ICP ponto a plano. 95

Figura 66 – Comparação entre nuvem de pontos do experimento 3 e primitivo geométrico cilíndrico gerado computacionalmente. a) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir de um *bestfit* de todos os pontos com algoritmo de ICP ponto a ponto; b) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir do CAD do simulacro *riser* com algoritmo de ICP ponto a ponto; c) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir de um *bestfit* de todos os pontos com algoritmo de ICP ponto a plano; d) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir do CAD do simulacro *riser* com algoritmo de ICP ponto a plano. 96

Figura 67 – Comparação entre nuvem de pontos do experimento 4 e primitivo geométrico cilíndrico gerado computacionalmente. a) Comparação das nuvens de pontos com

um cilindro formato a partir de um <i>bestfit</i> de todos os pontos com algoritmo de ICP ponto a ponto; b) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir do CAD do simulacro <i>riser</i> com algoritmo de ICP ponto a ponto; c) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir de um <i>bestfit</i> de todos os pontos com algoritmo de ICP ponto a plano; d) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir do CAD do simulacro <i>riser</i> com algoritmo de ICP ponto a plano.	98
Figura 68 – Erro de diâmetro do cilindro por experimento.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de <i>risers</i> flexíveis.	31
Tabela 2 – Classificação de defeitos encontrados em <i>risers</i> flexíveis.	32
Tabela 3 – Setores da indústria com aplicações para UAVs.	36
Tabela 4 – Procedimentos de inspeção de Duto Flexível (PIDF).	37
Tabela 5 – Nomenclaturas de aeronaves remotamente pilotadas.	40
Tabela 6 – Classificação da ANAC em relação ao PMD.	41
Tabela 7 – Comparativo de atributos entre sistemas ópticos para inspeção industrial.	43
Tabela 8 – Definição de graus de liberdade em uma IMU.	58
Tabela 9 – Filtros de Kalman.	60
Tabela 10 – Especificações técnicas do LiDAR <i>Velodyne Puck-LITE</i>	69
Tabela 11 – Configurações do LiDAR.	70
Tabela 12 – Softwares utilizados.	70
Tabela 13 – Número de capturas e número de pontos de cada experimento.	80
Tabela 14 – Resultados do erro de posição do experimento 1.	82
Tabela 15 - Resultados do erro de posição do experimento 3.	84
Tabela 16 – Resultado da comparação entre uma única nuvem de pontos da montagem A e primitivo geométrico plano gerado computacionalmente.	88
Tabela 17 – Resultado das comparações entre nuvem de pontos do experimento 1 e primitivo geométrico plano gerado computacionalmente.	89
Tabela 18 – Resultado das comparações entre nuvem de pontos do experimento 2 e primitivo geométrico plano gerado computacionalmente.	90
Tabela 19 – Avaliação do erro de diâmetro em relação à variação de distância entre sistema de medição e objeto medido.	91
Tabela 20 – Erro estimado do comprimento do cilindro por experimento.	92
Tabela 21 – Resultado das comparações entre nuvem de pontos do experimento 1 e primitivo geométrico cilíndrico gerado computacionalmente.	93
Tabela 22 – Resultado das comparações entre nuvem de pontos do experimento 2 e primitivo geométrico cilíndrico gerado computacionalmente.	95
Tabela 23 – Resultado das comparações entre nuvem de pontos do experimento 3 e primitivo geométrico cilíndrico gerado computacionalmente.	97

Tabela 24 – Resultado das comparações entre nuvem de pontos do experimento 4 e primitivo geométrico cilíndrico gerado computacionalmente.....	98
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

INS	<i>Inertial Navigating System</i>
RTK	<i>Real Time Kinematics</i>
PPK	<i>Post-Processing Kinematics</i>
GNSS	<i>Global Navigating Satellite System</i>
ICP	<i>Iterative Closest Points</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
UAS	<i>Unmanned Aerial System</i>
RPAS	<i>Remotely Piloted Aircraft System</i>
RPA	<i>Remotely Piloted Aircraft</i>
ANP	Agência Nacional de Petróleo
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo
CBIE	Centro Brasileiro de Infraestrutura
FPSO	<i>Floating, Production, Storage and Offloading</i>
TDP	<i>Touchdown Point</i>
PIDF	Procedimento de Inspeção de Duto Flexível
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
ROUV	<i>Remotely Operated Underwater Vehicle</i>
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
RPV	<i>Remotely Piloted Vehicle</i>
GDS	<i>Ground Control Station</i>
PMD	Peso Máximo de Decolagem
MTOW	<i>Maximum Takeoff Weight</i>
3D	Tridimensional
2D	Bidimensional
a.C	Antes de Cristo
ToF	<i>Time of Flight</i>
Tx	<i>Transmitter</i>
Rx	<i>Receiver</i>
WSJ	<i>Wall Street Journal</i>

RGB	<i>Red Green Blue</i>
SLAM	<i>Simultaneous Localization and Mapping</i>
SCG	Sistema de Coordenadas Global
SCM	Sistema de Coordenadas de Medição
GL	Graus de Liberdade
MEMS	<i>Microeletromechanical System</i>
KF	<i>Kalman Filter</i>
EKF	<i>Extended Kalman Filter</i>
UKF	<i>Unscented Kalman Filter</i>
RF	Radiofrequência
PVC	Policloreto de Vinila
NMEA	<i>National Marine Electronics Association</i>
GPRMC	<i>Global Positioning Recommended Minimum</i>
SM	Sistema de Medição
PPS	<i>Points Per Second</i>
I/O	<i>Input Output</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
RPM	Rotações por Minuto
FOV	<i>Field of View</i>
ROS	<i>Robot Operating System</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Câmera Pinhole

$\mathbf{M}$	Ponto no espaço tridimensional nas coordenadas do objeto.
$\mathbf{m}$	Ponto no plano imagem nas coordenadas da câmera.
$[X, Y, Z]$	Vetor posição em coordenadas cartesianas do ponto $\mathbf{M}$.
(u, v)	Coordenadas de um ponto no plano imagem em coordenadas da imagem.
f	Comprimento focal da lente da câmera.
C	Centro óptico da câmera.

Sensor LiDAR

R	Distância entre o LiDAR e o mensurando.
c	Velocidade da luz.
t	Tempo entre transmissão e recepção do feixe laser.
n	Índice de refração no ar.
$[X, Y, Z]$	Coordenadas cartesianas do LiDAR.
ω	Ângulo de elevação.
α	Ângulo de rotação.

Estimação de Estado

t	Vetor translação (3×1) de um corpo rígido.
$[o'_x, o'_y, o'_z]$	Componentes de translação de um corpo rígido.
$\mathbf{R}$	Matriz de rotação (3×3) de um corpo rígido.
$\mathbf{A}$	Matriz homogênea (4×4) de um corpo rígido.
$\begin{bmatrix} x'_x & y'_x & z'_x \\ x'_y & y'_y & z'_y \\ x'_z & y'_z & z'_z \end{bmatrix}$	Componentes de rotação de um corpo rígido.
p_{SCG}	Nuvem de pontos a partir do sistema de coordenadas global.
p_{Li}	Nuvem de pontos a partir do LiDAR.
G_q	Transformação em 6 graus de liberdade de cada nuvem de pontos do sistema de coordenadas de medição para o sistema de coordenadas global.

Cálculos da IMU

$a(t)$	Aceleração em função do tempo.
$v(t)$	Velocidade em função do tempo.
$s(t)$	Deslocamento em função do tempo.
τ	Torque.
L	Momento angular.
I	Momento de inércia.
$\gamma(t)$	Aceleração angular.
$\omega(t)$	Velocidade angular.
$\theta(t)$	Deslocamento angular.

Cálculo do ICP

X	Conjunto de pontos fixo.
Y	Conjunto de pontos que se movimenta.
C	Pares homólogos entre duas nuvens de pontos.
x_n	Ponto x na posição n .
y_n	Ponto y na posição n .
x_i	Ponto x na posição i .
y_j	Ponto y na posição j .
$\bar{y}_i$	Ponto y mais próximo de x na posição i .
n_x	Normal do ponto x .

Cálculo do erro e do desvio padrão

E	Erro de medição.
I	Indicação do sistema de medição.
$\bar{I}$	Média de indicações do sistema de medição.
VVC	Valor verdadeiro convencional.
s	Desvio padrão.
n	Número de amostras.

SUMÁRIO

1	Introdução	25
1.1	Exploração de Petróleo no Brasil	25
1.1.1	Onshore.....	26
1.1.2	Offshore.....	27
1.2	<i>Risers</i>	28
1.2.1	Classificação	30
1.2.2	Defeitos típicos	32
1.2.3	Inspeção de <i>Risers</i>	33
1.3	Inspeção Industrial Utilizando UAV	35
1.4	Apresentação do Problema	37
1.5	Objetivos.....	39
1.5.1	Objetivo Geral.....	39
1.5.2	Objetivos específicos	39
2	Inspeção Óptica Utilizando UAS	40
2.1	UAV.....	40
2.2	Metrologia Óptica.....	42
2.2.1	Fotogrametria	43
2.2.2	Sistema Estéreo	46
2.2.3	LiDAR.....	49
2.2.3.1	<i>Tempo de voo (ToF)</i>	49
2.3	Estimação de Estado	53
2.3.1	GNSS.....	54
2.3.2	IMU	55
2.3.3	INS.....	59
2.3.4	RTK/PPK.....	61

2.4	Fusão de Dados LiDAR-INS	62
2.5	<i>Iterative closest points (ICP)</i>	62
3	Proposta de trabalho	65
4	Materiais e Métodos	68
5	Resultados e Análises	80
5.1	Análise dos experimentos	80
5.2	Discussão	99
6	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	102
6.1	Principais resultados e contribuições.....	102
6.2	Principais limitações.....	104
6.3	Sugestões para trabalhos futuros	104
	Referências	106
	Apêndice A	114

1 INTRODUÇÃO

Esta seção servirá como uma introdução ao processo de exploração de petróleo no Brasil, o uso de *risers* e suas aplicações, os defeitos que podem surgir, como é realizada a inspeção deste equipamento e alternativas para otimizar o processo de inspeção industrial *offshore*.

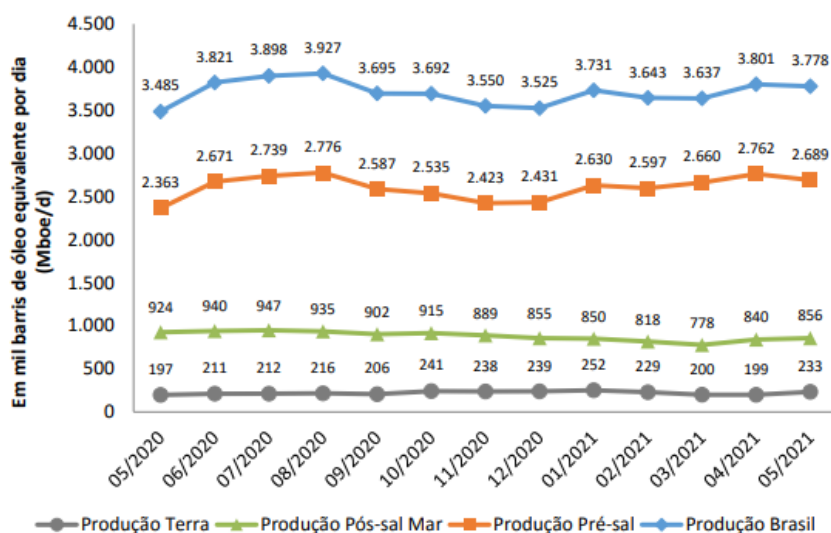
1.1 EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO NO BRASIL

O Brasil tem sua primeira referência oficial relacionada à busca por petróleo na década de 1860, quando o Governo Imperial concedeu uma licença ao empreendedor Thomas Sargent para explorar petróleo, que seria então destinado à fabricação de “óleo para iluminação”. No entanto, só foi dado início à prática da busca por petróleo no Brasil a partir da década de 1920, sendo 1939 o ano da descoberta de petróleo no Brasil em Lobato, na Bahia, no nordeste brasileiro (MORAIS, 2013a)

Em 1953, diante de embates históricos entre setores público e privado pelo monopólio da exploração (DIAS; QUAGLINO, 1993), surge a Petróleo Brasileiro S.A., com a sigla PETROBRAS.

Hoje, o Brasil conta com dois meios de extração de petróleo: *onshore*, denominado à exploração em bacias sedimentares terrestres; e *offshore*, quando a exploração ocorre por vias marítimas, conforme Figura 1.

Figura 1 – Evolução da produção *onshore* e *offshore* no Brasil.



Fonte: (ANP, 2021).

1.1.1 Onshore

Depois da criação da Petrobras, a produção brasileira de petróleo, predominantemente *onshore* em seus primeiros anos de atividade extrativa, cresceu exponencialmente, superando as expectativas da época.

A exploração terrestre ocorre com base em estudos geológicos que delimitam a região de interesse para as escavações. Após abrir o poço para a extração, é possível encontrar duas situações: um petróleo com pressão, onde o petróleo jorra com força para fora da perfuração; ou um petróleo pouco pressurizado, onde é necessária a utilização de unidades bombeadoras (Figura 2) para extrair o combustível (ADRIANO; TEIXEIRA, 2019; FIGUEIREDO, 2017).

Figura 2 – Unidades bombeadoras terrestres em campo de exploração de petróleo *onshore*.

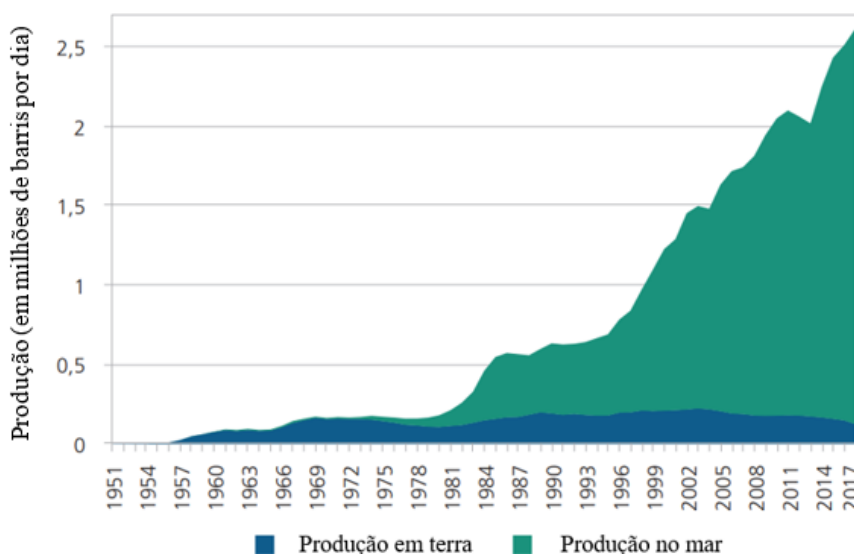


Fonte: (FIGUEIREDO, 2017).

A produção *onshore* é consideravelmente menos produtiva, porém é muito mais barata, e acaba sendo uma boa oportunidade para empresas de pequeno e médio porte realizarem a exploração (CBIE, 2020). Estima-se que em 2018, o Brasil era dividido em mais de 120 canais, com mais de 6.500 poços de exploração em terra, sendo 20% desses de domínio da Petrobras (IBP, 2019; PETRÓLEO, 2017).

Aos poucos, a concentração de esforços da exploração de petróleo foi sendo passada do *onshore* para o *offshore* (Figura 3), logo após a descoberta de grandes reservas marítimas a partir de 1966 (MORAIS, 2013b), tanto em águas rasas, onde iniciaram as explorações, como em águas profundas e ultraprofundas (ADRIANO; TEIXEIRA, 2019).

Figura 3 – Produção de petróleo no Brasil.



Fonte: Adaptado de (ADRIANO; TEIXEIRA, 2019).

Como consequência, a exploração em terra foi sendo significativamente reduzida nas últimas décadas, ao passo em que a exploração *offshore* foi crescendo, sendo 1981 marcado como o fim de uma representação significativa da extração *onshore* na exploração de petróleo no Brasil (ADRIANO; TEIXEIRA, 2019).

1.1.2 Offshore

Dois anos após a decisão de explorar petróleo por vias marítimas (*offshore*), a Petrobras realizou suas primeiras descobertas de petróleo no mar, no campo de Guaricema, em 1968 (MORAIS, 2013b). Desde então, a exploração de petróleo *offshore* cresceu exponencialmente, tornando-se uma das principais atividades produtivas do Brasil, que perdura até os dias de hoje (NETO; COSTA, 2007).

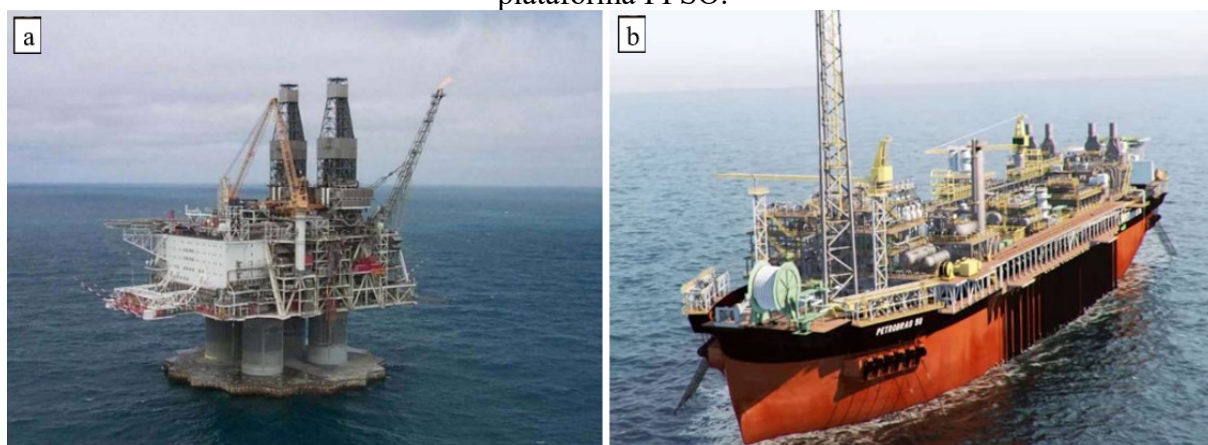
Atualmente, contando com mais de 155 plataformas no oceano (CBIE, 2020), as produções *offshore* correspondem a 92,8% da produção de petróleo no Brasil, com aproximadamente 3,38 milhões de barris de petróleo por dia, sendo 2,24 milhões de barris advindos da produção pré-sal, e 1,14 milhão da produção pós-sal (ANP, 2021).

Diferente da exploração *onshore*, a exploração marítima exige um vasto investimento e um estudo aprofundado deve ser realizado sobre a área a ser explorada, pois precisa compensar todo o custo de instalação, além de outros fatores de riscos ambientais (PETRÓLEO, 2017). A complexidade e dificuldade de instalação, observação e execução em zonas marítimas, são bastante elevadas, e acabam por se tornar obstáculos no desenvolvimento tecnológi-

co de equipamentos e sistemas para as atividades petrolíferas no mar (MORAIS, 2013a). Ao se deparar com certas dificuldades provenientes da atividade no fundo do mar, as empresas exploradoras de petróleo buscaram se relacionar com instituições de pesquisa científica, universidades e empresas detentores de conhecimento para o desenvolvimento das inovações requeridas na exploração e produção *offshore*.

As plataformas utilizadas no Brasil podem ser divididas por gerações. A primeira e a segunda geração consistiam em modelos de plataformas fixas (Figura 4a), e a terceira e atual geração consiste nos sistemas de produção com unidades de produção flutuantes (Figura 4b), e representou a principal mudança na filosofia da exploração de petróleo no Brasil (FARIAS, 2017).

Figura 4 – Plataformas *offshore*. a) Plataforma fixa com sistema de estacas cravadas; b) Navio plataforma FPSO.



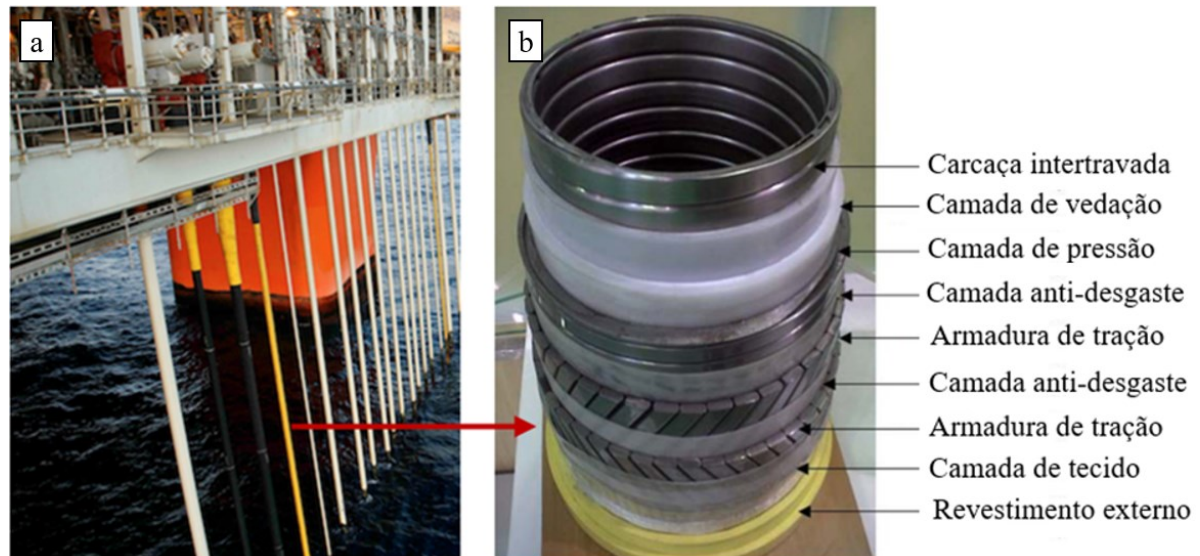
Fonte: (FARIAS, 2017).

As plataformas de petróleo *offshore* utilizam dutos chamados *risers* para diversas funções no processo de extração, e são utilizadas desde os primeiros modelos de plataformas marítimas desenvolvidas para exploração no Brasil.

1.2 RISERS

Os *risers* são estruturas tubulares utilizadas para o transporte seguro de material entre as plataformas e os poços de exploração de petróleo (MILLER, 2017). Estes dutos são de muita importância para as plataformas de petróleo, e representam alto investimento para fabricação, instalação e manutenção (FARIAS, 2017). Um *riser* flexível é apresentado na Figura 5a, e uma seção é ilustrada na Figura 5b.

Figura 5 – *Risers* flexíveis. a) Plataforma fixa com *risers* flexíveis em operação; b) Seção de um *riser* flexível.

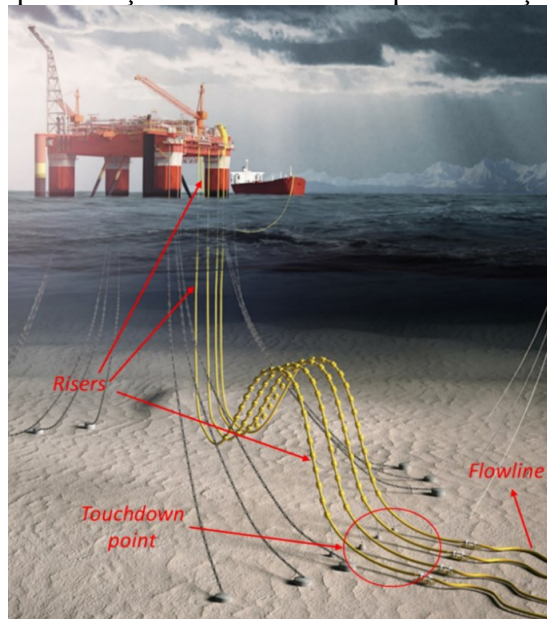


Fonte: adaptação de (GOMES, 2017; LEÃO et al., 2014; VARGAS-LONDOÑO et al., 2014).

Sistemas *risers* para extração de petróleo vêm sendo utilizados desde os primeiros modelos de exploração *offshore*, antes sendo utilizados somente em plataformas fixas, e posteriormente sendo utilizados também nas plataformas móveis (FARIAS, 2017; MILLER, 2017).

Estes dutos podem ser caracterizados como rígidos, feitos de aço, ou flexíveis, feitos de camadas alternadas de aço e polímero (FARIAS, 2017; LIMA, 2006). Eles partem da plataforma, seguindo até o ponto em que encostam no fundo do mar (*touchdown point*, ou somente TDP), e a partir daí, o duto passa a ser chamado de *flowline*, e segue até a cabeça do poço, no fundo do oceano (BAI, 2001; FARIAS, 2017; LIMA, 2006). A representação da trajetória dos tubos é representada pela Figura 6. As camadas de aço proporcionam flexibilidade ao *riser* e são responsáveis por resistir à boa parte dos carregamentos mecânicos em que a estrutura é submetida, enquanto as camadas de polietileno proporcionam proteção contra corrosão e evitam desgastes prematuros por abrasão das camadas metálicas (FARIAS, 2017).

Figura 6 – Representação da rede de dutos para extração de petróleo.

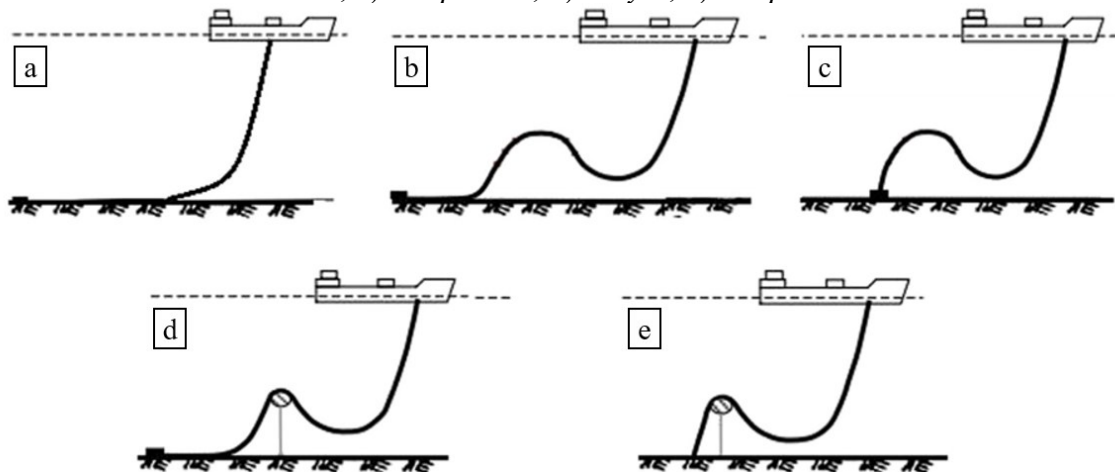


Fonte: (MARCELINO, 2019).

1.2.1 Classificação

Com base na norma API RP 2RD (MARCELINO, 2019), os *risers* podem ser classificados quanto à constituição estrutural, configuração e finalidade. Na Figura 7, é possível verificar as configurações dos *risers*, e na Tabela 1 é detalhada a forma como os risers são classificados.

Figura 7 – Configurações de *risers*. a) *Free-hanging catenary* ou catenária livre; b) *Lazy wave*; c) *Steep wave*; d) *Lazy S*; e) *Steep S*.



Fonte: Adaptação de (BAI; BAI, 2005).

Tabela 1 – Classificação de *risers* flexíveis.

Classificação com base na configuração¹	
Configuração	Descrição
<i>Free-hanging catenary</i> ou Catenária livre (Figura 7)	A configuração mais simples para um <i>riser</i> , e a mais barata. Requer uma infraestrutura simples e de fácil instalação, porém sofre severas tensões devido à movimentação de embarcação.
<i>Lazy wave</i> (Figura 7b) e <i>Steep wave</i> (Figura 7c)	Os modelos <i>wave</i> apresentam flutuadores na instalação, reduzindo o impacto dos movimentos da embarcação no TDP. Entre as duas, ainda é preferível a <i>Lazy wave</i> por se tratar de uma instalação mais simples.
<i>Lazy S</i> (Figura 7d) e <i>Steep S</i> (Figura 7e)	Os modelos <i>S</i> apresentam uma boia fixa, solucionando o problema dos impactos da movimentação da embarcação no TDP. Seguindo a mesma lógica dos modelos <i>wave</i> , a <i>Lazy S</i> é a melhor opção por apresentar uma montagem mais simples.
Classificação com base na estrutura	
Flexível	Conduíte flexível de alta rigidez axial, composto por uma combinação de polímeros e metais. Fácil manuseio, armazenamento, transporte, instalação e remoção.
Rígido	Duto metálico, comumente utilizado em configurações do tipo TTR. Visa suprir demandas onde a mobilidade do duto não é um fator positivo.
Híbrido	Composto por um trecho flexível e um trecho rígido, podendo ser fabricado de forma a cumprir aplicações específicas. Confere ao sistema as vantagens dos dois tipos de estrutura.
Classificação com base na aplicação	
Perfuração	Transporta fluido de perfuração e guia a broca desde a embarcação até a cabeça do poço.
Completação	Tem a função de iniciar ou garantir a produção de um poço para transportar óleo ou gás, além da passagem de cabos e ferramentas de perfuração.
Produção	Conduzem o fluido bruto de dentro do poço até a embarcação.
Injeção	Injeta água ou gás no interior do reservatório, de modo a otimizar a produção.

Fonte: Adaptação de (ABS, 2017; BAI; BAI, 2014; LEITE, 2011).

Apesar de os *risers* serem elementos muito resistentes, eles estão sujeitos a danos e efeitos que podem comprometer a atividade da plataforma de extração de petróleo.

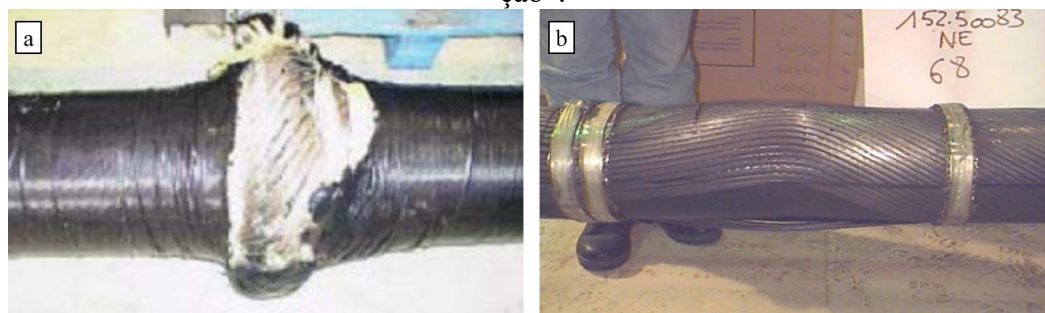
¹ Existem outras classificações relacionadas à configuração, como *Pliant wave* [BAI; BAI; 2005], *Chinese lantern* [BRAESTRUP; CHRISTENSEN, 2005] e *Top Tensioned Riser TTR* [LEITE, 2011], mas não são tão comuns como as outras citadas.

1.2.2 Defeitos típicos

Os *risers* podem sofrer avarias, tanto internas quanto externas, as quais podem comprometer o funcionamento do equipamento.

De acordo com a norma API RP 17B (FARIAS, 2017; MORAIS, 2013b), os dutos flexíveis podem apresentar uma série de falhas. São elas: colapso, explosão, falha de tração, falha de torção, falha de compressão, curvatura excessiva (*overbending*), falha por fadiga, erosão e corrosão. Algumas falhas, em especial, podem apresentar deformações externas aparentes, que representam mais de 50% das ocorrências das falhas em dutos flexíveis (FERGESTAD; LØTVEIT, 2017; SALGADO; AZEVEDO, 2016), e a ordem de grandeza dos desvios de geometria em virtude desses defeitos pode ser desde muito pequena, na casa de milímetros, até muito grandes e visíveis, como as sobressalências e amassamentos (CAMERINI, 2012), ilustrados na Figura 8.

Figura 8 – Deformações em *risers* flexíveis. a) Efeito “gaiola de passarinho”; b) Efeito “coração”.



Fonte: (CAMERINI, 2012).

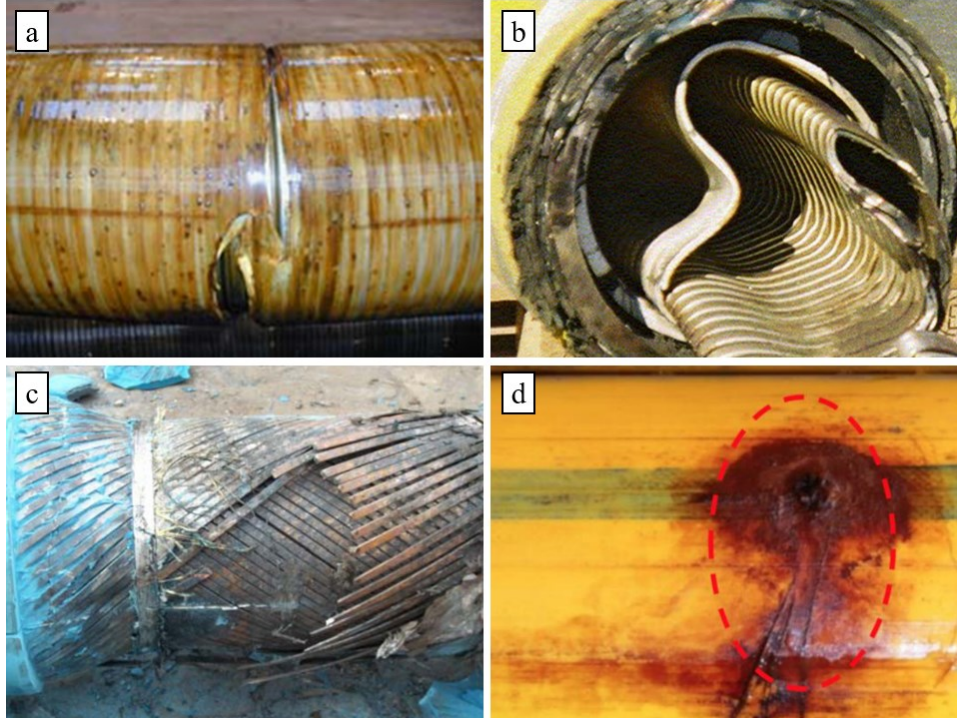
Esses defeitos podem ser divididos em falhas internas e falhas externas, conforme exposto na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação de defeitos encontrados em *risers* flexíveis.

Falhas internas	<i>Pullout</i> de pressão da camada plástica interna do <i>riser</i> (Figura 9a).
	Rompimento da carcaça intertravada (Figura 9b).
	Falha no sistema de vedação.
	Quebra ou falha estrutural na armadura de pressão.
	Rompimento ou fissura nas armaduras de tração (Figura 9c).
Falhas externas	Vazamento ou entrada de água devido à falta de ventilação ou por algum furo ou falha de manufatura, provocando corrosão prematura de componentes internos
	Falhas como furos, rupturas e trincas ocorridos durante a instalação ou manutenção, ou por algum impacto ou intempérie física na camada externa do <i>riser</i> (Figura 9d)

Fonte: (BAI; BAI, 2014).

Figura 9 – Defeitos em *risers* flexíveis. a) *Pullout* de pressão na camada plástica interna de um riser flexível; b) Colapso da carcaça intertravada; c) Ruptura na armadura de tração causada por fadiga; d) dano na camada plástica externa de um *riser*.



Fonte: (BAI; BAI, 2014; FERGESTAD; LØTVEIT, 2017); (MARINHO; DOS SANTOS; CARNEVAL, 2006)(SALGADO; AZEVEDO, 2016).

Na tentativa de evitar que os defeitos e falhas ocorram, ou na necessidade de reparos, existem procedimentos específicos para realizar a inspeção dos *risers*, e no Brasil a inspeção é predominantemente realizada com o uso de robôs aquáticos no trecho submerso e alpinistas industriais no trecho emerso entre o nível de variação de maré e o engaste na plataforma, na região conhecida como PIDF-4 (Procedimento de Inspeção de Duto Flexível na região 4 – Escalador).

1.2.3 Inspeção de *Risers*

A inspeção industrial busca avaliar características e aspectos de infraestrutura, equipamentos, produtos ou ambientes de trabalho, separando características aceitáveis e inaceitáveis com base em padrões de manufatura e garantindo boas condições de trabalho e operação, prevendo possíveis paralizações e acidentes em virtude de má condição dos equipamentos. Atualmente no Brasil, *risers* flexíveis são inspecionados com o uso de uma técnica chamada alpinismo industrial.

O alpinismo industrial, popularmente conhecido como escalada industrial, é uma técnica de escalada e de acesso por corda utilizada na execução de atividades em altura, sendo utilizada de forma regulamentada há pelo menos 35 anos ao redor do mundo (ALMEIDA; MANSOLDO, 2017). Esse procedimento é utilizado para a inspeção e controle de regiões de risco ou de pouca acessibilidade, e é bastante utilizado e aplicado em estações petrolíferas, e ainda que seja uma técnica relativamente recente, ela acaba se mostrando muitas vezes uma atividade perigosa, lenta e muitas vezes atrelada a um alto custo de operação.

No Brasil, essa atividade foi devidamente regulamentada em 2008 com a NBR 15475 e definidos os métodos de certificação também em 2008 com a NBR 15595 (ABNT, 2008a, 2008b; HACKER, 2017). Antes desse período, as atividades relacionadas ao alpinismo industrial eram baseadas em normas internacionais. Na Figura 10, o alpinista industrial está executando um serviço de inspeção externa de um *riser* flexível em um navio plataforma FPSO para avaliação e detecção de defeitos na superfície externa do duto.

Figura 10 – Escalador industrial inspecionando a superfície externa de um *riser* flexível.

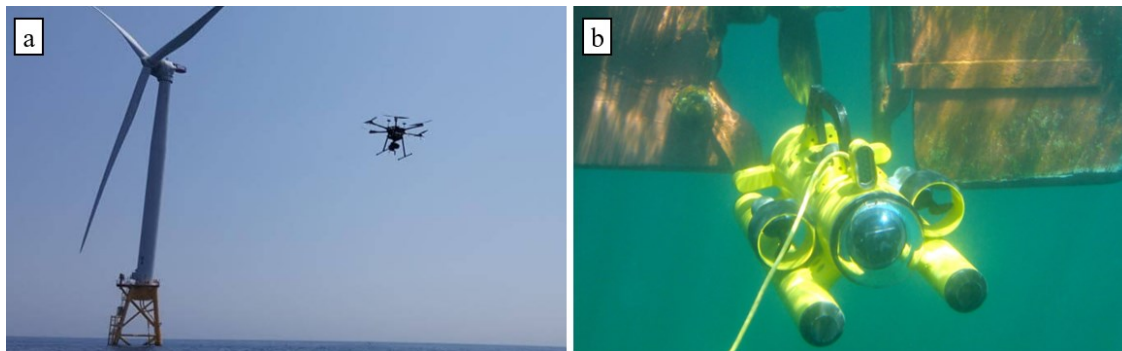


Fonte: (MARINHO; SANTOS, 2018)

A inspeção *offshore* não se limita ao uso de alpinistas industriais. Hoje, existem diversas técnicas relacionadas ao uso de aeronaves remotamente pilotadas (UAV – *Unmanned Aerial Vehicles* – Figura 11a) e veículos subaquáticos remotamente operados (ROUV – *Remotely Operated Underwater Vehicles* – Figura 11b) que muitas vezes superam a qualidade do trabalho humano, reduzindo as chances de acidentes, otimizando a quantificação de resultados e executando as tarefas em número reduzido de horas. Inclusive, a previsão é de que até 2024 o mercado de UAVs para petróleo cresça significativamente, não só em termos de recei-

ta, como em termos de participação de mercado, trazendo uma perspectiva muito positiva para a aplicação de veículos não tripulados na inspeção *offshore*. (PETRÓLEO, 2019).

Figura 11 – Inspeção industrial utilizando veículos remotamente pilotados. a) Inspeção de aerogerador em parque *offshore* utilizando UAV; b) Inspeção subaquática de leme náutico utilizando ROUV.



Fonte: (SUBSEATECH, 2021; ULC ROBOTICS, 2018).

1.3 INSPEÇÃO INDUSTRIAL UTILIZANDO UAV

O uso de UAVs, conhecidos popularmente como drones, para soluções industriais vem se tornando cada vez mais comum. A redução nos preços das aeronaves culminou na ascensão de um mercado que já se dizia promissor (MAZUR; WIŚNIEWSKI; MCMILLAN, 2016).

Aeronaves remotamente pilotadas começaram a ser utilizadas para fins industriais em 1980, no Japão, para aplicação de pesticidas em plantações de arroz (MAZUR; WIŚNIEWSKI; MCMILLAN, 2016). Com isso, novos modelos e padrões de operação foram sendo desenvolvidos para praticamente todos os tipos de mercados.

Cada setor da indústria tem suas necessidades e exigências, e como consequência, houve um crescimento expressivo na pesquisa de novas técnicas e desenvolvimento de novos produtos voltados aos mais diversos nichos. Percebeu-se que cada setor demandava uma prioridade, tanto na aeronave como nas características principais do sistema, como velocidade de voo, capacidade de carga (*payload*), custo-benefício, qualidade na captura de imagens, duração da bateria e transmissão de dados em tempo real (MAZUR; WIŚNIEWSKI; MCMILLAN, 2016).

O UAV costuma contar com diversos equipamentos embarcados, sendo chamado de Sistema de aeronave não tripulada (UAS – *Unmanned Aircraft System*), e propõe características específicas para cada função. É possível utilizar UAVs com sensores e computadores em-

barcados, tornando-se útil em diversos setores da indústria (JOSHI, 2019; MAZUR; WIŚNIEWSKI; MCMILLAN, 2016), conforme descrito na Tabela 3.

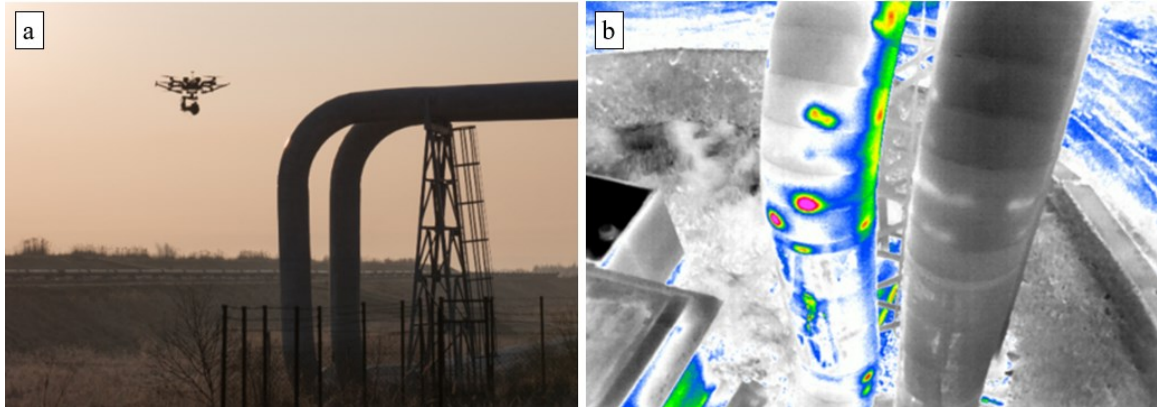
Tabela 3 – Setores da indústria com aplicações para UAVs.

Óleo e Gás	Inspeções ópticas e térmicas em estruturas altas e de difícil acesso, em instalações de gás e petróleo <i>onshore</i> e <i>offshore</i> .
Energia	Inspeções ópticas e térmicas de torres de linhas de transmissão, aerogeradores, usinas fotovoltaicas e subestações.
Telecomunicação	Laudos de inspeções tridimensionais, inspeções ópticas e térmicas.
Edificações	Vistorias de fachadas, telhados e locais de difícil acesso em prédios comerciais, residenciais e industriais.
Infraestrutura	Inspeção de estradas, pontes, viadutos, ferrovias, aquedutos, oleodutos, barragens.

Fonte: (JOSHI, 2019; MAZUR; WIŚNIEWSKI; MCMILLAN, 2016).

A Figura 12 demonstra o uso de UAV para inspeção termográfica de dutos utilizados para transporte de fluidos.

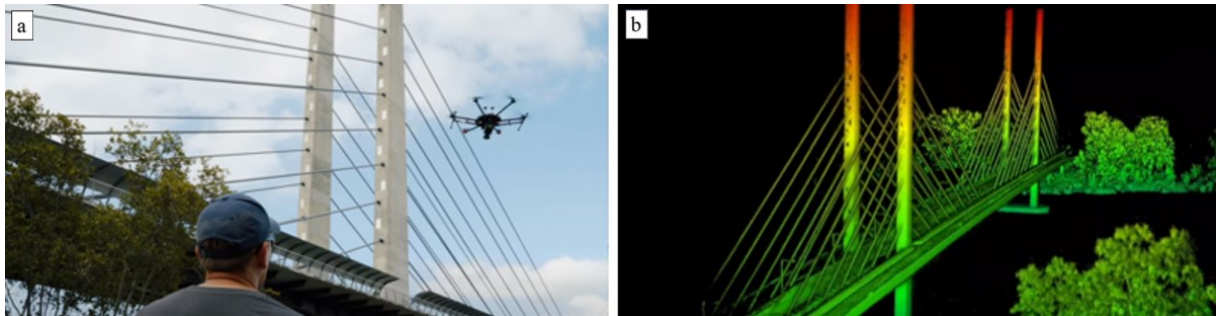
Figura 12 – Inspeção termográfica de dutos para transporte de fluidos. a) UAV realizando inspeção; b) Imagem da câmera térmica utilizada na inspeção.



Fonte: (WORKSWELL, 2016)

Diferente da inspeção termográfica que traz características atreladas à temperatura do equipamento inspecionado, por exemplo, também é possível adquirir características de caráter dimensional e geométrico com o uso de sensores ópticos. Abaixo, na Figura 13, é possível observar o uso de um radar a laser, comumente conhecido por LiDAR (*Light Detection and Ranging*), realizando a captura de informações dimensionais de uma ponte, e o posterior processamento dos dados advindos do sensor.

Figura 13 – Inspeção óptica de uma ponte utilizando um LiDAR. a) UAV realizando a operação de captura com um LiDAR. b) Resultado da reconstrução 3D a partir dos dados do LiDAR.



Fonte: Adaptado de (EMESSENT, 2019)

O uso de aeronaves remotamente pilotadas para inspeção industrial se justifica por diversas razões, e cada vez mais vem sendo atribuído como forma de evitar trabalho em altura e em regiões de difícil acesso. Naturalmente, cada caso apresenta suas particularidades e devem ser analisados com a devida seriedade para justificar as mudanças em campo.

1.4 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

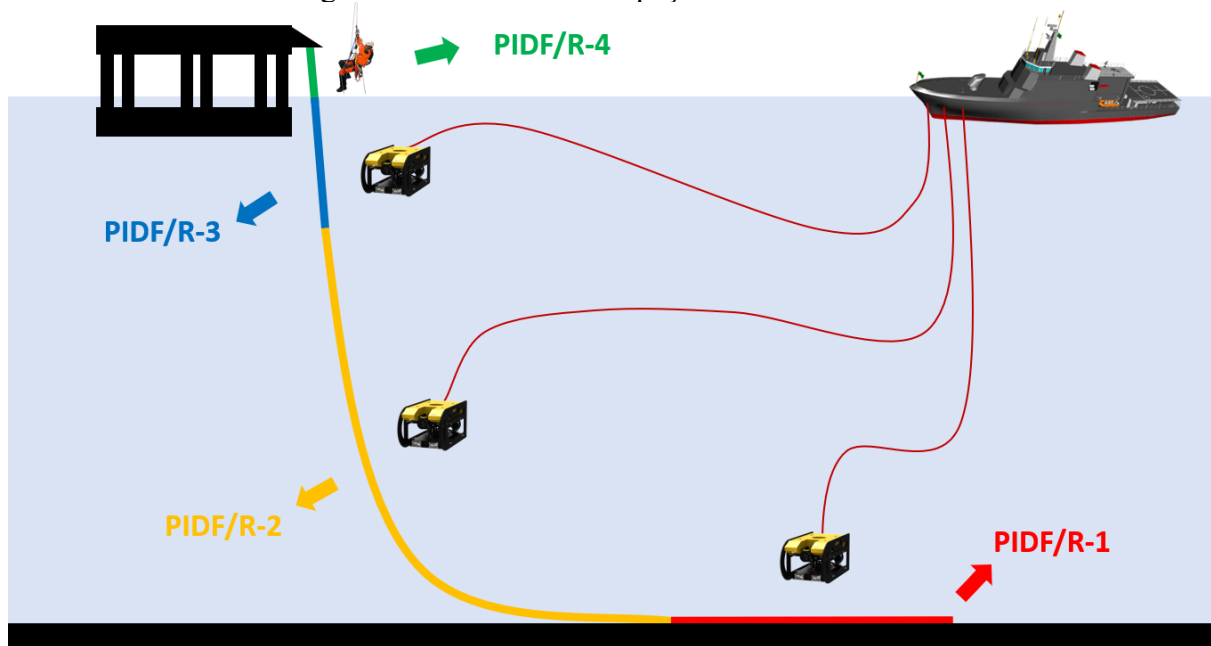
O Brasil, por meio da Petrobras, é o maior operador de dutos flexíveis do mundo para a indústria de petróleo e gás, e todos esses dutos necessitam de inspeções periódicas. Na Petrobras, as inspeções de *risers* chamadas de Procedimento de Inspeção de Duto Flexível (PIDF), hoje são divididas em quatro trechos, representados na Tabela 4 e ilustrados na Figura 14.

Tabela 4 – Procedimentos de inspeção de Duto Flexível (PIDF).

PIDF/R-1	Trecho estático, compreendido pelas <i>flowlines</i> no fundo do mar. Inspeção ocorre com o uso de ROUVs.
PIDF/R-2	Trecho compreendido entre a região em que o <i>flowline</i> perde contato com o solo, até aproximadamente 30 m abaixo da zona de variação de maré. Inspeção ocorre com o uso de ROUVs.
PIDF/R-3	Trecho compreendido entre o fim da região de inspeção do PIDF/R-2, até a zona de variação de maré. Inspeção ocorreu por muito tempo através de mergulhadores, mas foi recentemente alterada para ROUVs.
PIDF/R-4	Trecho emerso. Inspeção ocorre através de alpinistas industriais.

Fonte: O autor.

Figura 14 – Trechos de inspeção de duto flexível.



Fonte: O autor.

Muitas empresas vêm em um movimento expressivo de redução das horas de exposição de seres humanos ao risco. Ainda que existam metodologias profissionais relacionadas ao uso de mão de obra humana para determinados tipos de inspeção, invariavelmente há um risco incumbido na atividade. Logo, busca-se constantemente a substituição de mão de obra humana em ambientes insalubres por veículos não tripulados e robôs.

Outro ponto crucial que também incide sobre o alpinismo industrial é o tempo de inspeção. A periodicidade das inspeções de dutos flexíveis varia com base na aplicação do duto, entre 1,25, 3, 10 e 12 anos, sendo 3 anos o período em que as inspeções ocorrem com maior frequência. Atualmente, cerca de 400 dutos são inspecionados por ano, onde a média de tempo por inspeção com escaladores é de cerca de um duto flexível por dia (ABENDI, 2020). Portanto, além de ser uma atividade que impõe risco aos operadores, também é altamente custosa e lenta, possibilitando a substituição da mão de obra humana. Somente o PIDF/R-4 ainda não passou pela substituição que ocorreu com os outros trechos de inspeção do duto flexível, e enxerga-se no futuro a possibilidade do uso de aeronaves remotamente pilotadas utilizando princípios de metrologia óptica para a inspeção, como é o caso do uso de LiDARs aliados a sistemas de navegação inercial (INS – *Inertial Navigating System*), o que garante um princípio de medição sem contato da camada externa dos *risers* com conhecimento da trajetória percorrida pela aeronave.

Como forma de viabilizar a substituição de alpinistas industriais por UAVs para a inspeção do PIDF/R-4, é necessário detalhar primeiramente como essas inspeções seriam feitas de forma visual com o uso de aeronaves e sensores, para então estudar as possibilidades de uma possível mudança.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo Geral

Avaliar performance de um LiDAR para aquisição e registro de nuvens de pontos 3D consecutivas para fins de inspeção industrial e estimando a trajetória através de algoritmos de *Iterative Closest Points* (ICP), avaliando aspectos metrológicos e estudo da aplicabilidade na inspeção de *risers* em estações *offshore* de petróleo, tendo como requisito para estudar a substituição de alpinistas industriais por UASs erros da ordem de dezenas de milímetros nos resultados de medição.

1.5.2 Objetivos específicos

O objetivo geral contempla os seguintes objetivos específicos:

- Realizar testes de funcionalidade do LiDAR;
- Desenvolver rotina computacional de captura e gravação de nuvens de pontos;
- Desenvolver algoritmo de concatenação e alinhamento de nuvem de pontos;
- Realizar medições em bancada de testes;
- Avaliar metrologicamente os resultados obtidos nos testes;
- Comparar técnicas de ICP;

2 INSPEÇÃO ÓPTICA UTILIZANDO UAS

2.1 UAV

A nomenclatura para aeronaves remotamente pilotadas foi mudando no decorrer da história e do desenvolvimento tecnológico. No passado, qualquer aeronave sem tripulação era chamada de drone, e se definia como aeronave sem tripulação controlada por sinais de rádio através de controle remoto ou computador. No entanto, esse termo passou a se tornar cada vez menos utilizado por se tratar de um termo genérico, e não um termo técnico. Alguns termos como RPV (*Remotely Piloted Vehicle*), RPA (*Remotely Piloted Aircraft*), RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*), UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) e UAS (*Unmanned Aerial System*) acabaram surgindo, e estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5 – Nomenclaturas de aeronaves remotamente pilotadas.

Conceitos para aeronaves pilotadas por controle remoto ou computador	
RPA	Aeronave controlada por controle remoto.
RPAS	Sistema completo junto ao RPA, contendo sensores, computadores de bordo e periféricos.
RPV	Qualquer veículo remotamente pilotado. No entanto, o conceito é comumente aplicado a aeronaves.
Conceitos para aeronaves com voos pré-programados	
UAV	Aeronave sem tripulação que pode realizar voos autônomos e/ou missões pré-programadas.
UAS	Sistema completo junto ao UAV, contendo sensores, computadores de bordo e periféricos.

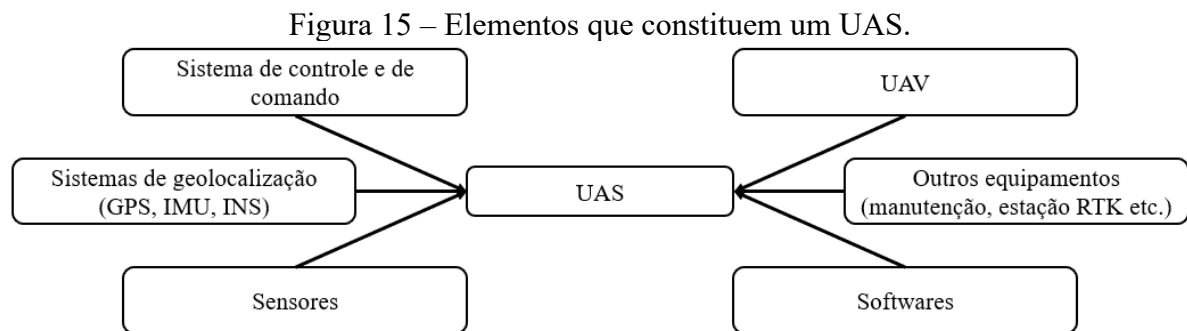
Fonte: Adaptação de (FAHLSTROM; GLEASON, 2012; GUPTA; GHONGE; JAWANDHIYA, 2019; WANG et al., 2021)

Em virtude de os nomes serem muito utilizados de forma equivocada, hoje, todos podem ser internacionalmente chamados de UAVs (*Unmanned Aerial Vehicles*), que estará correto (GUPTA; GHONGE; JAWANDHIYA, 2019). Para a aplicação deste documento, serão tratados UAV como a aeronave em si, e UAS como o sistema que compõe uma solução que utiliza uma aeronave.

De forma simplificada, UAS pode ser separada em três elementos principais (INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION, 2015):

- A aeronave (UAV);
- Links de Comunicação;
- Controle e Comando (*Ground Control Station*, ou somente GDS);
- Outros dispositivos e sensores.

No entanto, é possível definir uma UAS de forma mais detalhada, conforme ilustrado na Figura 15.



Fonte: O autor.

Os UAVs podem ser classificados de variadas formas, e seguem diferentes regras com base no país em que se está realizando a aplicação ou na finalidade da operação, seja ela militar, civil, industrial ou agrícola.

No Brasil, por exemplo, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), define sua classificação com base na massa máxima transportada por um UAV, conhecida como Peso Máximo de Decolagem, ou somente PMD, e separa as aeronaves em três classes, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Classificação da ANAC em relação ao PMD.

Classificação	Massa (kg)
Classe 1	> 150
Classe 2	25 a 150
Classe 3	0,25 a 25

Fonte: (ANAC, 2017).

No entanto, existem diversas outras características que classificam UAVs, como nível de autonomia, altitude, tipo de motor, tipo de aeronave, autonomia de voo (*Maximum Takeoff weight*, ou somente MTOW), tamanho da aeronave, distância de operação (FAHLS-

TROM; GLEASON, 2012; GUPTA; GHONGE; JAWANDHIYA, 2019; WANG et al., 2021).

Apesar de os UAVs serem classificados de diversas formas, para aplicações voltadas à inspeção óptica, o que acaba sendo o fator de destaque no UAS são os sensores utilizados.

Sensores são, por conceito, dispositivos que detectam ou medem grandezas físicas ou químicas (SINCLAIR, 2001). Esses dispositivos são muitas vezes utilizados acoplados ao UAS, de modo a trazer informação relevante para o usuário (JOSHI, 2019; VERGOUW et al., 2016). Os sensores podem ser classificados de acordo com a grandeza a ser detectada ou medida, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Tipos de sensores para UAVs.



Fonte: Adaptação de (JOSHI, 2016).

Muitas vezes, a eficiência da aplicação está relacionada à seleção dos sensores, e como é feita a combinação entre eles. Portanto, antes de selecionar qual sensor utilizar se baseando somente na eficiência, é necessário também entender os princípios por trás da medição.

2.2 METROLOGIA ÓPTICA

O campo da metrologia óptica cresceu significativamente nos últimos 40 anos. Ferramentas que antes eram utilizadas somente em aplicações muito específicas, hoje vêm tomando posições de uso constante em todas as fases de um processo de manufatura. Isso se dá, principalmente, por dois fatores (HARDING, 2016): as melhorias em processamento computacional a um preço mais acessível quando comparado a décadas atrás, e a necessidade industrial de sistemas de medição e procedimentos mais seguros, rápidos, limpos e sem contato.

A metrologia óptica é a ciência que consiste nos sistemas de medição que utilizam luz como seu princípio de medição. O processo de medição se dá de diversas formas, podendo utilizar somente sistemas passivos, onde somente a luz ambiente é suficiente para o processo de medição (câmeras, fotogrametria, estereofotogrametria); como também pode-se utilizar

sistemas ativos para complementar a medição, podendo ser um laser, uma fonte de luz branca, um projetor etc., e servem para medir distâncias, dimensões, geometrias, ondas, homogeneidade, propriedades ópticas, microestruturas (HARDING, 2016; OSTEN; REINGAND, 2012).

As aplicações da metrologia óptica são inúmeras (HARDING, 2016; ZHANG, 1999):

- Medição da dimensão e geometria de estruturas e equipamentos de grande porte (pontes, barcos, aviões, rodovias);
- Medição da dimensão, geometria e deformação de equipamentos de pequeno porte (partes de veículos, motores, maquinários);
- Inspeção de distância, deformação e geometria de equipamentos e objetos que exigem alta precisão, da ordem de micrometros e nanometros.

Em cada caso, existem diferenças em como a luz exerce seus fenômenos para poder realizar medições, *e.g.* mudanças na quantidade de luz que é refletida ou transmitida, mudanças na direção da luz, mudanças na natureza da luz (fase, coerência ou polarização), mudanças da distribuição da luz (foco). Falando especificamente de inspeção óptica utilizando UAV, existem algumas técnicas já consagradas na história, como a fotogrametria, a estereofotogrametria, a triangulação laser e o escaneamento óptico por tempo de voo – este último sendo normalmente aplicado com o uso de LiDARs. Na Tabela 7, é possível comparar os atributos das três técnicas supracitadas.

Tabela 7 – Comparativo de atributos entre sistemas ópticos para inspeção industrial.

Atributos	Fotogrametria	Estéreo	LiDAR
Complexidade de implementação	Baixa	Média	Alta
Complexidade de utilização	Baixa	Média	Baixa
Cor	Contempla	Contempla	Não contempla
Aplicações noturnas	Não contempla	Não contempla	Contempla
Custo	Baixo	Baixo	Alto
Incerteza de medição	Baixa	Baixa	Alta
Tempo de processamento	Alto	Alto	Baixo
Taxa de aquisição	Baixa	Baixa	Alta

Fonte: Adaptado de (ABENDI, 2020).

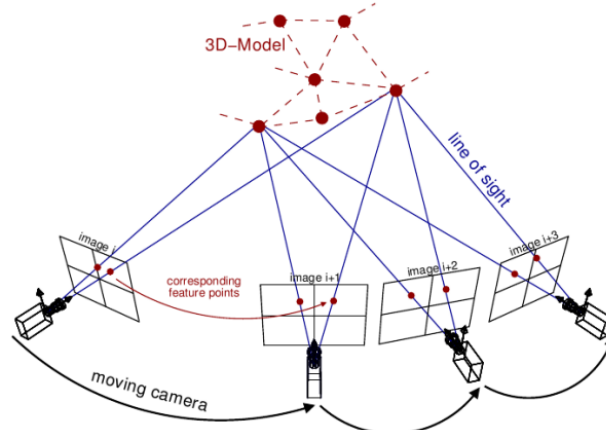
2.2.1 Fotogrametria

A fotogrametria compreende um conjunto de técnicas que são utilizadas para realizar medições tridimensionais em superfícies. Ela funciona basicamente com uma sequência de duas ou mais fotografias tiradas de posturas distintas. Esse conjunto de fotografias, seguindo

uma série de cuidados e etapas, pode ser utilizado para gerar uma estrutura tridimensional através de informações bidimensionais, possibilitando determinar características pertinentes quanto à forma do objeto e sua posição e orientação no espaço (PINTO, 2010b; YOSHIKAWA, 2008).

A fotogrametria se baseia no princípio de triangulação, onde ela se utiliza da correspondência de pontos para encontrar as coordenadas 3D de cada ponto na cena (LUHMANN et al., 2019). Na Figura 17, cada imagem i carrega informação de pontos correspondentes em uma imagem, e com isso, é possível formar uma representação tridimensional para cada ponto.

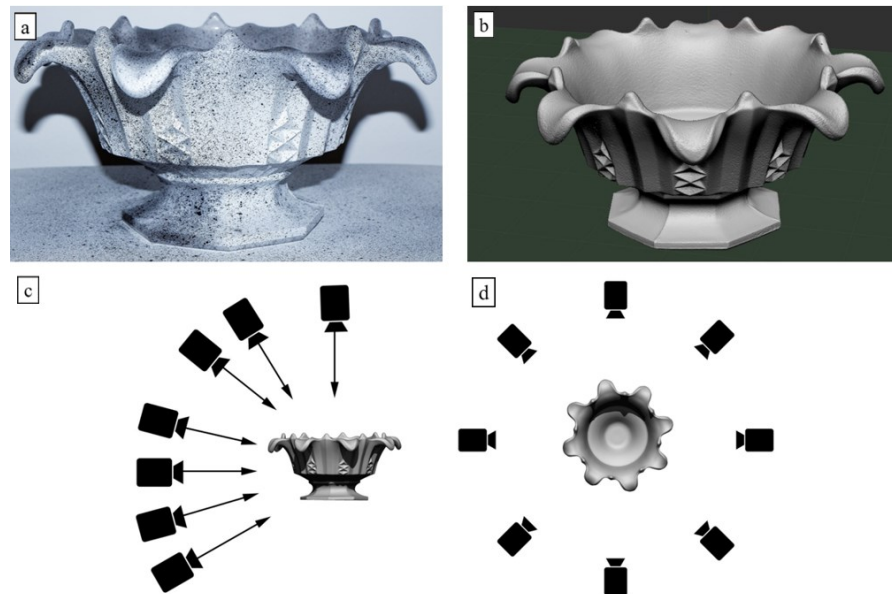
Figura 17 – Princípio de triangulação na fotogrametria.



Fonte: (YOSHIKAWA, 2008)

Na Figura 18a é possível analisar um objeto pintado de branco e posteriormente texturizado com tinta preta, e na Figura 18b, é possível verificar o resultado da fotogrametria. Logo abaixo, na Figura 18c e na Figura 18d, identifica-se o procedimento rotativo característico das fotogrametrias, circundando o objeto e gerando pontos de triangulação.

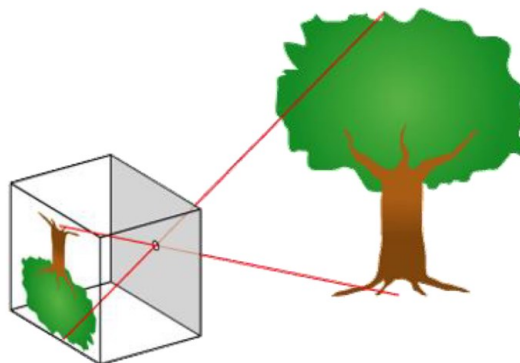
Figura 18 – Fotogrametria de curta distância de um objeto. a) Fotografia real de um objeto texturizado com tinta preta. b) Resultado da fotogrametria realizada em a). c) Procedimento de rotação sobre o objeto no eixo longitudinal. d) Procedimento de rotação sobre o objeto no eixo transversal.



Fonte: (BUSBY, 2016)

Para determinar um ponto tridimensional no espaço, o modelo matemático de câmera mais utilizado é o chamado de *pinhole* (Figura 19). Este princípio tem suas primeiras aparições na história em 5 a.C, onde as obras divergem quanto ao seu descobridor: Mo-Ti (DANIILIDIS; KLETTE, 2006) ou Mozi (POTTER, 2015). Esse mesmo conceito foi matematicamente aprimorado no século XI (POTTER, 2015) e até hoje é muito utilizado para fotogrametria e para aplicações em visão computacional.

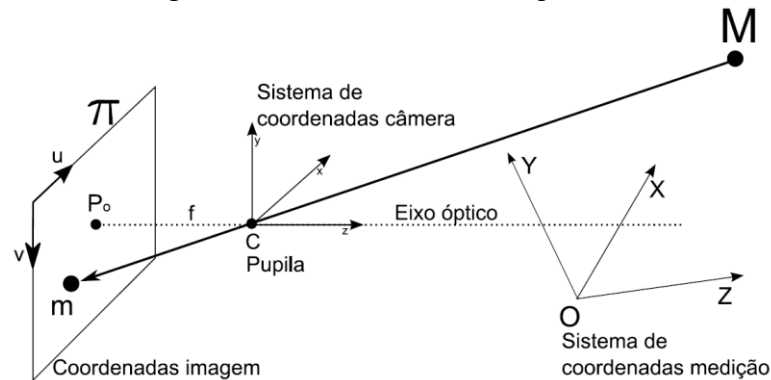
Figura 19 – Desenho representativo de uma câmera *pinhole*.



Fonte: (MELLISH, 2005).

O modelo de câmera *pinhole* (Figura 20) representa, de forma simples, a projeção do raio de luz em linha reta de um ponto M no espaço, passando por um furo C (de onde origina o nome *pinhole*) chamado de pupila. Esse raio é então projetado e representado na posição m em uma superfície plana π .

Figura 20 – Modelo de câmera *pinhole*.



Fonte: (PINTO, 2010b)

2.2.2 Sistema Estéreo

A estereofotogrametria, também conhecida como sistema estéreo, é uma técnica fotogramétrica em que se utilizam duas câmeras estruturalmente estáticas entre si (Figura 21). Esse princípio é fundamentado na percepção de tridimensionalidade dos seres humanos, uma vez que dois olhos observam a mesma cena a partir de ângulos distintos e o cérebro infere a distância ou profundidade (MACHADO, 2021; PINTO, 2010a).

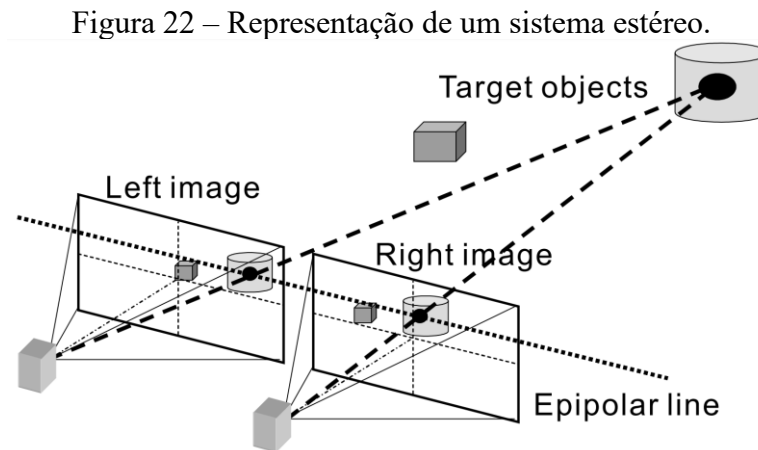
Figura 21 – Modelo de sistema estéreo caseiro.



Fonte: (BROWN, 2018)

Ao fazer aquisições simultâneas de duas imagens de câmeras com modelagem *pinhole*, é possível, através da disparidade das capturas, que representam a distância em pixels de um mesmo ponto representado em duas imagens, formar um mapa de profundidade para cada ponto correspondente nas duas imagens (HARTLEY; ZISSERMAN, 2004; PINTO; KOH-

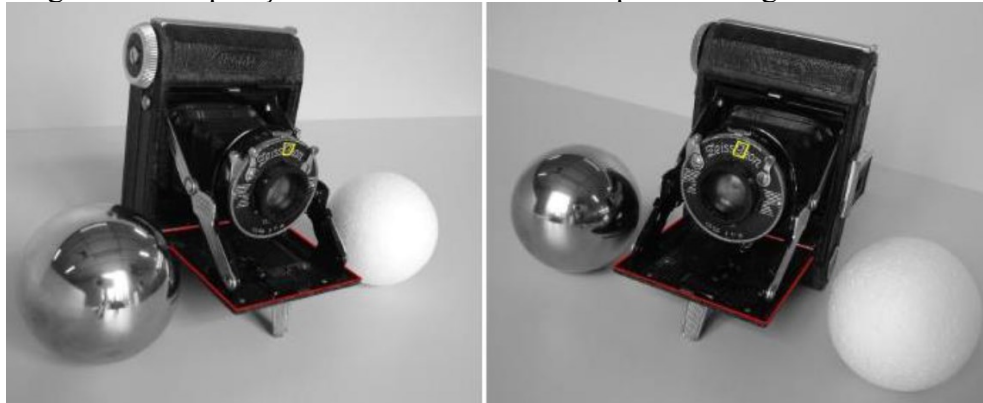
LER; GONÇALVES JUNIOR, 2012). A Figura 22 ilustra o funcionamento de um sistema estéreo, onde a relação de posição das câmeras esquerda e direita, chamada de linha epipolar, define um ponto homólogo nas duas imagens, possibilitando avaliar a disparidade e encontrar a profundidade do objeto.



Fonte: (HARIYAMA; YOKOYAMA; KAMEYAMA, 2008).

É possível realizar a identificação de pontos homólogos através de técnicas passivas e ativas. Primeiramente, é importante entender que existem alguns fatores que levam à identificação dos pontos correspondentes: a intensidade luminosa para cada pixel, as variações de textura e as propriedades reflexivas que constituem a cena. Na Figura 23, por exemplo, é possível verificar que, na esfera espelhada, a intensidade luminosa dificilmente será constante de uma imagem para outra, o que a torna pouco interessante para a busca de pares de pontos correspondentes. Na outra esfera, a qual apresenta uma superfície branca e homogênea (monótona), a busca por pontos correspondentes é dificultada pela falta de textura apresentada na esfera, o que faz com que não seja possível encontrar pontos correspondentes com baixa incerteza em meio a uma região com muitos pixels semelhantes.

Figura 23 – Aquisições de uma mesma cena a partir de ângulos diferentes.

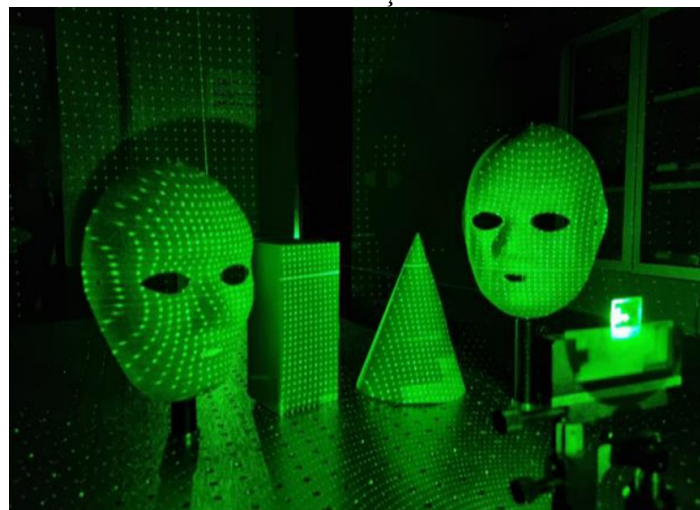


Fonte: (HOFMANN, 2006).

Para a identificação de pontos correspondentes em técnicas passivas, é necessária a presença de heterogeneidade na cena, fazendo com que a cena apresente uma assinatura própria. Quando isso não ocorre, ou seja, quando a textura apresentada na cena é monótona, de pouca textura, pode-se utilizar alvos codificados na cena, que são elementos artificiais colocados propositalmente na cena que buscam facilitar a identificação dos pontos e enriquecer o resultado com técnicas passivas (LUHMANN et al., 2019).

Nos casos em que não se tem textura o suficiente, ou quando não é possível realizar a inserção de alvos na cena, pode-se utilizar técnicas ativas para detecção de pontos correspondentes, onde há a necessidade de uma projeção de luz estruturada sobre a cena. É possível verificar na Figura 24 a adição de luz estruturada na cena como forma de gerar textura artificial.

Figura 24 – Projeção de luz estruturada como forma de adicionar textura na cena para posterior medição.



Fonte: (KIM et al., 2022)

É possível utilizar luz estruturada não somente para encontrar pontos homólogos entre duas ou mais imagens. É possível, também, utilizar a luz estruturada como forma de calcular a distância entre o sistema de medição e o mensurando, como é o caso dos LiDARs.

2.2.3 LiDAR

A tecnologia LiDAR é um método de sensoriamento ativo que utiliza luz estruturada como forma de medir grandezas. Esse método conta, por princípio, com um emissor de luz, visível ou invisível, e um fotorreceptor; e com ele é possível realizar medição de diversas grandezas, como distância, velocidade, rotação, composição química (PAUL MCMANAMON, 2019a).

A depender da sua aplicação, os LiDARs podem apresentar diferentes princípios. São eles: tempo de voo (ToF – *Time of Flight*), que mede a luz através do tempo entre emissão e retorno do pulso de luz; e luz coerente, que utiliza medição indireta de distância através de frequência ou amplitude modulada (PAUL MCMANAMON, 2019b; TRAFINA; MILAN, 2016; VEITCH-MICHAELIS; STOREY, 2016).

Sendo um sensor óptico ativo, o equipamento emite luz própria, e independe de outras fontes de luz para seu funcionamento. O LiDAR se diferencia também pela capacidade de múltiplos retornos, e acabou por se tornar equipamento muito utilizado para topologia e para mapeamento de terrenos, por conseguir trazer medições das folhas das árvores, mas também do solo. Não somente para topologia, os LiDARs também apresentam aplicações para veículos autônomos, robótica móvel, inspeção industrial, reconstrução 3D de ambientes.

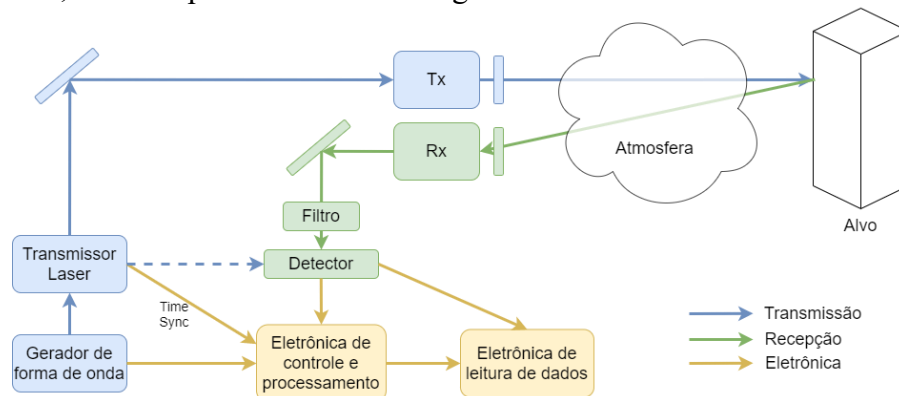
Sendo o princípio de tempo de voo o utilizado pelo LiDAR contemplado nos experimentos contidos neste documento, será tratado com detalhes somente acerca deste princípio.

2.2.3.1 Tempo de voo (ToF)

A técnica de tempo de voo baseia-se no tempo em que um feixe de luz leva para ir até o mensurando e voltar ao fotorreceptor, ambos contidos no mesmo sistema de medição. O diagrama da Figura 25 representa o princípio de funcionamento desse modelo de LiDAR.

Figura 25 – Diagrama conceitual de um LiDAR. O sistema inicia no gerador de forma de onda, e essa onda é transmitida pelo transmissor laser. Ao iniciar a transmissão, o tempo de voo começa a ser contado pela eletrônica de controle e processamento. O laser realiza seu curso, saindo de Tx (transmissor), percorrendo a atmosfera local, até encontrar com o alvo. Após

isso, o laser é refletido e captado pelo Rx (Receptor), que irá filtrar o sinal de retorno, e chegará ao detector, onde irá parar o contador e registrar a leitura.



Fonte: Adaptado de (MCMANAMON, 2015, 2019).

A distância R de um alvo ou objeto pode ser obtida através da equação (1).

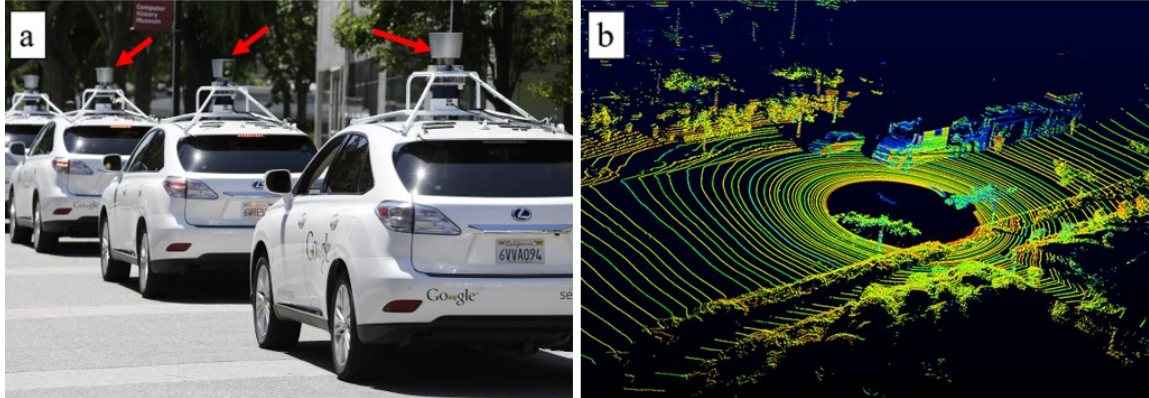
$$R = \frac{ct}{2n} \quad (1)$$

Onde R é a distância do objeto, c é a velocidade da luz no ar, t é o tempo até que a reflexão seja detectada pelo sensor, e n é o índice de refração do ar, que pode alterar conforme as heterogeneidades presentes na nossa atmosfera, sendo diretamente proporcional à pressão, e inversamente proporcional à temperatura e à umidade (YOUNG, 2012).

Os LiDARs por tempo de voo, em sua concepção mais simples, têm-se a medição de um feixe laser único, calculando apenas a distância de um único ponto. De certo modo, tal montagem limita o uso apenas para medir a distância de um único ponto. Porém, existem também outras formas de captura e de montagem para possibilitar aquisições 2D e 3D, realizando varreduras sobre o próprio eixo, comumente chamadas de *scanning*.

Os modelos 2D apresentam um sistema rotativo acoplado ao corpo do LiDAR, e realiza uma varredura linear ao longo de um plano. Já os modelos 3D podem ser apresentados de duas maneiras: apresentando dois eixos rotativos ortogonais entre si, utilizados fixos ao chão para escaneamento de ambientes industriais; ou apresentando um eixo rotativo e múltiplos emissores (Figura 26), também chamados de canais, comumente utilizados para robótica móvel, inspeções industriais e topografia. Diante do escopo da proposta deste documento, será tratado com maiores detalhes somente sobre LiDARs 3D de múltiplos emissores, também conhecidos como *multibeam*.

Figura 26 – Aplicação de LiDAR 3D com múltiplos emissores em veículos autônomos. a) Veículos autônomos da Google utilizando LiDARs 3D de 64 canais, sinalizados pelas setas vermelhas. b) Representação de captura de uma revolução de um LiDAR 3D de 64 canais em um veículo autônomo.



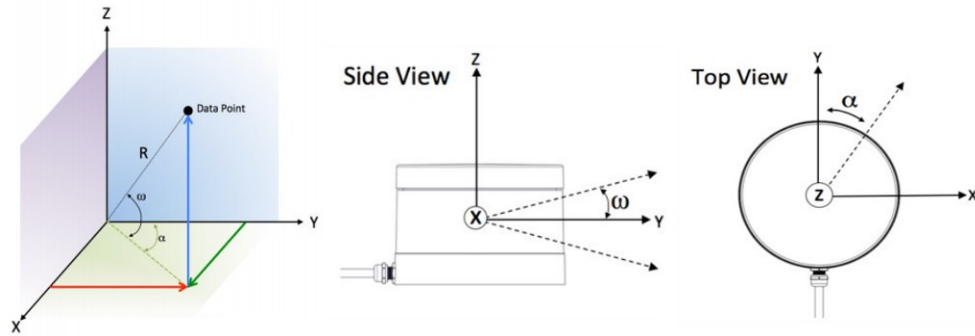
Fonte: (LECROSNIER, 2019; WSJ, 2014)

Os resultados de um escaneamento 3D utilizando um LiDAR normalmente são representados por pontos tridimensionais no espaço cartesiano. Essa ação se repete a cada ciclo do sensor, e armazena os dados de cada uma das aquisições. Com isso, é possível unir essas várias aquisições, vindas de *frames* consecutivos, em uma única nuvem de pontos, dentro do mesmo sistema de coordenadas, geralmente criadas com o objetivo de mapear ambientes e definir superfície de estruturas e objetos. Este conjunto de dados, geralmente representados pelas coordenadas (x, y, z) e intensidade² de retorno, pode carregar informações adicionais, como as componentes RGB de cada ponto e movimentos de rotação e translação, quando integrado com outros sensores (GROETELAARS; LEÃO DE AMORIM, 2011).

Os dados normalmente são captados em coordenadas esféricas, onde ω é o ângulo de elevação do pulso laser, e α é o ângulo de rotação, também chamado de ângulo de *Azimuth*, conforme ilustrado na Figura 27.

² Intensidade é baseada no retorno do laser, sendo 0 quando não se obtém retorno, e 100 quando o retorno é perfeito. Entre 101 e 255 são caracterizadas as superfícies reflexivas, onde 101 é pouco reflexiva e 255 é muito reflexiva.

Figura 27 – Sistema de referência de um LiDAR multicanais rotativo.



Fonte: (VELODYNE, 2018)

Nas equações abaixo, é possível transformar de coordenadas esféricas para cartesianas utilizando as equações (2), (3) e (4) (VELODYNE, 2018).

$$X = R \cdot \cos(\omega) \cdot \sin(\alpha) \quad (2)$$

$$Y = R \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\alpha) \quad (3)$$

$$Z = R \cdot \sin(\omega) \quad (4)$$

De modo geral, LiDARs 3D rotativos por tempo de voo costumam apresentar incertezas da ordem de dezenas de milímetros (KIDD, 2017), e as principais fontes de incerteza de um LiDAR embarcado estão divididas em três categorias (MEZIAN et al., 2016): incerteza de navegação, incerteza de calibração extrínseca e incerteza de calibração intrínseca.

A incerteza de navegação está relacionada à posição e orientação, e dependem das características do sistema de navegação inercial que atuará em conjunto com o LiDAR ou de ferramentas matemáticas que realizem estimativas de estado de corpo rígido. Essa incerteza afeta diretamente o processo de concatenação de nuvens de pontos para reconstrução tridimensional da cena.

A incerteza de calibração extrínseca está relacionada ao erro de posicionamento de montagem entre os sensores de navegação e o LiDAR, enquanto a incerteza de calibração intrínseca está relacionada aos parâmetros internos do LiDAR. Os LiDARs normalmente fornecem de fábrica os *offsets* para correção vertical de cada canal emissor. Ainda que possam existir erros referente à posição de cada canal laser dentro do equipamento vindo a formar um erro sistemático, este documento não tratará dessa correção, e será considerada a calibração de fábrica como corretamente efetuada.

O LiDAR, ainda que consiga extrair nuvens de pontos do ambiente e trazer a posição de cada ponto que compõe a nuvem, somente realiza essas captações com base em um sistema

de coordenadas local, e exige a utilização de sistemas inerciais ou de técnicas apuradas de refinamento de posição e orientação para poder estimar o estado do sistema durante as capturas e registrar as aquisições com maior precisão.

2.3 ESTIMAÇÃO DE ESTADO

O estado de um robô é um conjunto de características, como posição e orientação, que, com elas, é possível descrever a pose e os movimentos de um robô no tempo (BARFOOT, 2017; SICILIANO et al., 2009).

O movimento de translação t de um corpo rígido no espaço pode ser descrito no vetor (3×1) da equação (5):

$$t = \begin{bmatrix} o'_x \\ o'_y \\ o'_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

Adotando uma notação compacta, é possível descrever o movimento de rotação de um corpo rígido, em relação ao frame de referência, e pode ser representado pela matriz (3×3) descrita na equação (6).

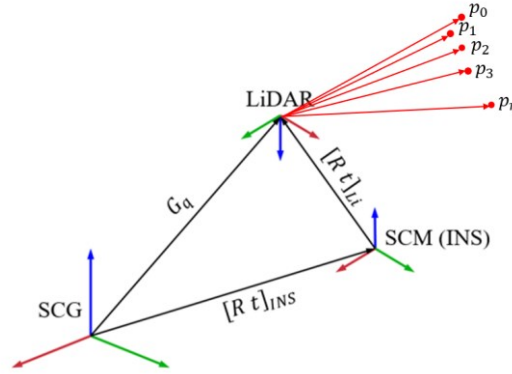
$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} x'_x & y'_x & z'_x \\ x'_y & y'_y & z'_y \\ x'_z & y'_z & z'_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

Para poder adotar a matriz homogênea $\mathbf{A}$, que representa a transformação de posição e orientação em uma única matriz, utiliza-se uma matriz (4×4) , descrita na equação (7).

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_x & y'_x & z'_x & o'_x \\ x'_y & y'_y & z'_y & o'_y \\ x'_z & y'_z & z'_z & o'_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Dessa forma, consegue-se alinhar o sistema de coordenadas de diversos sensores, definindo um sistema de coordenadas global para o sistema; bem como interpretar movimentos de um corpo no espaço em 6 GL. Para casos em que se usa um LiDAR e um INS, por exemplo, a Figura 28 e as equações (8) e (9) representam as transformações.

Figura 28 – Representação de pontos capturados por um LiDAR em um sistema de coordenadas global.



Fonte: O autor.

$$p\{p_0, p_1, \dots, p_n\}_{SCG} = \begin{bmatrix} G_q \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot p\{p_0, p_1, \dots, p_n\}_{Li} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} G_q \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_{Li} \cdot \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_{INS} \quad (9)$$

Onde SCG é o sistema de coordenadas global, SCM é o sistema de coordenadas de medição, G_q é a transformação em 6 graus de liberdade de cada nuvem de pontos do SCM para o SCG . Cada nuvem de pontos p adquirida com o LiDAR é transformada até o SCM utilizando dados da calibração extrínseca do sistema, neste caso, representada por $[R \ t]_{Li}$, que atribui valores de rotação e translação do INS para o LiDAR.

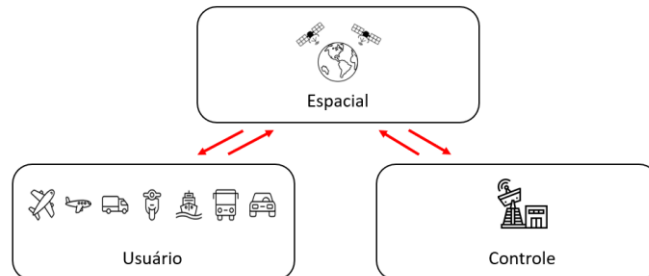
2.3.1 GNSS

O sistema GNSS é um dos métodos de posicionamento global mais famosos e mais utilizados, cujo princípio parte de uma triangulação entre um sistema em movimento e pontos fixos de referência previamente conhecidos e muito bem definidos, que podem trazer informações de latitude, longitude, altura, tempo e velocidade ao usuário (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008).

O sistema funciona conforme a Figura 29, onde o usuário busca saber sua posição atual. O segmento espacial do GNSS – composto por diversos satélites, pertencendo a diferentes sistemas de navegação (Glonass, Galileo, Beidou, GPS); realizam o cálculo da distância entre cada satélite e o usuário, e fornecem ao sistema de controle, o qual tem uma posição conhecida na superfície terrestre, chamada de estação de controle. Esse sistema realiza o cál-

culo da distância de cada satélite em relação ao usuário, e em relação à estação de controle, e efetua uma estimativa de onde o usuário está na superfície terrestre.

Figura 29 – Representação de funcionamento simplificado de um GNSS.



Fonte: O autor.

Apesar de ser um dos modelos de posicionamento global mais tradicionais e consagrados no mundo, o GNSS trata a posição atual sempre com base em pontos de referência conhecidos e sem relação com a trajetória prévia, e esse comportamento, principalmente em situações de perda de sinal – seja por utilização em ambientes fechados ou por falhas momentâneas – pode fazer com que não haja atualização de posicionamento ao longo do deslocamento do usuário. Além disso, o GNSS costuma apresentar erros de posicionamento da ordem de metro, o que não é positivo em situações em que a aplicação é destinada a inspeção industrial. A sua posterior integração com outros sensores inerciais garante melhorias e adição de funcionalidades para outras aplicações, e possibilitam maior eficiência (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008; ZANGENEHNEJAD; GAO, 2021).

2.3.2 IMU

Conceitualmente, IMU é um conjunto de sensores inerciais que, quando combinados, produzem soluções de navegação independente. Comumente, as IMUs são formadas por três tipos de sensores discretos (acelerômetros, girômetros e magnetômetros), cada um com funções específicas que compõem uma solução mais completa à medida em que estes sensores são adicionados (CHAUDHRY et al., 2018). Esse sistema usualmente é composto por três acelerômetros, que determinam a aceleração linear; e três giroscópios, que determinam a velocidade angular. Alguns sistemas mais completos contam também com três magnetômetros, que determinam a influência do campo magnético da Terra e de objetos próximos a IMU (BUTTERFLYGYRO, 2011; CHAUDHRY et al., 2018). A Figura 30 ilustra um modelo de um sensor IMU comercial.

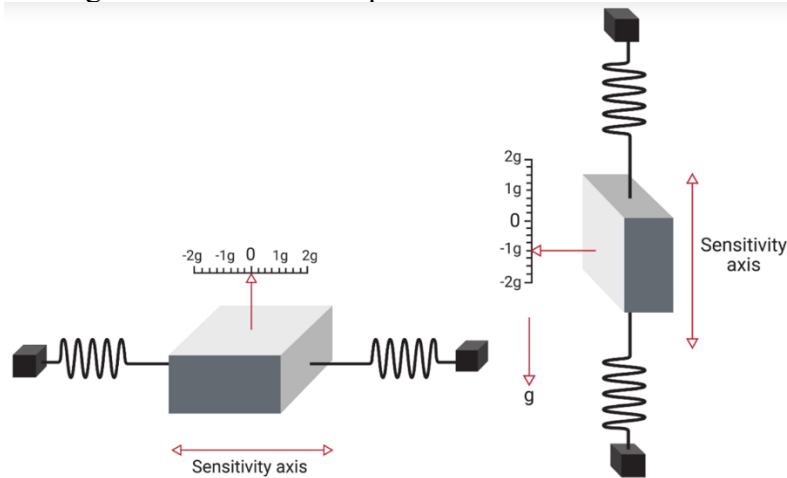
Figura 30 – Modelo comercial de um sensor IMU.



Fonte: (GÉNÉRATION ROBOTICS, 2022).

Os acelerômetros normalmente são montados em trios dentro de cada IMU, uma vez que cada um deles funcionará para um eixo específico do espaço tridimensional, conforme ilustrado na Figura 31. Com o uso de três acelerômetros, é possível identificar, através da aceleração, a posição e velocidade do sistema dinâmico, conforme equações (10) e (11).

Figura 31 – Modelo simplificado de um acelerômetro.



Fonte: Adaptado de (VECTORNAV, [s.d.])

$$\int a(t)dt = v(t) \quad (10)$$

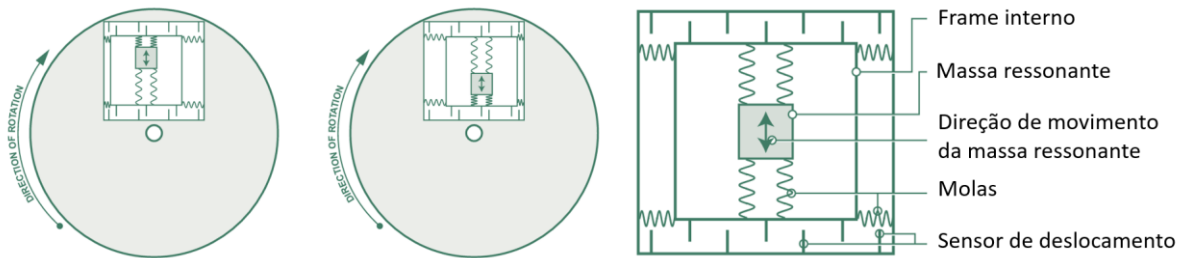
$$\iint a(t)dt = s(t) \quad (11)$$

A equação (10) demonstra que, para cada eixo, a partir da integral da aceleração $a(t)$, é possível encontrar a velocidade $v(t)$. E ao fazer a integral dupla da aceleração $a(t)$ é possível encontrar o deslocamento $s(t)$, conforme equação (11). Sabe-se que a integral de uma função é a área compreendida abaixo da sua representação gráfica, e que essa área pode

ser calculada dividindo-a em n retângulos cuja largura tende a 0. Dessa forma, com intervalos fixos, é possível determinar a velocidade e o deslocamento através de um acelerômetro.

Em complemento aos acelerômetros, estão os girômetros (também conhecidos por giroscópios, ilustrados na Figura 32), responsáveis por determinar velocidade angular e deslocamento angular em um eixo em particular.

Figura 32 – Funcionamento de um giroscópio microeletromecânico (MEMS). O frame interno e a massa ressonante se deslocam lateralmente devido ao efeito *Coriolis*. O deslocamento é calculado pela variação da capacitância do sensor de deslocamento



Fonte: (GEEN; KRAKAUER, 2003).

Na prática, o giroscópio é utilizado para definir a orientação de um sistema em um determinado eixo, e assim como os acelerômetros, costumam estar presentes em trios quando acoplados em IMUs ou outros sistemas inerciais, apresentando as variações angulares para movimentos de rolagem, arfagem e guinada (*Roll*, *Pitch* e *Yaw*).

O princípio conceitual do giroscópio baseia-se na medição de momento angular, e pode ser posteriormente convertido em aceleração angular, velocidade angular e deslocamento angular, conforme as equações (12), (13) e (14).

$$\tau = \frac{\Delta L}{\Delta t} = I \cdot \left(\frac{\Delta \omega}{\Delta t} \right) \quad (12)$$

$$\frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \gamma \quad (13)$$

$$\tau = I \cdot \gamma \quad (14)$$

Sendo

$$\int \gamma(t) dt = \omega(t) \quad (15)$$

$$\iint \gamma(t)dt = \theta(t) \quad (16)$$

O torque τ é calculado pela divisão da variação de momento angular ΔL pelo intervalo de tempo Δt , e é igualmente calculado pelo momento de inércia I multiplicado pela razão entre a velocidade angular ω e a variação de tempo Δt . Define-se, assim, que o torque τ é igual ao momento de inércia I multiplicado pela aceleração angular γ . Sendo assim, para calcular velocidade angular ω e deslocamento angular θ em função do tempo, utiliza-se as equações (15) e (16), sendo a integral simples de γ e a integral dupla de γ , respectivamente.

Aliado aos acelerômetros e giroscópios, encontram-se também em IMUs mais completas os magnetômetros e barômetros. Os magnetômetros, normalmente encontrados aos trios na IMU, servem para calcular a força e a direção de campos magnéticos, seja da Terra ou de objetos próximos ao sistema, e o barômetro, normalmente unitário, que é utilizado para calcular a altitude em que se encontra a IMU, e para auxiliar na atualização dos cálculos relacionados à pressão atmosférica (LI et al., 2019).

As IMUs podem ser classificados de acordo com o número de graus de liberdade (GL) medidos pelo sistema, conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Definição de graus de liberdade em uma IMU

GL	Sensores
6	Acelerômetros em 03 eixos + Giroscópios em 03 eixos
9	6 GL + Magnetômetros em 03 eixos
10	9 GL + Barômetro

Fonte: Adaptado de (CHAUDHRY et al., 2018)

Apesar de as relações serem matematicamente corretas, as realidades de integração de sinal podem ser um pouco diferentes. Apesar de a IMU trazer resultados muito precisos, o seu modo de funcionamento é do tipo *dead reckoning*³, e com isso, os sensores realizam operações matemáticas constantes para encontrar as grandezas necessárias para o usuário. Se cada operação matemática detém uma incerteza de medição, quanto maior o número de atualizações, maior a incerteza acumulada ao longo do tempo.

Existem sistemas inerciais mais completos, chamados de *Inertial Navigation System* (INS), que contém ao menos uma IMU em sua montagem, e já realizam cálculos para reconstrução de trajetória e correção de sinais e movimentos, fornecendo não só dados de orientação

³ *Dead Reckoning* é um procedimento de cálculo do estado atual de um sistema com base no estado anterior, e integra rapidamente mudanças ao sistema de navegação.

muito bem definidos, mas também de posição e velocidade, possibilitando ainda a integração com outros sensores.

2.3.3 INS

O sistema INS é um dos mais capazes sistemas inerciais já desenvolvidos, sendo possível alcançar baixas incertezas de posição, orientação e velocidade quando comparado com a maioria dos sistemas inerciais, e em virtude disso esses sistemas são comumente utilizados para celulares, videogames com controles de movimento e realidade aumentada, sistemas autônomos, controle avançado de equipamentos hospitalares, lançamento de foguetes, estabilização de submarinos e navegação de aeronaves tripuladas e não tripuladas (BUTTERFLYGYRO, 2011; CHAUDHRY et al., 2018; WANG, 2009).

Diferentemente da IMU, o INS já realiza os cálculos de estimativa de aceleração, velocidade, posição, orientação e altitude, considerando todos os sensores que compõem o sistema. Na IMU, todos os dados são armazenados de forma bruta e sem interação entre os sensores.

É muito comum encontrar a combinação INS-GNSS, pois o erro acumulado no decorrer do tempo com o INS pode ser parcialmente controlado com o uso do GNSS, tornando-os complementares em diversas aplicações, tanto que muitos INS já vêm com GNSS integrados de fábrica e com cálculos automatizados. Essa combinação traz uma variação nos graus de liberdade do sistema, onde o INS conta com um grau de liberdade extra quando comparado com a IMU (Tabela 8), relacionado justamente com a integração do GNSS, que traz a posição do sistema no espaço, e esses dados são utilizados como forma de corrigir as informações de posição trazida pelos outros sensores.

Apesar de ser possível determinar a posição de um corpo no espaço utilizando um INS, as incertezas de medição, assim como na IMU, vão se acumulando no decorrer do uso do equipamento, e acabam por se tornar muito elevadas para aplicações de curto alcance ou de inspeção, principalmente na ausência de GNSS. Diante disso, os INS normalmente contam com artifícios matemáticos para predição de movimento, e comumente utilizam os filtros de Kalman para isso.

Amplamente utilizados para estimação de estado de robôs móveis, os filtros de Kalman baseiam-se em técnicas recursivas de predição de estado, sendo sua função estimar a pose sobre um sistema dinâmico linear na presença de ruídos (OLIVEIRA; GONÇALVES, 2017a; SIEGWART; NOURBAKHS, 2004; VANDI, 2016a). A saída do filtro de Kalman é

uma função densidade de probabilidade Gaussiana com média $\hat{x}$ e covariância P , e representa não só uma única estimativa de posição do robô móvel, mas uma distribuição de possíveis posições (OLIVEIRA; GONÇALVES, 2017a; THRUN, 2000).

O funcionamento de um filtro de Kalman é dividido em duas etapas: a primeira etapa, onde realiza-se a predição de um novo modelo dinâmico, chamado de valor previsto, com base no valor inicial e acrescido de ruídos; e a segunda etapa, onde leva-se em consideração a medição atual do sistema, chamado de valor medido. Nesta etapa é calculada a diferença entre valor previsto e valor medido, sendo definido um peso para cada um dos valores, chamados de ganho de Kalman, onde ocorre uma atualização do modelo, atuando diretamente na covariância do erro. Esses valores calculados serão as predições feitas em relação à respectiva iteração do sistema (HOSTETTLER, 2018; OLIVEIRA; GONÇALVES, 2017a; THRUN, 2000).

O filtro de Kalman tradicional, ainda que muito eficaz na predição de estado, funciona somente de forma linear, sendo sua aplicação limitada a este padrão de movimento. Com o passar do tempo, diversos modelos de filtros de Kalman foram desenvolvidos, cada um atribuindo características diferentes, para aplicações diferentes.

Os três modelos mais famosos estão listados na Tabela 9, sendo eles *Kalman Filter* (KF), *Extended Kalman Filter* (EKF) e *Unscented Kalman Filter* (UKF).

Tabela 9 – Filtros de Kalman.

	Filtro	Método de Representação	Modelagem	Custo Computacional
Navegação Indireta	KF	Ângulos de Euler	Linear	Baixo
Navegação Direta	EKF	Quatérnios	Localmente Linear	Baixo/Médio
	UKF	Ângulos de Euler e Quatérnios	Não Linear	Médio/Alto

Fonte: Adaptado de (DOUGLAS, 2019)

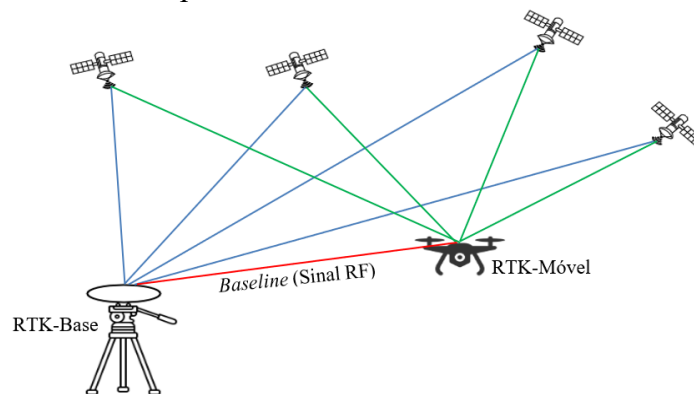
Ainda que seja possível realizar correções de movimento com a combinação INS-GNSS e utilizando filtros preditivos, quando a aplicação exige baixa incerteza, costumeiramente faz-se uso de técnicas de correção do sinal do GNSS para obter uma posição mais precisa no espaço, como por exemplo as técnicas RTK (*Real Time Kinematics*) e PPK (*Post-Processing Kinematics*).

2.3.4 RTK/PPK

O RTK é uma técnica de navegação que atua na correção em tempo real dos dados coletados por um GNSS, podendo definir a posição de um corpo com erro na casa de centímetros (HORUS AERONAVES, 2020; MORAIS, 2013a).

O sistema funciona com a captação de sinais de satélites por receptores GNSS em uma estação base, fixa no solo, e pelo menos uma estação móvel, que seria um veículo em movimento. Essas estações comunicam-se através de um *link* de comunicação tipicamente sem fio e por radiofrequência, por esta ser uma técnica que oferece baixa latência (GAKSTATTER, 2009; HORUS AERONAVES, 2020). Através desse sistema, a estação base calcula o erro de seu próprio posicionamento com o tempo, e uma correção de movimento pode ser utilizada por estações móveis dentro de um raio limite. O RTK é explicado na Figura 33.

Figura 33 – Princípio de funcionamento de um sistema RTK/PPK.



Fonte: O autor.

Como os dois componentes, base e móvel, estão conectados por um sinal de rádio, é possível determinar um *baseline*⁴ entre eles, o que permite realizar a correção do movimento por meio de uma triangulação entre os componentes do sistema (EMLID, [s.d.]; GAKSTATTER, 2009; HORUS AERONAVES, 2020)

Vale ressaltar que todas as correções de movimento feitas com um sistema RTK são processadas em tempo real, e que dependendo da aplicação, é possível realizar o processamento após o fim da execução. Essa técnica é chamada de *Post-Processing Kinematics* (PPK). Ela também pode ser utilizada na eventualidade de o sistema RTK perder sinal por algum motivo, ou por uma limitação do próprio sistema, onde a correção precisa ser feita *à posteriori*.

⁴ *Baseline* é a distância linear entre dois equipamentos.

2.4 FUSÃO DE DADOS LIDAR-INS

Uma grande variedade de sensores pode ser utilizada em um UAS, podendo ser desde aplicações mais simples, como a medição de uma grandeza física como temperatura e pressão; até aplicações mais sofisticadas, como é o caso de IMU e GNSS que medem orientação e localização, por exemplo. Os UAS comumente apresentam uma série de sensores integrados para controle de voo. Entretanto, para desenvolver soluções completas, muitas vezes é necessário utilizar mais de um sensor simultaneamente, seja por redundância de informação ou por redução de incertezas de dados vindos de outro sensor do UAS.

A exigência de múltiplos sensores está diretamente relacionada ao fato de a maioria dos sensores não fornecerem todas as informações necessárias para uma aplicação de engenharia. Um GNSS pode trazer informações sobre posicionamento global, mas não oferece detecção de objetos e obstáculos, o que naturalmente necessitaria de um sensor como o LiDAR, por exemplo, para compor o sistema (VANCI, 2016b). Outra razão para o uso de mais de um sensor está na redundância. Um sensor como o GNSS, por exemplo, pode dar a informação de posição para o sistema, mas essa informação pode estar composta de erros e ruídos muito elevados e com baixa frequência de aquisição. Logo, um segundo sensor atuaria como um fator de correção ao primeiro (VANCI, 2016b).

A fusão de múltiplos sensores pode ser utilizada a fim de reduzir a incerteza de medição do sistema através da combinação das medições de cada sensor (OLIVEIRA; GONÇALVES, 2017b). Além de ser um problema de caráter mecânico e eletrônico, também é um problema que demanda refinamentos computacionais e matemáticos em boa parte dos casos. Para o caso INS-GNSS, são normalmente feitos os cálculos de posição e orientação, além da aplicação de filtros de Kalman – amplamente utilizados para estimativa de estado de sistemas móveis (CHADHA, 2018) – e técnicas de *iterative closest points* (ICP), em que são utilizadas aproximações matemáticas para encontrar a melhor transformação entre duas nuvens de pontos no espaço (NAHANGI; HAAS, 2014).

As técnicas de ICP também podem ser aplicadas em situações em que não há sensores inerciais presentes no sistema, gerando estimativas de estado baseadas em pontos homólogos nas interações frame a frame.

2.5 ITERATIVE CLOSEST POINTS (ICP)

ICP é um dos algoritmos mais utilizados para odometria utilizando LiDAR e alinhamento de nuvens de pontos (SARVROOD; HOSSEINYALAMDARY; GAO, 2016; ZHANG,

2016). Ele funciona como uma relação entre duas nuvens de pontos consecutivas, encontrando rotação e translação ótimas com base nos pares de pontos correspondentes, de modo que a diferença entre esses pontos seja minimizada de um frame para outro iterativamente (ZHANG, 2016).

Dados dois conjuntos de pontos X e Y (equações (17) e (18)) com correspondências $C = \{(i, j)\}$, deseja-se encontrar a rotação R e a translação t ótimas que minimizem a soma dos erros quadráticos, conforme a equação (19), onde x_i e y_j são os pontos correspondentes para cada dataset.

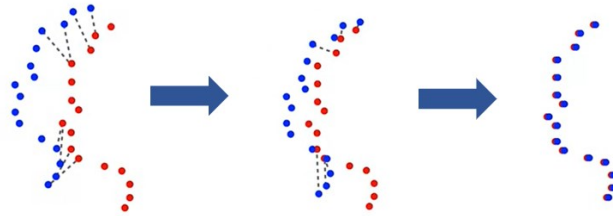
$$X = \{x_1, \dots, x_n\}, x_n \in C \quad (17)$$

$$Y = \{y_1, \dots, y_n\}, y_n \in C \quad (18)$$

$$\sum_{(i,j) \in C} \|x_i - R y_j - t\|^2 \rightarrow \min \quad (19)$$

Se todos os pontos x_i tiverem correspondentes exatos y_j , o alinhamento poderá ser feito de forma perfeita, conforme ilustrado na Figura 34.

Figura 34 – Processo de alinhamento de duas nuvens de pontos utilizando ICP.



Fonte: Adaptado de (BURGARD et al., [s.d.]).

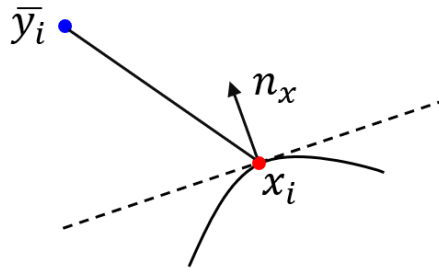
No entanto, nem sempre as transformações são realizadas de forma perfeita. Na maioria das vezes, as relações entre duas nuvens de pontos sofrem variações, exigindo que cada ponto x_i forme pares correspondentes com $\bar{y}_i$, que são os pontos com maior proximidade que podem fazer correspondência entre duas nuvens consecutivas, conforme equação (20).

$$\sum \|x_i - \bar{y}_i\|^2 \rightarrow \min \quad (20)$$

Apesar de muito útil, o ICP tradicional não se aplica a todas as situações, e por se tratar de um algoritmo desenvolvido no início da década de 90, algoritmos com diferentes princípios foram sendo desenvolvidos, otimizando resultados, aumentando a velocidade de execução do alinhamento e reduzindo o custo computacional. No Apêndice A, é possível verificar diversas técnicas de ICP.

Outra técnica de ICP popularmente disseminada é a técnica ponto a plano, onde ao invés de o cálculo ser realizado com base nos pontos correspondentes, eles são calculados com base na menor distância entre o ponto de uma nuvem X e uma superfície formada a partir dos pontos de Y . Portanto, ao invés de o cálculo ser feito ponto a ponto, ele é feito entre a subtração entre os pontos x_i e $\bar{y}_i$ multiplicado pela normal ao ponto x_i , denominada por n_x , conforme Figura 35 e equação (21).

Figura 35 – Representação do ICP ponto a plano.



Fonte: O autor.

$$\sum ((x_i - \bar{y}_i) \cdot n_x)^2 \rightarrow \min \quad (21)$$

Iterando consecutivamente os pontos homólogos para cada concatenação de nuvem de pontos, é possível gerar um dataset contendo características de todas as nuvens de pontos de determinado experimento, assim como determinar sua trajetória.

No próximo capítulo será abordado sobre a proposta de trabalho, detalhando os procedimentos que serão realizados.

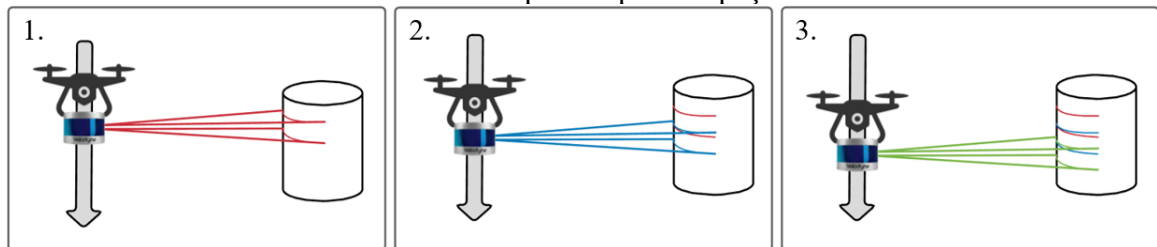
3 PROPOSTA DE TRABALHO

A aplicação proposta pelo trabalho visa proporcionar uma técnica viável de inspeção industrial de *risers* utilizando um UAV e um LiDAR como elementos fundamentais para avaliação qualitativa da superfície externa de dutos a curta distância.

O intuito da aplicação, de forma mais específica, é avaliar a viabilidade de implementação da inspeção do trecho PIDF-4 de *risers* petrolíferos como forma de auxiliar ou substituir escaladores industriais no trecho em questão, como forma de reduzir riscos operacionais, custos, além de otimizar o processo de inspeção.

A ideia por trás da aplicação está nas capturas de nuvens de pontos consecutivas com o uso de um LiDAR a curtas distâncias do mensurando, podendo as medições serem feitas com deslocamentos pré-definidos ou de forma contínua (Figura 36), como forma de adquirir características da cena, atribuindo o uso de técnicas de ICP para estimar a trajetória do sistema. Dessa forma, é possível avaliar as incertezas de medição, tanto da trajetória como da geometria dos mensurandos, e analisar a usabilidade da técnica para a aplicação de inspeção de curta distância.

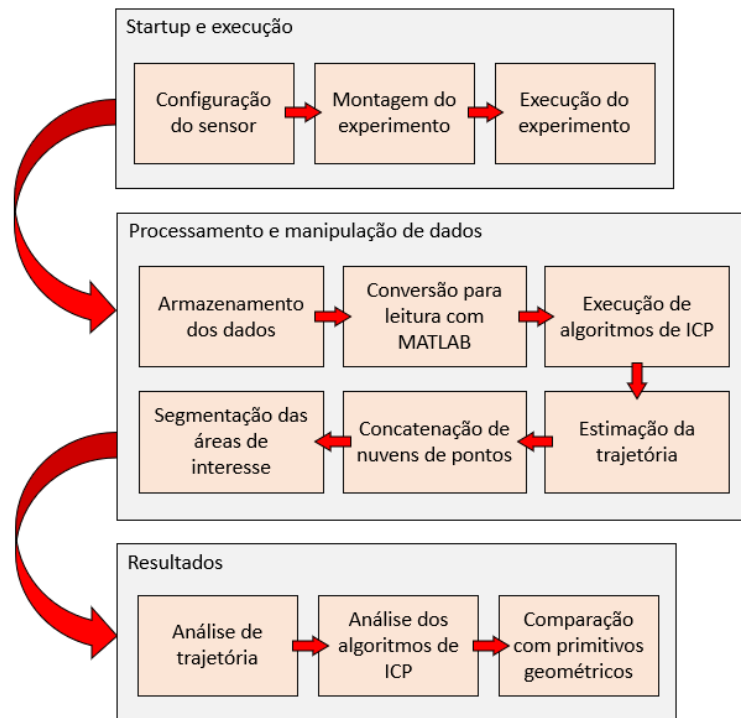
Figura 36 – Representação do movimento de um sistema UAV + LiDAR para capturas consecutivas de nuvens de pontos para inspeção de dutos.



Fonte: O autor.

De modo a entender o comportamento do LiDAR, serão feitos experimentos com duas montagens distintas. Ressalta-se que as características detalhadas dos componentes e dos softwares utilizados para os experimentos encontram-se no Capítulo 4. O fluxograma de trabalho proposto está ilustrado na Figura 37.

Figura 37 – Fluxograma de trabalho.



Fonte: O autor.

A estrutura ficou dividida em três grupos: Startup e execução, processamento e manipulação de dados, e resultados.

O primeiro grupo compreende os procedimentos iniciais, desde a montagem, configuração e estruturação do experimento, até o momento em que ele é executado.

O segundo grupo consiste em todas as etapas necessárias para transformar os dados gerados com o sensor em informação, compreendendo o armazenamento dos dados, a conversão dos dados para possibilitar o uso do MATLAB nas análises, a execução dos algoritmos de ICP nativos do MATLAB, a estimação da trajetória percorrida pelo sensor durante o experimento, a concatenação de todas as nuvens de pontos de cada experimento e a segmentação das áreas de interesse.

Por último, tem-se o terceiro grupo, responsável pela ilustração e análise dos resultados obtidos após o processamento, e servirão para alcançar as conclusões do trabalho.

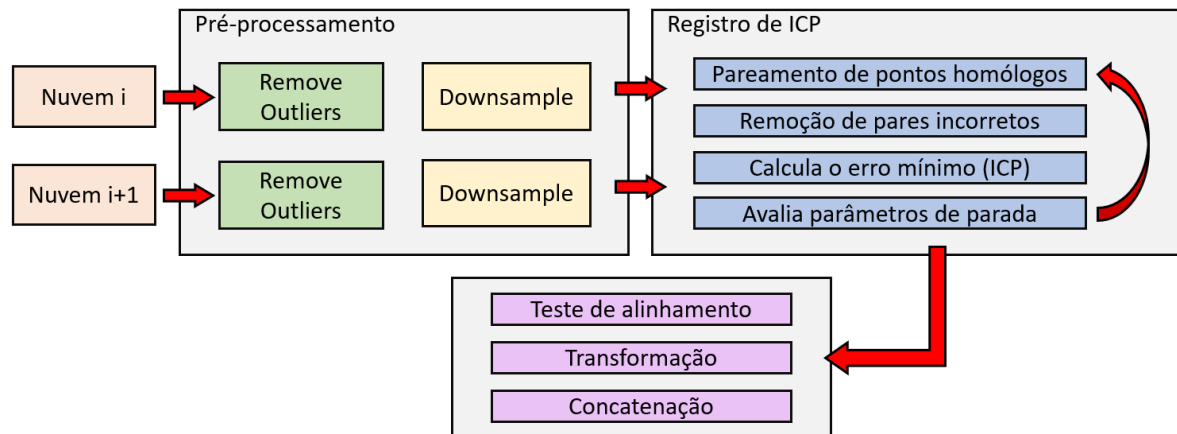
Para o ICP, foram definidas as técnicas ponto a ponto e ponto a plano para serem testadas, uma vez que são técnicas clássicas. Uma vez que o estudo venha a se aprofundar, outras técnicas podem ser abordadas e comparadas.

Para processar essas técnicas, foi escolhida a biblioteca *pointcloud*, do *MATLAB*, pois além de apresentar *pipelines* muito bem esclarecidos, é possível realizar procedimentos

de remoção de ruídos e *outliers*, simplificações de nuvens de pontos, além de diversas operações de união e comparação visual.

O fluxograma do ICP está estruturado na Figura 38 e será utilizado com os mesmos parâmetros para todas as montagens e para todos os experimentos.

Figura 38 – Fluxograma de ICP.



Fonte: O autor.

No capítulo seguinte, serão abordados os materiais utilizados ao longo dos experimentos, bem como a metodologia utilizada para colocá-los em prática.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Durante o projeto de pesquisa e desenvolvimento, diversos equipamentos foram adquiridos de modo a comprovar as teorias acerca dos sistemas metrológicos desenvolvidos com o propósito de inspecionar *risers* petrolíferos. Os equipamentos que serão utilizados nos experimentos contidos na presente pesquisa serão abordados a seguir.

A *Velodyne* é, há muitos anos, referência em LiDARs rotativos, e uma das mais completas quando o assunto é escaneamento 3D portátil, seja para UAVs como para robôs, carros e sistemas customizados. O modelo em questão é um *Velodyne Puck-LITE* (Figura 39), equipamento de entrada da marca e o mais comercializado no mundo.

Figura 39 – *Velodyne Puck-LITE*.



Fonte: (VELODYNE, [s.d.]).

A razão da escolha se dá pela sua capacidade de captura de até 16 canais simultâneos com massa reduzida, podendo ser acoplado a aeronaves para uso industrial. O sensor também dispõe de uma das mais completas literaturas e acervos online sobre o equipamento. Na Tabela 10 estão listadas as especificações técnicas do *Velodyne Puck-LITE*.

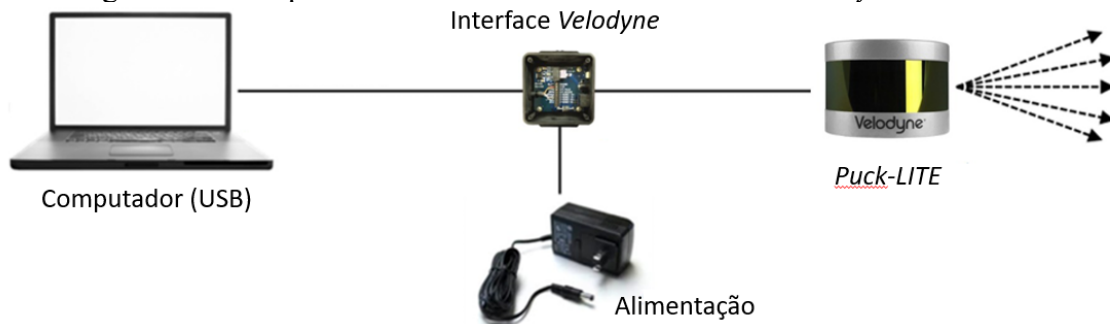
Tabela 10 – Especificações técnicas do LiDAR *Velodyne Puck-LITE*.

Tipo de sensor	LiDAR
Fabricante	Velodyne
Modelo	Puck Lite
Princípio	<i>Time of Flight</i> - ToF
Incerteza de medição na distância R	±30,0mm
Distância min. e máx. de medição	0,3m a 100,0m
Número de canais	16 lasers
Ângulo de abertura vertical	±15°
Ângulo de abertura horizontal	360°
Resolução no ang. de azimute	0,1° a 0,4°
Passo no ang. de elevação	2°
Frequência ang. mín. e máx.	5Hz a 20Hz
Classe da fonte laser	Classe 1 eye-safe (IEC 60825-1)
Comprimento de onda do laser	903nm
Conexão	Ethernet 100Mbps (UDP)
Pacote GNSS tratado	Sentenças NMEA \$GPRMC e \$GPGGA
Sincronismo	PPS através de I/O dedicado
Taxa de amostragem	300.000pps até 600.000pps
Dimensões (raio – Altura)	Raio de 103,3mm - altura de 71,7mm
Consumo de energia	8W
Massa	590g
Grau de proteção	IP67

Fonte: (VELODYNE, [s.d.]).

De acordo com (KIDD, 2017), a incerteza de medição do *Velodyne Puck-LITE* até 8 m em aferições únicas não ultrapassam o que está previsto no catálogo do equipamento. Salienta-se, também, que o equipamento explica em seu manual que para toda e qualquer aferição efetuada dentro dos limites previstos de 0,3m até 100,0m, o comportamento do equipamento tende a não apresentar variações significativas nas medições.

O *Puck-LITE* conta com uma interface eletrônica conectada de forma fixa através de um cabo de comunicação, e é ela a responsável pela alimentação e transmissão de dados. A montagem dos componentes do LiDAR foi realizada conforme a Figura 40. Para todos os experimentos, foram utilizadas as mesmas configurações de captura com o sensor, e podem ser consultadas na Tabela 11.

Figura 40 – Setup básico de funcionamento do LiDAR *Velodyne Puck-LITE*.

Fonte: Adaptado de (VELODYNE, [s.d.]).

Tabela 11 – Configurações do LiDAR.

Configuração	Valor
RPM	300
FOV	360°
Tipo de retorno	O mais forte (<i>Strongest</i>)

Fonte: O autor.

A montagem completa do sistema também contou com um laptop *AVELL C51* com processador *Intel Core i7*, 32Gb de memória RAM e placa de vídeo *Nvidia GTX 1050Ti*. As capturas foram adquiridas em um sistema operacional *Ubuntu 16.04*, e utilizando bibliotecas do *Robot Operating System*⁵ (ROS). A biblioteca principal utilizada para as capturas foi desenvolvida pela própria *Velodyne* e atribui diversas funções para realizar a captação dos dados em tempo real e para pós-processamento. A lista completa de softwares é ilustrada na Tabela 12.

Tabela 12 – Softwares utilizados.

Software	Versão	Aplicação
MATLAB	2021a	Processamento de nuvens de pontos e operações matemáticas.
CloudCompare	2.13	Limpeza de nuvens de pontos.
GOM Inspect	2019 Hotfix 7	Geração de primitivos geométricos computacionais e mapa de desvio.
PointKit	<i>Beta</i>	Medições ponto a ponto e cálculo de comprimento do cilindro pós concatenação.

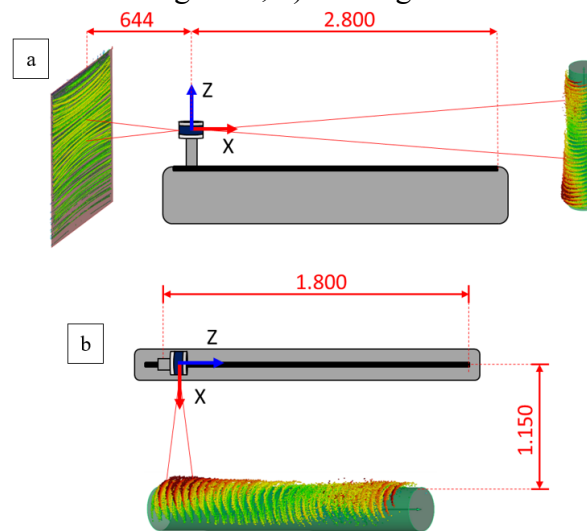
Fonte: O autor.

Os experimentos podem ser divididos em dois grupos: Montagem A, onde o LiDAR encontra-se com o eixo Z ortogonal ao eixo de movimento de um interferômetro – que é um sistema de medição que utiliza luz ativa para efetuar a medição de distâncias de forma muito

⁵ *Robot Operating System*, ou simplesmente ROS, é uma coleção de bibliotecas e *frameworks* para robótica que fornecem a funcionalidade de um sistema operacional.

precisa –, e compreende os experimentos 1 e 2; e Montagem B, onde o LiDAR encontra-se com o eixo Z paralelo e alinhado ao eixo de movimento do interferômetro, e compreende os experimentos 3 e 4. As montagens podem ser visualizadas na Figura 41.

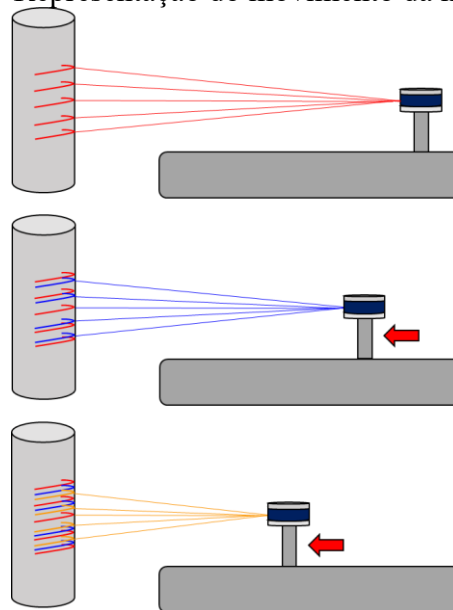
Figura 41 – Representativo das montagens utilizadas para os experimentos 1, 2, 3 e 4. a) Montagem A; b) Montagem B.



Fonte: O autor.

O experimento 1 compreende capturas feitas com o LiDAR, com um passo de 200mm por captura, por uma trajetória de 2.800mm. A montagem do LiDAR será feita sobre uma bancada onde a altura do LiDAR possibilita a captura completa da sala em que foi feito o experimento, trazendo elementos da cena que contribuam para o cálculo do algoritmo de ICP. O eixo X do LiDAR foi montado de modo a ficar o mais alinhado possível com a guia do interferômetro, conforme ilustrado na Figura 42.

Figura 42 – Representação do movimento da montagem A.



Fonte: O autor.

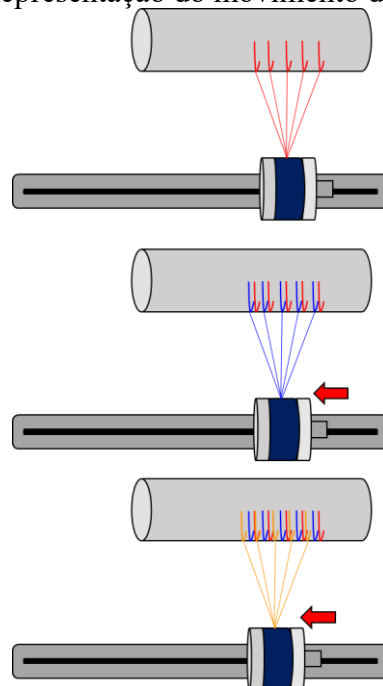
Para calcular a posição e orientação do LiDAR ao longo do deslocamento, serão utilizadas duas técnicas de ICP para estimar o estado do sensor ao longo de cada passo: ponto a ponto e ponto a plano. Todas as posições serão estimadas até o deslocamento final previsto na montagem.

Ao redor do LiDAR, foram posicionados dois objetos: um painel feito em madeira, onde serão feitas comparações entre a concatenação das nuvens de pontos de todas as medições na região do painel com um plano de referência computacionalmente gerado; e um simulacro de um *riser*, feito em PVC, onde serão feitas comparações entre a concatenação das nuvens de pontos de todas as medições na região do simulacro com um cilindro de referência computacionalmente gerado.

O experimento 2 segue exatamente a mesma montagem do experimento 1, porém, ao invés de passos de 200mm, as capturas são feitas continuamente por todo o percurso, em uma movimentação a mão livre. Os mesmos mensurandos utilizados no experimento 1 permanecem no experimento 2, na mesma posição e orientação, e as comparações a serem realizadas serão as mesmas, com exceção da estimativa de estado, que será realizada sem efetuar comparações, uma vez que o movimento foi feito a mão livre e de forma contínua.

O experimento 3 compreende capturas feitas com o LiDAR com um passo de 50mm por um percurso de 1.850mm, conforme Figura 43

Figura 43 – Representação do movimento da montagem B.



Fonte: O autor.

A montagem do LiDAR foi feita na mesma altura que os experimentos 1 e 2, alterando somente a orientação do LiDAR, que muda de uma montagem para a outra. Neste caso, o sistema foi montado de modo a deixar o eixo Z do LiDAR o mais alinhado possível com o interferômetro.

Para calcular a posição e orientação do LiDAR ao longo do deslocamento, serão utilizadas as mesmas técnicas de ICP da montagem A para estimar a trajetória do sensor ao longo de cada passo, até o fim de curso definido para a montagem B, semelhante ao que será feito no experimento 1.

No experimento 3, há somente um mensurando: o simulacro de um *riser*, posicionado paralelamente ao eixo Z do LiDAR. Este simulacro é exatamente o mesmo utilizado nos experimentos 1 e 2, mudando somente sua posição e orientação em relação ao LiDAR.

O experimento 4 segue exatamente a mesma montagem do experimento 3, porém, ao invés de passos de 50mm, as capturas são feitas continuamente por todo o percurso do experimento, em uma movimentação a mão livre. O mesmo mensurando utilizado no experimento 3 permanece no experimento 4, na mesma posição e orientação.

Foi utilizado um simulacro de um *riser* feito em PVC (Figura 44), de aproximadamente 300mm de diâmetro e 1.700mm de comprimento. A superfície do mensurando é fosca e adequada para experimentos utilizando um LiDAR. O simulacro apresenta alguns defeitos

que simulam situações reais do *riser* petrolífero, no entanto não serão avaliados tais defeitos, uma vez que as dimensões destes são menores que a incerteza do sistema de medição.

Figura 44 – Simulacro *riser*.



Fonte: O autor.

O alinhamento do simulacro foi feito utilizando dois suportes, cada um próximo de uma das extremidades. Além de garantir estabilidade ao mensurando, ele o eleva, ampliando a região de captura com o LiDAR, que acabava sendo prejudicada devido ao contato com a superfície da bancada.

O outro objeto utilizado foi um painel em madeira (Figura 45), cujo erro de planeza não é capaz de ser medido com o uso do LiDAR por ser menor que sua incerteza de medição, e por isso é irrelevante para o experimento. Sua superfície é fosca e adequada para experimentos utilizando um LiDAR e não apresenta nenhuma imperfeição na região em que foram realizadas as capturas com o LiDAR.

Figura 45 – Painel em madeira.

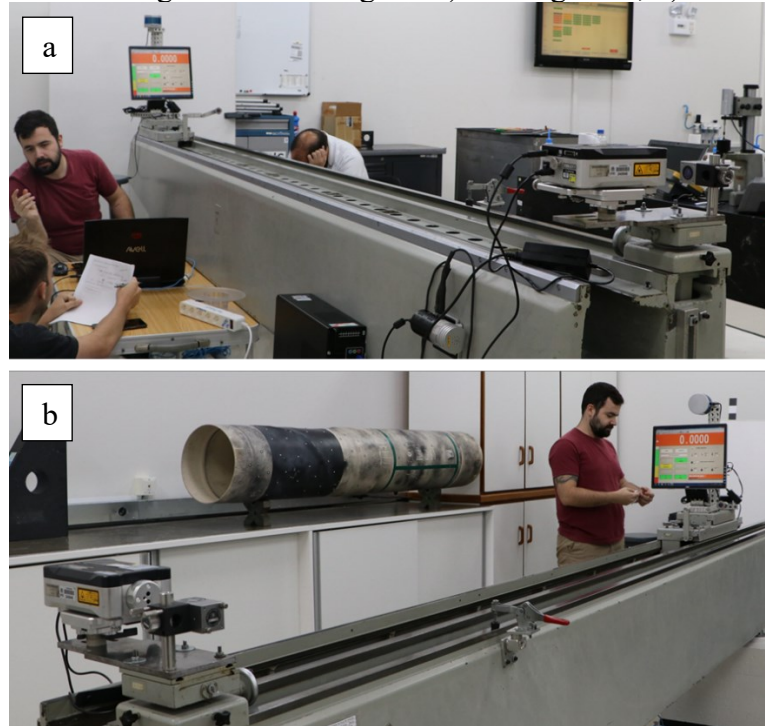


Fonte: O autor.

A fixação do painel foi feita utilizando dois suportes na parte inferior e um grampo de ajuste rápido na lateral do painel. O sistema foi ajustado de modo a ficar o mais próximo da ortogonalidade com o interferômetro.

O LiDAR foi acoplado a uma guia de 3.000mm de comprimento, onde um interferômetro, com incerteza inferior a 1/10 da incerteza da medição do sistema de medição, realizava as medições de deslocamento. Na Figura 46 encontra-se uma visão geral das montagens A e B.

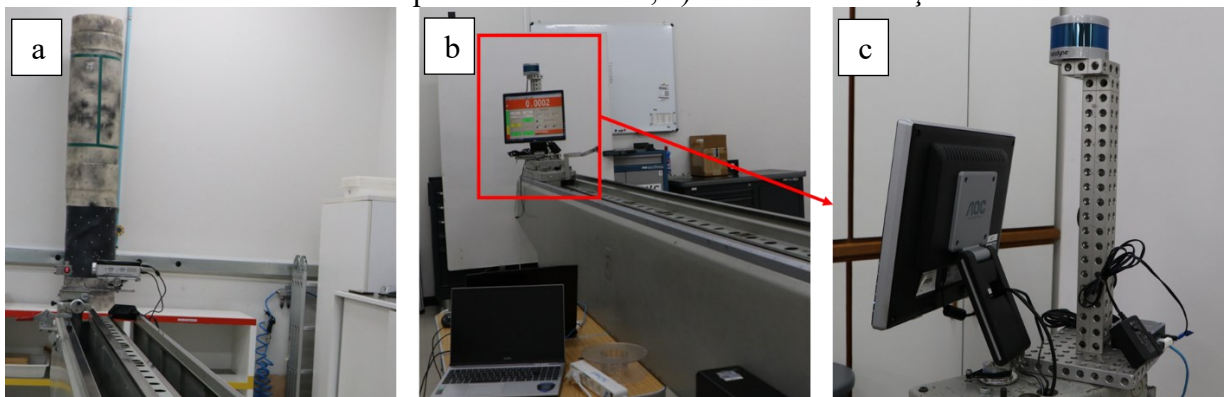
Figura 46 – Visão geral das montagens. a) Montagem A; b) Montagem B.



Fonte: O autor.

O LiDAR e sua caixa de interface foram instalados diretamente na guia, e para que não houvesse oclusão na visada do LiDAR, foi necessário adicionar uma torre, garantindo assim total visibilidade do sistema durante os experimentos. Na Figura 47, é possível visualizar a montagem A, referente aos experimentos 1 e 2.

Figura 47 – Detalhes da Montagem A. a) Interferômetro e simulacro *riser*; b) Guia do interferômetro e o painel em madeira; c) Sistema de medição.



Fonte: O autor.

Na montagem A, utilizada para os experimentos 1 e 2, o LiDAR fica acoplado com o eixo Z ortogonal ao eixo do interferômetro, e com o eixo Y posicionado na tentativa de deixar alinhado com o eixo do interferômetro, realizando capturas horizontais do ambiente.

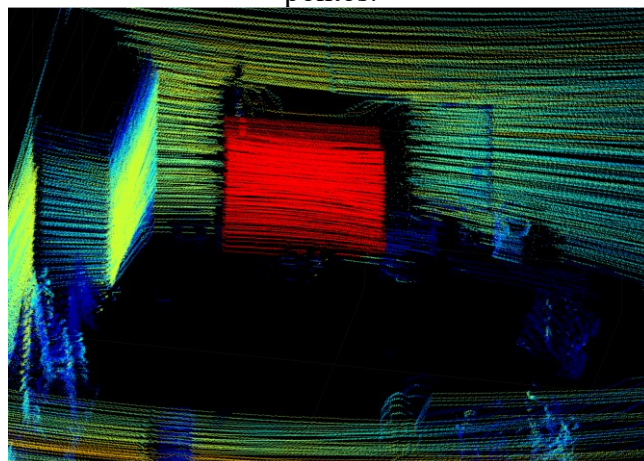
Para o experimento 1, seguiu-se as seguintes etapas:

1. Posicionar o LiDAR;
2. Realizar captura;
3. Após finalizada a captura, movimentar o sistema de medição em 200mm;
4. Efetuar os procedimentos 2 e 3 novamente até alcançar 3000mm.

Para este experimento, algumas análises foram designadas. A primeira está relacionada à trajetória do LiDAR utilizando técnicas de ICP, comparando com as trajetórias reais de referência que foram realizadas no interferômetro. Para cada passo de 200mm percorrido, é possível realizar a análise através do resultado da trajetória estimada pelo algoritmo de ICP. Através dessa comparação, avalia-se a significância da incerteza de trajetória com a estimação de estado, e conclui-se sobre a eficiência do uso da técnica em aplicações de inspeção.

A segunda análise está relacionada à captura dos pontos incidentes sobre o painel em madeira após corrigir o movimento com as estimativas advindas do ICP, e após a concatenação de todas as nuvens de pontos do experimento (Figura 48). Com esses dados, será possível avaliar o erro de planeza do painel ao comparar os resultados das nuvens de pontos com um plano gerado computacionalmente.

Figura 48 – Pontos incidentes sobre o painel em madeira após concatenação das nuvens de pontos.

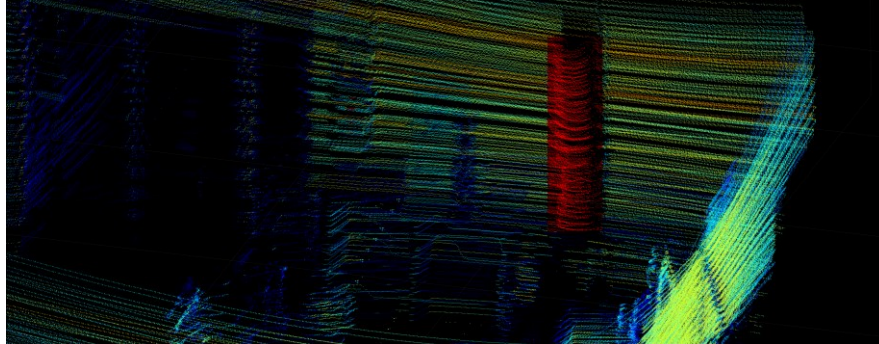


Fonte: O autor.

A terceira análise a ser realizada é com relação ao simulacro *riser*. Após corrigir a trajetória com o uso do ICP, e após concatenar todas as nuvens de pontos do experimento, serão gerados dois cilindros computacionais – um utilizando uma referência em CAD do simulacro *riser*, e um utilizando os pontos que representam o simulacro *riser* na concatenação –

buscando avaliar as incertezas geométricas ao utilizar o LiDAR. A Figura 49 ilustra os pontos incidentes sobre o simulacro *riser* que serão utilizados para gerar o cilindro de referência.

Figura 49 – Pontos incidentes sobre simulacro *riser* após concatenação das nuvens de pontos.



Fonte: O autor.

Para o experimento 2, seguiu-se as seguintes etapas:

1. Posicionar o LiDAR;
2. Realizar uma captura contínua, movimentando o sistema de medição manualmente até alcançar 2.800mm.

Vale ressaltar que, para o experimento 2, duas análises serão feitas idênticas ao experimento 1, com exceção da análise de trajetória. Por se tratar de uma captura contínua feita a mão livre, não há como avaliar o erro de deslocamento em relação ao interferômetro.

Para os experimentos 3 e 4, tem-se a montagem B (Figura 50), mantendo o LiDAR com o eixo Z alinhado com o interferômetro, realizando assim capturas verticais do ambiente. O intuito dessa montagem é justamente poder avaliar a incerteza de medição do LiDAR em um movimento similar ao que seria caso estivesse acoplado a uma aeronave e registrando capturas de um *riser*. A montagem B também contou com uma torre para elevar o LiDAR, porém também contou com um adaptador, fazendo com que o sensor rotacione 90 graus e fique com o eixo Z paralelo com o interferômetro.

Figura 50 – Detalhes da Montagem B. a) Interferômetro e simulacro *riser*; b) Guia do interferômetro e sistema de medição; b) Sistema de medição.



Fonte: O autor.

Para o experimento 3, seguiu-se as mesmas etapas do experimento 1, mudando somente o passo de 200mm para 50mm, e o caminho percorrido, de 2.800mm para 1.800mm. Outras diferenças entre os experimentos 3 e 1 estão nos mensurandos a serem aferidos, onde o experimento 3 não conta com o painel em madeira, e o simulacro *riser* fica na posição horizontal, paralelo ao eixo do interferômetro, diferente do experimento 1, que ficava na posição vertical, ortogonal ao eixo do interferômetro. Vale ressaltar que as análises a serem realizadas no experimento 3 se assemelham às do experimento 1, com exceção do erro de medição do painel em madeira, visto que este mensurando não consta no experimento 3.

Para o experimento 4, seguiu-se as mesmas etapas do experimento 2, mudando somente o caminho total percorrido, de 2.800mm para 1.800mm. Este experimento conta com as mesmas análises realizadas no experimento 3, com exceção da análise de trajetória. Por se tratar de uma captura contínua feita a mão livre, não há como comparar com o deslocamento no interferômetro.

Para analisar os erros de trajetória dos experimentos 1 e 3, fez-se o uso dos algoritmos de ICP ponto a ponto e ponto a plano – os mesmos utilizados para a análise dos mensurandos de todos os experimentos (Figura 38) – para estimar a trajetória realizada pelo LiDAR e posteriormente fazer uma comparação com o deslocamento medido pelo interferômetro. Sabendo que o LiDAR foi posicionado manualmente, de modo a ficar alinhado com o interferômetro, foi calculada a magnitude do vetor posição estimado com os algoritmos de ICP e definida como o deslocamento realizado paralelo ao interferômetro.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo, estão apresentados os resultados obtidos nos quatro experimentos realizados, visando avaliar o uso do LiDAR *Velodyne Puck-LITE* para inspeções industriais de curtas distâncias. Foram avaliadas as incertezas de medição acerca dos mensurandos expostos diante de cada experimento, bem como os erros de trajetória naqueles experimentos que trazem deslocamentos pré-estabelecidos.

5.1 ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS

A ordem das análises se dá iniciando pelas trajetórias dos experimentos 1 e 3, seguido das análises do mensurando painel em madeira dos experimentos 1 e 2, e por último as análises do mensurando simulacro *riser* dos experimentos 1, 2, 3 e 4. Serão feitas, também, comparações entre os experimentos e uma discussão acerca das limitações, vantagens e desvantagens dos experimentos realizados.

Na Tabela 13 estão listadas a quantidade de capturas por experimento e o número de pontos obtidos ao final de cada concatenação.

Tabela 13 – Número de capturas e número de pontos de cada experimento.

		Número de capturas	Número de pontos
Experimento 1	Ponto a ponto	14	852.742
	Ponto a plano	14	852.394
Experimento 2	Ponto a ponto	249	11.790.293
	Ponto a plano	249	12.051.084
Experimento 3	Ponto a ponto	37	2.027.549
	Ponto a plano	37	2.025.314
Experimento 4	Ponto a ponto	148	6.785.189
	Ponto a plano	148	6.988.447

Fonte: O autor.

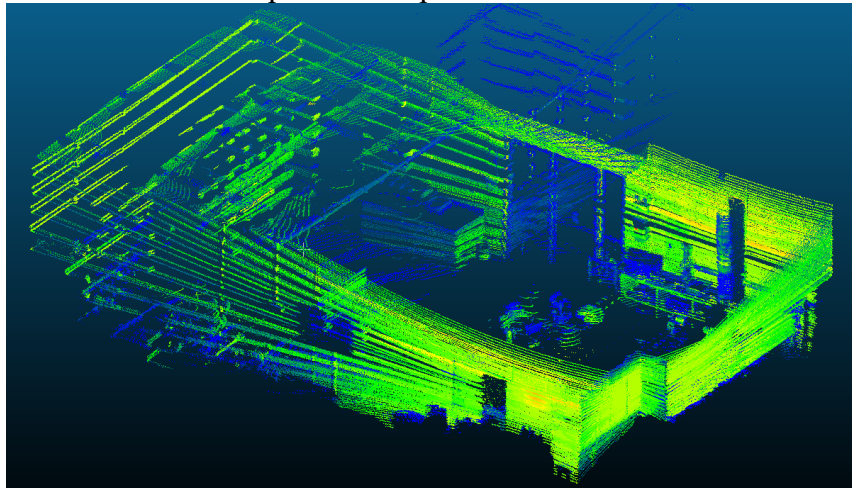
A partir da estimativa dos deslocamentos, foi possível calcular o erro para cada medição, que é a diferença entre o deslocamento absoluto entre as aquisições e o deslocamento de referência realizado com o interferômetro; além do mínimo erro, máximo erro e desvio padrão. O cálculo do erro E se dá pela equação (22), onde I é a indicação dada pelo sistema de medição e $\bar{I}$ é a média de todas as indicações. O cálculo do desvio padrão s , disposto na equação (23), é definido pela raiz da razão entre o somatório do quadrado da diferença entre a indicação I pela média das indicações $\bar{I}$, por $n - 1$.

$$E = I - VVC \quad (22)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum(I - \bar{I})^2}{n - 1}} \quad (23)$$

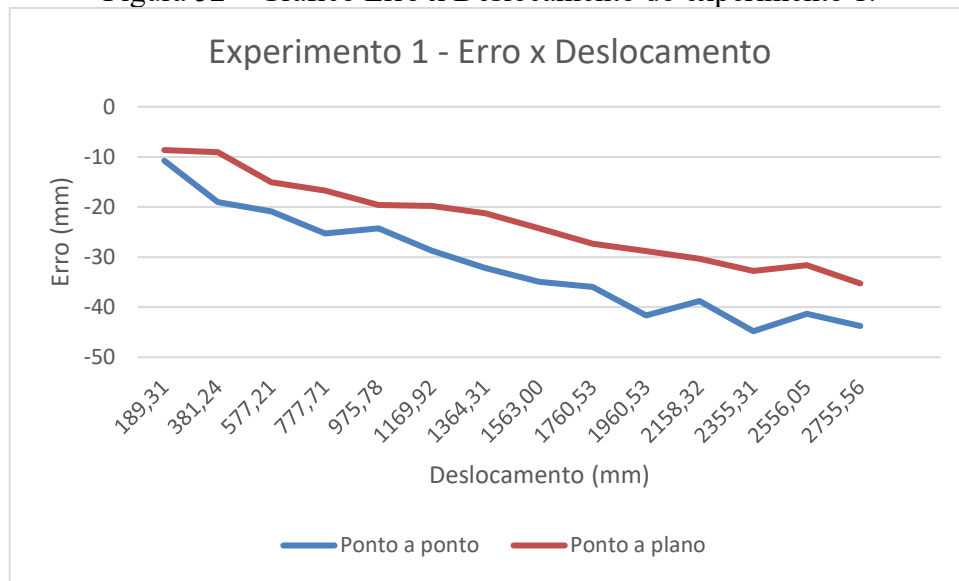
Para o experimento 1, onde o deslocamento para cada medição é de 200mm, é possível visualizar o resultado da concatenação das nuvens de pontos para a montagem A na Figura 51, e na Figura 52 estão dispostos os erros de posição para cada faixa de deslocamento no gráfico, tanto para o ICP ponto a ponto, como para o ponto a plano. Na Tabela 14 encontram-se os resultados do experimento.

Figura 51 – Representação gráfica da concatenação de nuvens de pontos usando o ICP ponto a ponto no experimento 01.



Fonte: O autor.

Figura 52 – Gráfico Erro x Deslocamento do experimento 1.



Fonte: O autor.

Tabela 14 – Resultados do erro de posição do experimento 1.

	Experimento 1	
	Ponto a ponto	Ponto a plano
Número de capturas	14	14
Erro médio (mm)	-31,60	-22,89
Desvio padrão (mm)	10,03	8,26
Posição final do experimento (mm)	2.799,34	2.799,34
Posição final estimada (mm)	2.755,56	2.764,07

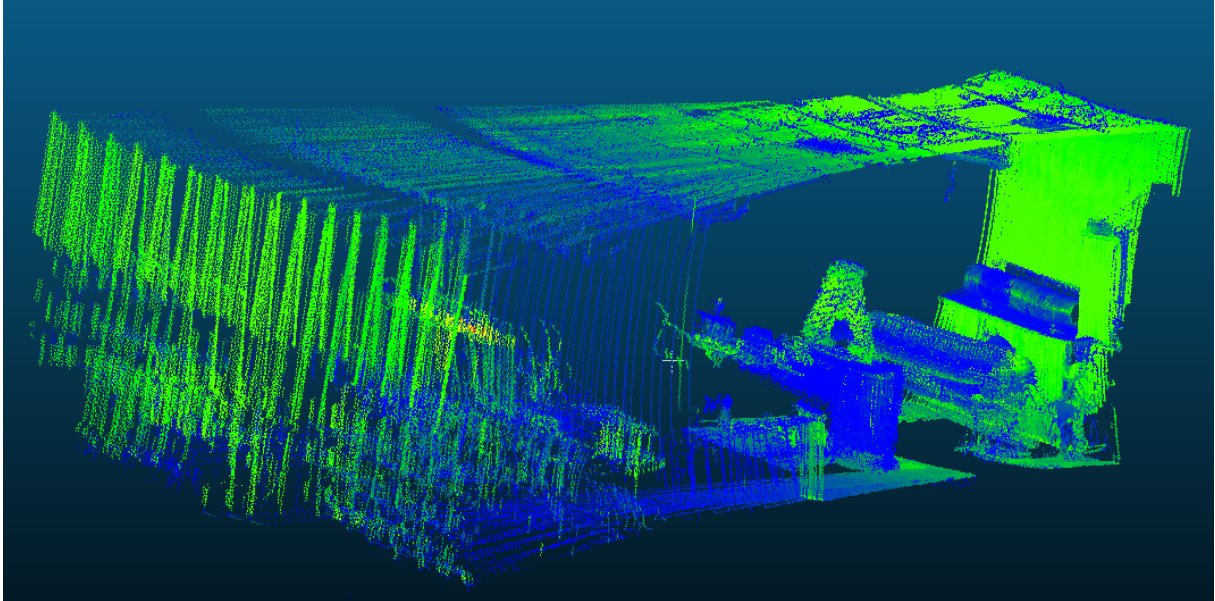
Fonte: O autor.

Nota-se que, à medida que as concatenações são feitas, o erro absoluto de trajetória aumenta. Isso se deve ao fato de que o erro de posição se torna acumulativo posição a posição, e cada vez mais os erros também aumentam. Portanto, o uso de algoritmos de ICP esbarra em um questionamento quanto à sua usabilidade, pois se a incerteza aumenta no decorrer da movimentação, longos voos acarretarão erros relevantes, o que poderia vir a inviabilizar o uso. É preciso notar também que cada deslocamento feito é de aproximadamente 200mm, e dependendo da distância entre cada medição, o funcionamento dos algoritmos de estimação de estado podem apresentar um comportamento diferente.

Considerando as informações dispostas na Figura 52, os resultados utilizando o algoritmo de ICP ponto a plano apresentou resultados significativamente melhores em todas as posições avaliadas no experimento, alcançando um erro médio 27,56% inferior e um desvio padrão 17,70% inferior quando comparado com o algoritmo de ICP ponto a ponto.

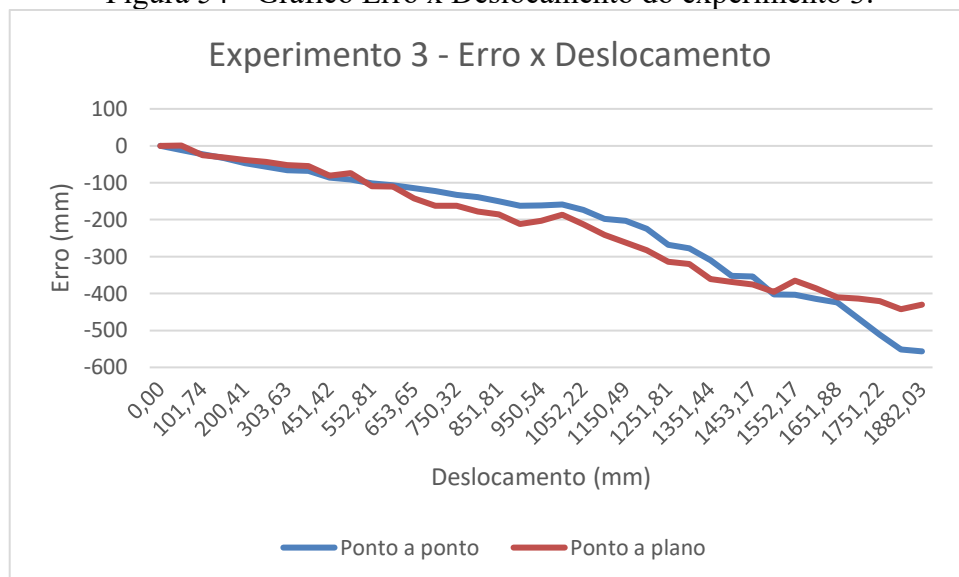
No experimento 3, onde o deslocamento por captura foi de 50mm, o cenário foi um pouco diferente. A ilustração gráfica da concatenação das nuvens de pontos na montagem B está disposta na Figura 53. A Figura 54 ilustra o gráfico de erro de posição por faixa de deslocamento do experimento 3, e os dados do experimento estão listados na Tabela 15.

Figura 53 - Representação gráfica da concatenação de nuvens de pontos usando o ICP ponto a ponto no experimento 3.



Fonte: O autor.

Figura 54 - Gráfico Erro x Deslocamento do experimento 3.



Fonte: O autor.

Tabela 15 - Resultados do erro de posição do experimento 3.

	Experimento 3	
	Ponto a ponto	Ponto a plano
Número de capturas	37	37
Erro médio (mm)	-214,16	-217,64
Desvio padrão (mm)	159,94	142,38
Posição final do experimento (mm)	1.882,03	1.882,03
Posição final estimada (mm)	1.247,09	1.373,24

Fonte: O autor.

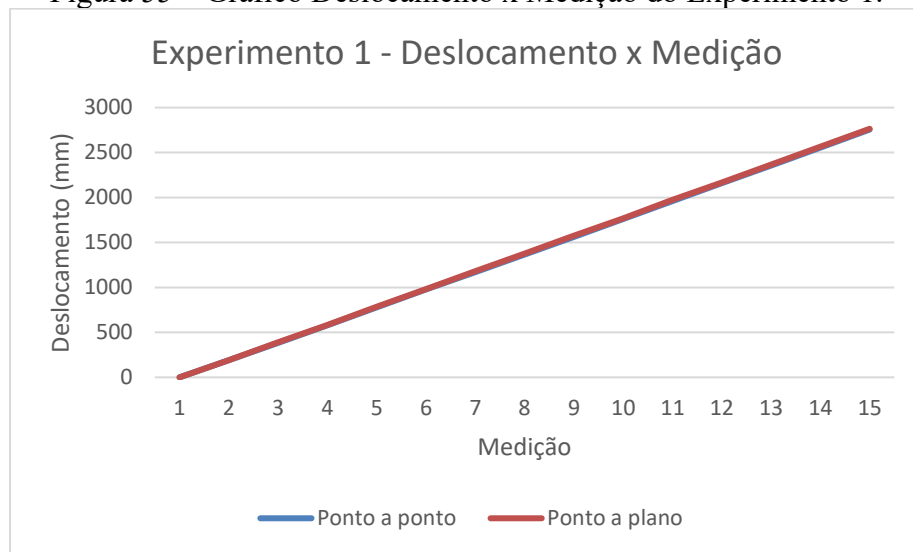
O erro médio encontrado nas estimações de estado realizadas com o algoritmo ponto a ponto é aproximadamente 1,63% menor e o desvio padrão é aproximadamente 10,98% maior que o encontrado do algoritmo ponto a plano.

O erro acumulado no decorrer das 37 medições é bastante elevado, e no caso, o deslocamento é menor que o ocorrido no experimento 1. Logo, nota-se que a quantidade de estimações pode ser um fator preponderante no aumento da incerteza de medição. Enquanto no experimento 1, o erro médio em relação ao deslocamento total do experimento é de aproximadamente 1,13% no algoritmo ponto a ponto e 0,82% no ponto a plano, a relação encontrada para o experimento 3 é de aproximadamente 11,38% e 11,56%, respectivamente.

É preciso considerar que as montagens dos dois experimentos são diferentes, e que as variações podem estar relacionadas ao modelo de captura. No entanto, é possível considerar também que o deslocamento de 50mm é muito pequeno considerando o volume de dados em uma única captura, sendo esse deslocamento, portanto, imperceptível ao algoritmo de ICP em algumas estimações de estado, o que justificaria o crescimento negativo do erro ao longo dos deslocamentos.

Buscando entender o comportamento da trajetória ao longo de cada medição, foi feita uma análise com relação ao deslocamento em cada medição realizada. É possível avaliar os resultados da análise nas Figuras Figura 55, Figura 56, Figura 57 e Figura 58 para os experimentos 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

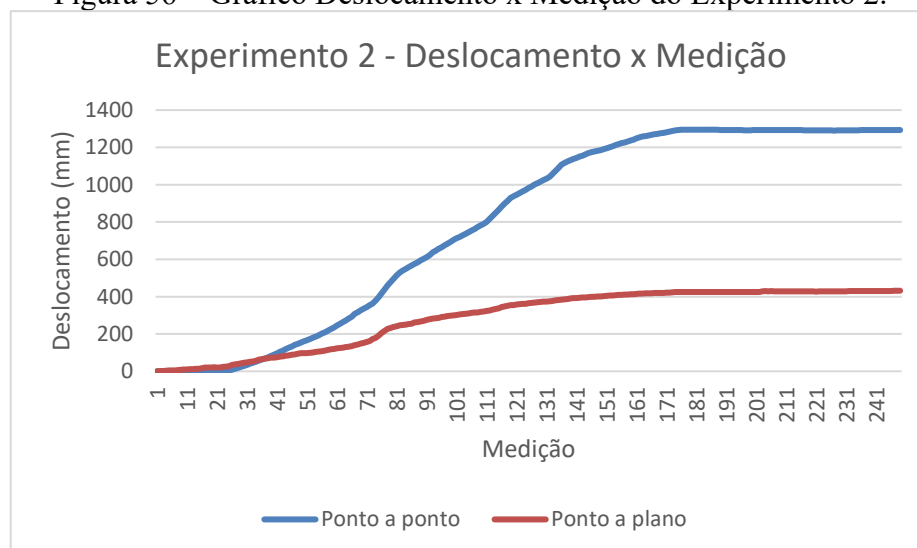
Figura 55 – Gráfico Deslocamento x Medição do Experimento 1.



Fonte: O autor.

Ao analisar a Figura 55, percebe-se que o gráfico, tanto no caso ponto a ponto quanto ponto a plano, são representados de forma muito próxima a uma reta. Para os casos dos experimentos 1 e 3, esse é o comportamento esperado, uma vez que os deslocamentos realizados são muito parecidos.

Figura 56 – Gráfico Deslocamento x Medição do Experimento 2.

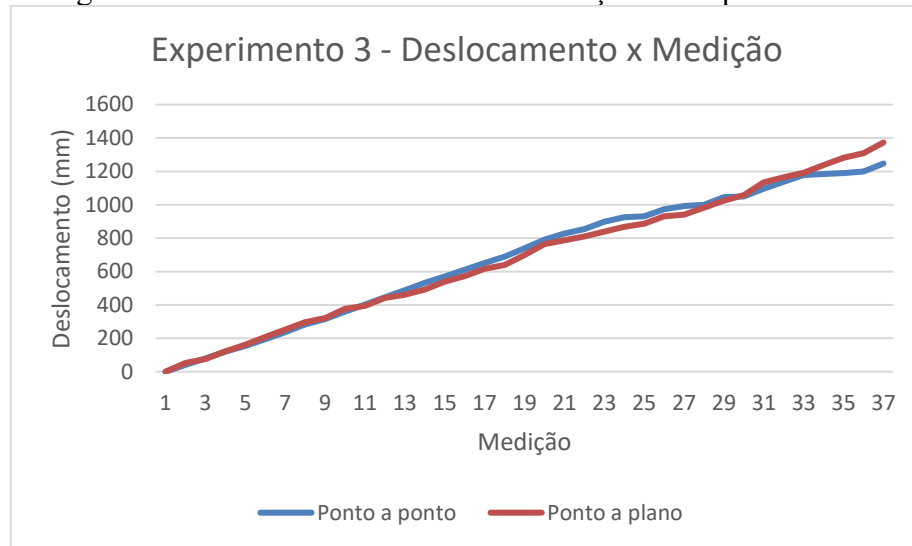


Fonte: O autor.

Na Figura 56, as representações para ponto a ponto e ponto a plano são bastante divergentes. O algoritmo ponto a ponto apresentou um deslocamento máximo de 1.294,47 mm, enquanto o ponto a plano apresentou deslocamento máximo de 431,4588 mm. Salienta-se que nas primeiras medições, o operador ainda não havia iniciado o movimento, e por isso a curva

apresenta poucas alterações nas primeiras medições. O mesmo acontece nas últimas medições, onde o operador parou o deslocamento até finalizar o experimento, e as medições estabilizaram com baixas variações de deslocamento.

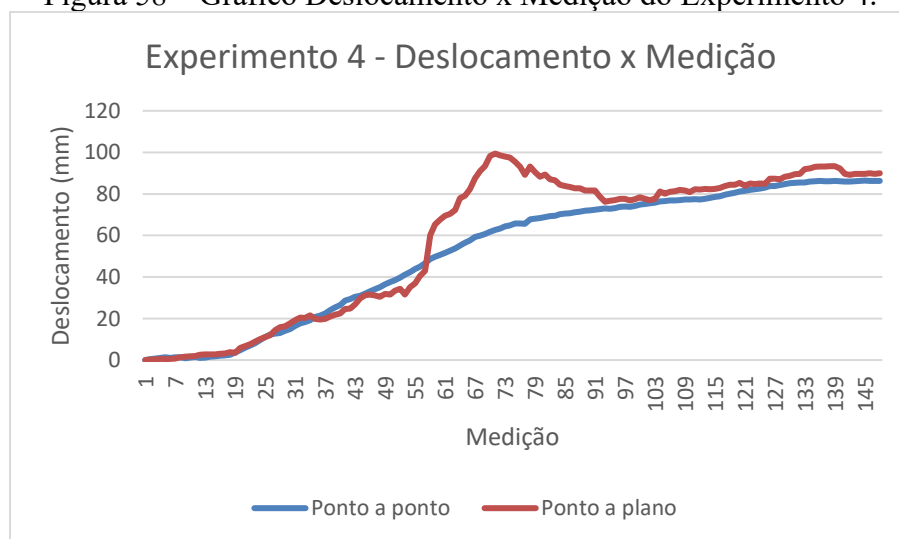
Figura 57 – Gráfico Deslocamento x Medição do Experimento 3.



Fonte: O autor.

Na Figura 57, o comportamento foi parecido com o encontrado na Figura 55. Os comportamentos, tanto do algoritmo ponto a ponto como do ponto a plano, são semelhantes a uma reta, ainda que sofram variações no decorrer da trajetória, sendo o algoritmo ponto a plano um pouco mais próximo do comportamento de uma reta.

Figura 58 – Gráfico Deslocamento x Medição do Experimento 4.

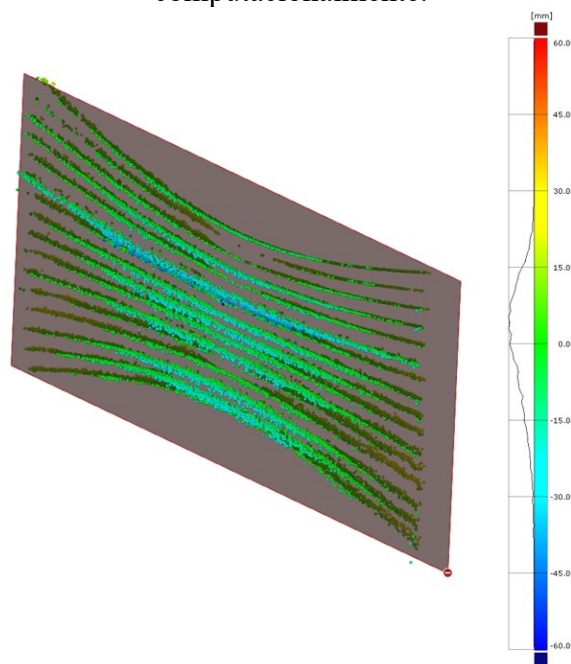


Fonte: O autor.

Na Figura 58, apesar de ambos os algoritmos finalizarem com deslocamentos semelhantes, os comportamentos ao longo da trajetória foram diferentes. O algoritmo ponto a ponto apresentou um comportamento mais condizente com o esperado por apresentar um deslocamento com aumento gradual durante o experimento. Já no algoritmo ponto a plano, no segundo terço do experimento, o deslocamento apresentou um comportamento com oscilações, quando na verdade deveria apresentar elevações graduais no eixo y, semelhante ao que aconteceu no algoritmo ponto a ponto. Em ambos os casos, o deslocamento apresentado foi muito inferior ao que foi realmente realizado, sendo o deslocamento registrado no interferômetro de 1.884,4156 mm e os deslocamentos registrados nos algoritmos ponto a ponto e ponto a plano 86,3197 mm e 89,9068 mm, respectivamente. As diferenças em relação à referência podem ser explicadas por mau comportamento dos algoritmos de ICP, pois acabam por não encontrando corretamente os pontos correspondentes para estimar a trajetória, resultando em trajetórias pouco condizentes com o movimento que foi de fato executado.

Após analisar o erro de posição do LiDAR, foi feita uma análise referente ao painel de madeira para os experimentos 1 e 2. A Figura 59 ilustra uma captura única segmentada somente com os pontos contidos sobre o painel em madeira, e comparada com um plano gerado computacionalmente; e os resultados da comparação estão listados na Tabela 16.

Figura 59 – Representação de uma única nuvem de pontos comparada com um plano gerado computacionalmente.



Fonte: O autor.

Tabela 16 – Resultado da comparação entre uma única nuvem de pontos da montagem A e primitivo geométrico plano gerado computacionalmente.

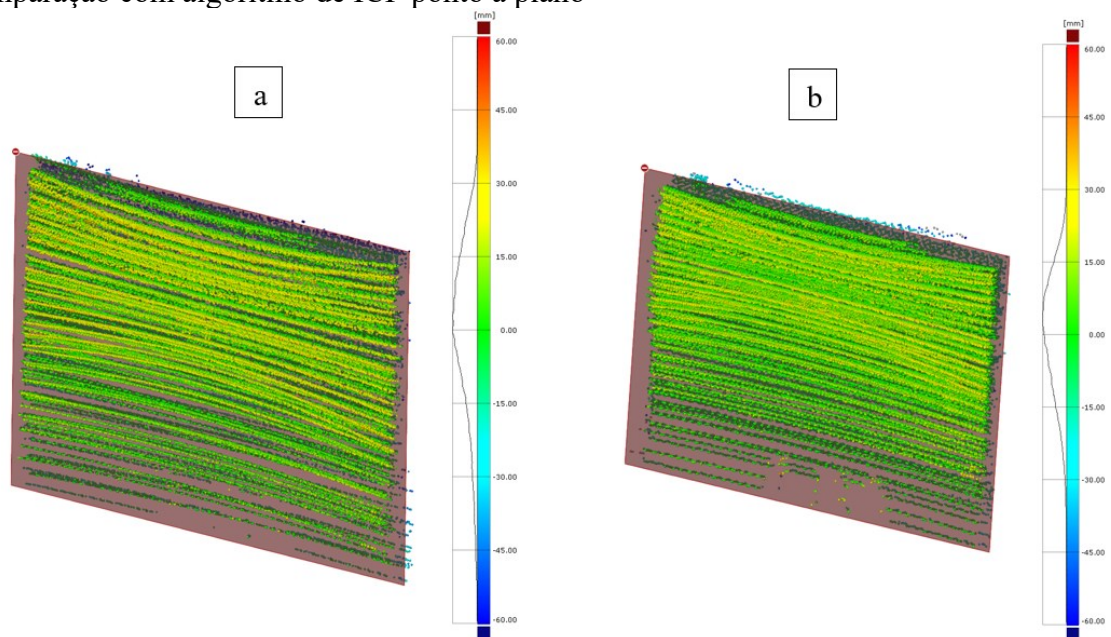
Número de pontos	15.199
Máximo erro (mm)	35,83
Mínimo erro (mm)	-59,25
Desvio padrão (mm)	11,75

Fonte: O autor

Ao analisar os erros máximo e mínimo, é possível verificar que ambos apresentaram valores acima da incerteza de medição definida no catálogo do *Velodyne Puck-LITE*, definidas em $\pm 30,0$ mm. Em todos os casos em que são utilizados planos gerados computacionalmente, o desvio padrão é calculado a partir do resíduo entre cada ponto e o plano ajustado. É importante ressaltar que regiões com baixa intensidade podem atribuir resultados incorretos à medição, e como não foram realizados filtros considerando faixas de intensidade específicas, não há como confirmar se tal motivo é a razão da existência de erros acima do especificado no catálogo da fabricante.

Analizando o painel em madeira no experimento 1, ilustrado na Figura 60, obteve-se os resultados listados na Tabela 17.

Figura 60 – Comparação entre nuvem de pontos do experimento 1 e primitivo geométrico plano gerado computacionalmente. a) Comparação com algoritmo de ICP ponto a ponto; b) Comparação com algoritmo de ICP ponto a plano



Fonte: O autor.

Tabela 17 – Resultado das comparações entre nuvem de pontos do experimento 1 e primitivo geométrico plano gerado computacionalmente.

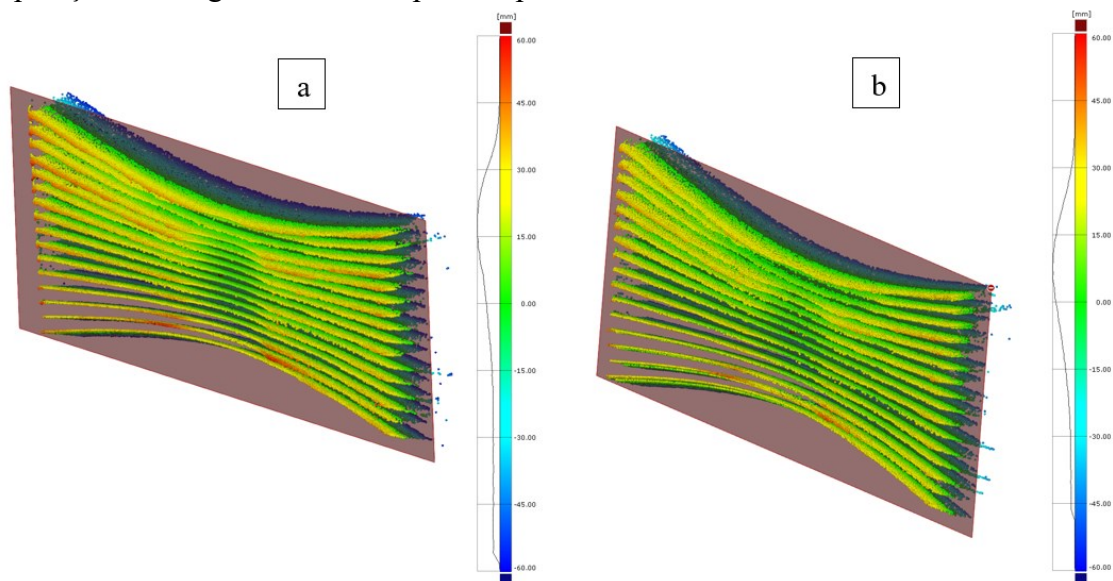
	Experimento 1	
	Ponto a ponto	Ponto a plano
Número de pontos	75.268	77.979
Máximo erro (mm)	45,44	42,20
Mínimo erro (mm)	-75,92	-59,65
Desvio padrão (mm)	16,68	12,19

Fonte: O autor.

Observa-se nos resultados um erro consideravelmente baixo, da ordem de dezenas de milímetros, e um desvio padrão de 16,68mm e 12,19mm para os algoritmos ponto a ponto e ponto a plano, respectivamente, sendo o desvio padrão do algoritmo ponto a ponto 26,92% superior em relação ao algoritmo ponto a plano. É possível verificar que os erros máximo e mínimo excedem os valores previstos no catálogo da fabricante, mas neste caso, os valores podem também estar associados ao erro de posição, uma vez que a concatenação de nuvens de pontos considera não somente o erro do sistema de medição, como também o erro da trajetória.

Analisando o experimento 2, ilustrado na Figura 61, obteve-se os resultados listados na Tabela 18.

Figura 61 – Comparação entre nuvem de pontos do experimento 2 e primitivo geométrico plano gerado computacionalmente. a) Comparação com algoritmo de ICP ponto a ponto; b) Comparação com algoritmo de ICP ponto a plano.



Fonte: O autor.

Tabela 18 – Resultado das comparações entre nuvem de pontos do experimento 2 e primitivo geométrico plano gerado computacionalmente.

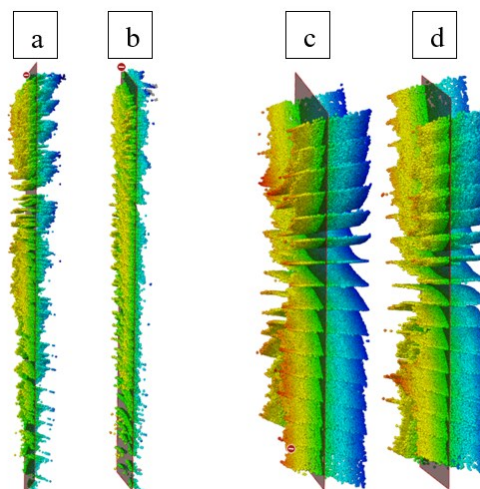
	Experimento 2	
	Ponto a ponto	Ponto a plano
Número de pontos	239.671	261.209
Máximo erro (mm)	59,22	52,40
Mínimo erro (mm)	-58,66	-49,61
Desvio padrão (mm)	25,01	18,00

Fonte: O autor.

O desvio padrão foi de 25,01mm e 18,00mm para os algoritmos ponto a ponto e ponto a plano, respectivamente, sendo o desvio padrão do ponto a ponto aproximadamente 28,03% superior ao ponto a plano. O número de pontos do experimento 2 é consideravelmente maior que o experimento 1, e isso se dá pelo fato de o experimento 2 levar em consideração 249 capturas, enquanto o experimento 1 considera somente 14 capturas. Os erros máximo e mínimo encontrados no experimento 2 excedem os valores previstos no catálogo da fabricante, mas assim como ocorrido no experimento 1, estes resultados podem estar relacionados à combinação dos erros de trajetória e do sistema de medição.

Ao observar o experimento 1 na Figura 60, nota-se uma formação de diversas linhas de captura do LiDAR formadas por pontos, distribuídas de maneira uniforme ao longo da superfície do plano, enquanto no experimento 2, ilustrado na Figura 61, a formação dos pontos sobre o plano se concentram em 16 linhas, tanto no caso ponto a ponto, como no ponto a plano, similar ao que acontece na Figura 59 com a captura de uma única nuvem de pontos. Esse comportamento fica ainda mais nítido ao observar a Figura 62.

Figura 62 – Comparativo entre resultados de análise de desvio entre experimentos 1 e 2 (vista lateral). a) Experimento 1, ICP ponto a ponto; b) Experimento 1, ICP ponto a plano; c) Experimento 2, ICP ponto a ponto; d) Experimento 2, ICP ponto a plano.



Fonte: O autor.

No experimento 2, o número de linhas formadas no resultado trazem o mesmo número de canais laser do LiDAR, e esse comportamento levanta um questionamento quanto ao funcionamento do ICP para esse caso. O que ocasiona este erro é que, ao avaliar nuvens de pontos consecutivas com alterações muito pequenas de uma para outra, como é o caso dos experimentos com nuvens de pontos consecutivas, o algoritmo utiliza equivocadamente as regiões dos feixes como se estas fossem regiões fixas de controle, fazendo com que o resultado das posições durante o deslocamento fiquem distorcidos, garantindo que os 16 feixes laser fiquem erroneamente sobrepostos na concatenação de todas as capturas.

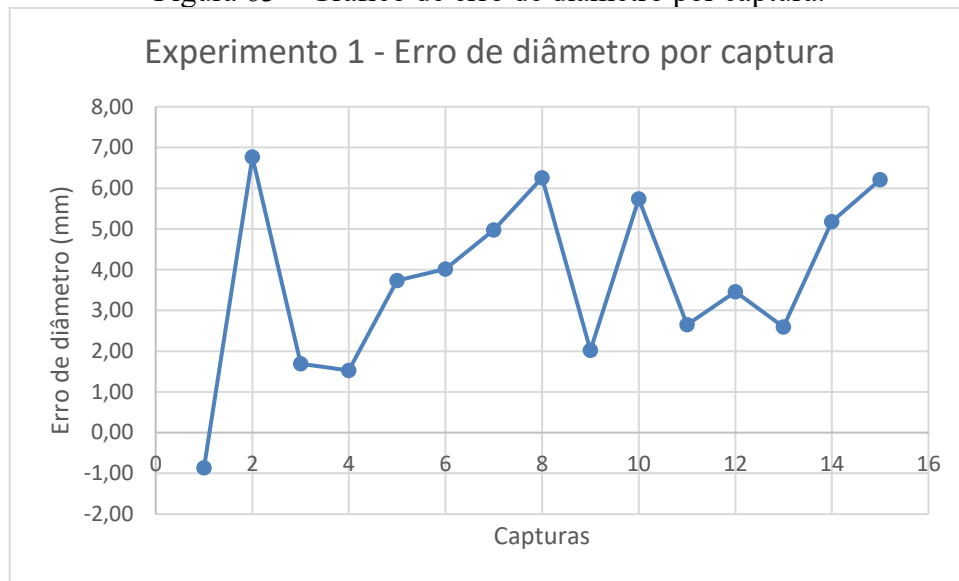
Após realizar as análises referente ao painel em madeira, fez-se a análise do simulacro *riser* em relação aos experimentos 1, 2, 3 e 4. Antes de iniciar a análise a priori de cada um dos experimentos, é preciso levar em consideração a avaliação do sistema de medição em relação a variação de distância. O diâmetro estimado do cilindro é de 301,56 mm e os dados do erro de diâmetro em relação as distâncias podem ser observados na Tabela 19 e na Figura 63.

Tabela 19 – Avaliação do erro de diâmetro em relação à variação de distância entre sistema de medição e objeto medido.

n	Distância	Diâmetro	Erro de diâmetro	Número de pontos	σ
1	5.040	300,70	-0,86	945	7,06
2	4.835,67	308,32	6,76	979	6,93
3	4.635,61	303,25	1,69	1196	6,60
4	4.435,40	303,09	1,53	1195	6,83
5	4.237,55	305,30	3,74	1294	6,70
6	4.032,69	305,58	4,02	1368	6,94
7	3.835,64	306,53	4,97	1652	6,89
8	3.637,00	307,82	6,26	1708	6,85
9	3.439,19	303,58	2,02	2029	6,81
10	3.237,70	307,30	5,74	2325	6,69
11	3.039,20	304,21	2,65	2515	6,64
12	2.833,52	305,02	3,46	2726	6,31
13	2.638,55	304,15	2,59	2857	6,37
14	2.435,56	306,74	5,18	3174	6,35
15	2.238,27	307,77	6,21	3274	6,43

Fonte: O autor.

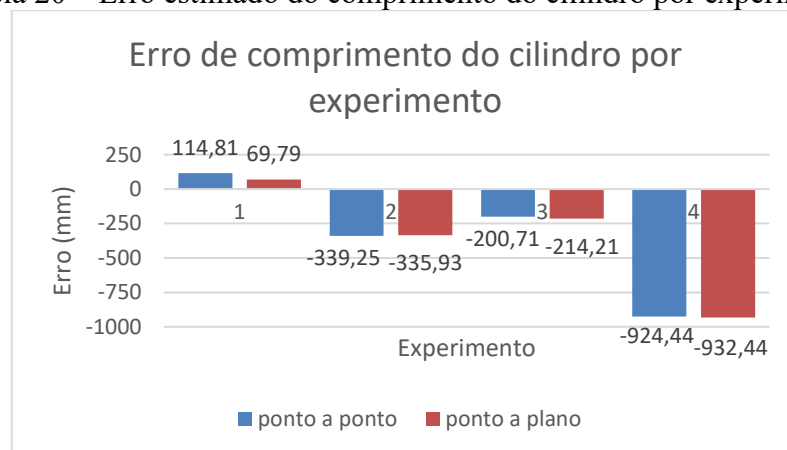
Figura 63 – Gráfico de erro de diâmetro por captura.



Fonte: O autor.

A segunda observação a ser feita antes de iniciar as análises está relacionada à estimativa do comprimento dos cilindros. O fato de os comprimentos variarem significativamente nos resultados faz com que, ao observar os resultados, aparente um erro de escala entre uma análise e outra, quando na verdade é somente a variação da estimativa do comprimento do cilindro que gera essa falsa impressão. O comprimento do cilindro é de 1.700 mm e os erros estimados de comprimento para cada um dos experimentos estão dispostos na Tabela 20.

Tabela 20 – Erro estimado do comprimento do cilindro por experimento.



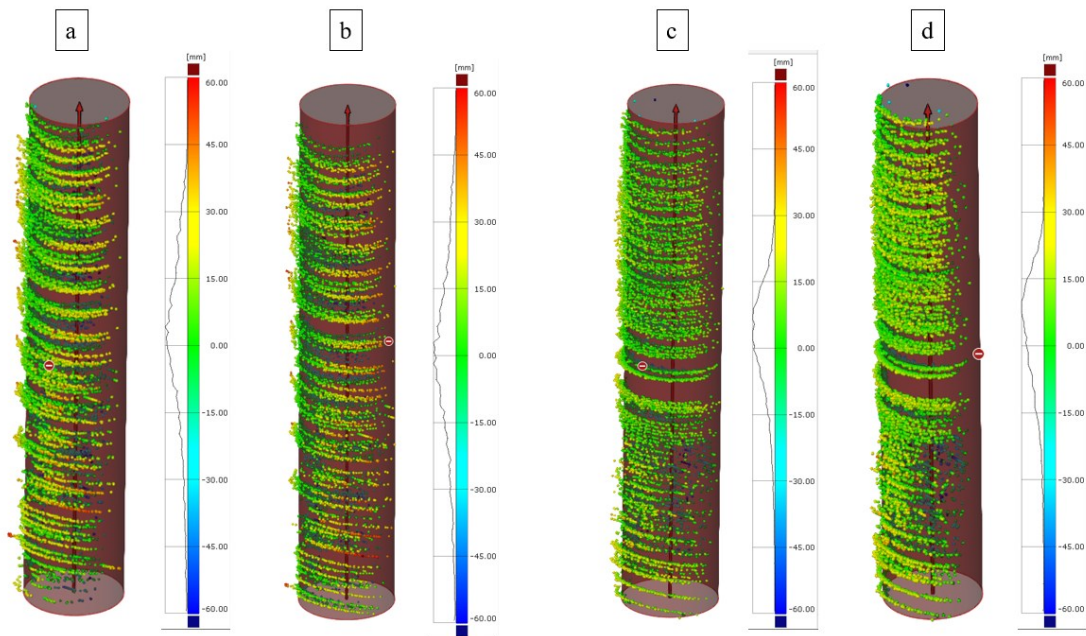
Fonte: O autor.

O erro nesse caso é dado como estimado porque não há como garantir o comprimento do cilindro com este experimento, uma vez que as capturas do LiDAR ocorrem em feixes, e

entre uma movimentação e outra pode ocorrer de uma das beiradas do cilindro não serem capturadas e computadas no cálculo, resultando em uma medição equivocada.

O mapa de desvio do simulacro *riser* no experimento 1 pode ser visualizado na Figura 64 e os resultados estão listados na Tabela 21.

Figura 64 – Comparação entre nuvem de pontos do experimento 1 e primitivo geométrico cilíndrico gerado computacionalmente. a) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formado a partir de um *bestfit* de todos os pontos com algoritmo de ICP ponto a ponto; b) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formado a partir do CAD do simulacro *riser* com algoritmo de ICP ponto a ponto; c) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formado a partir de um *bestfit* de todos os pontos com algoritmo de ICP ponto a plano; d) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formado a partir do CAD do simulacro *riser* com algoritmo de ICP ponto a plano.



Fonte: O autor.

Tabela 21 – Resultado das comparações entre nuvem de pontos do experimento 1 e primitivo geométrico cilíndrico gerado computacionalmente.

	Experimento 1			
	<i>Bestfit</i>		Simulacro <i>riser</i>	
	Ponto a ponto	Ponto a plano	Ponto a ponto	Ponto a plano
Número de pontos	8.710	8.816	8.710	8.816
Diâmetro estimado (mm)	329,09	277,38	301,56	301,56
Máximo erro (mm)	58,52	44,06	60,43	45,67
Mínimo erro (mm)	-82,46	-84,09	-69,94	-93,25
Desvio padrão (mm)	21,22	15,19	21,22	15,19

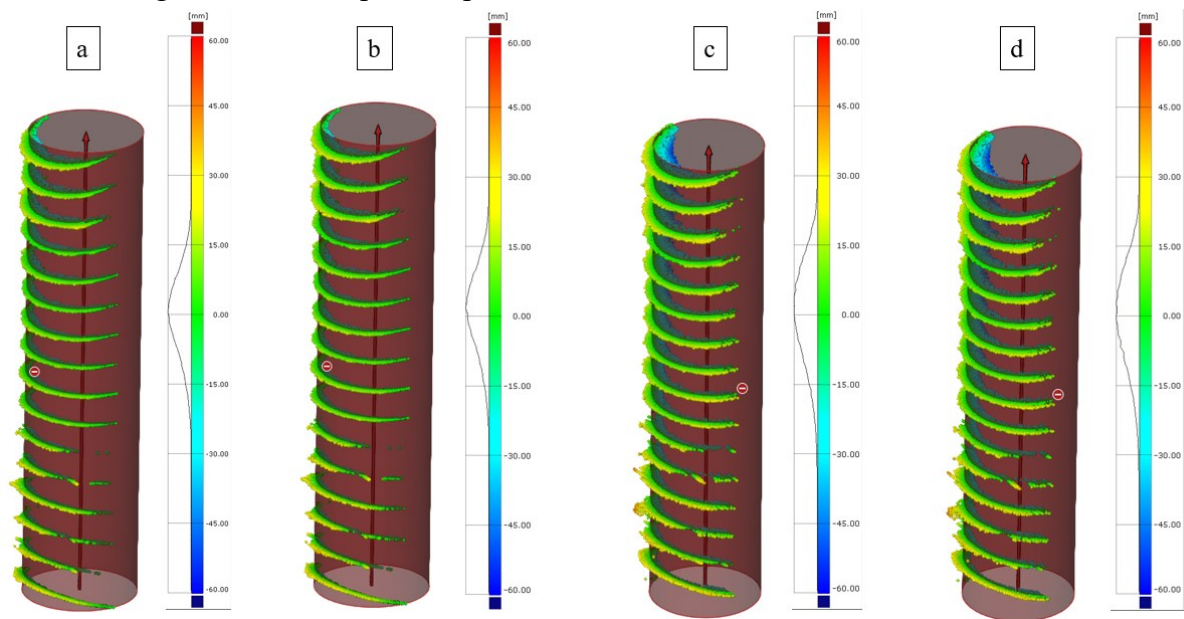
Fonte: O autor.

Assim como nas análises anteriores feitas com o plano gerado computacionalmente, o desvio padrão, para todos os casos de cilindros gerados computacionalmente, será definido como o resíduo entre cada ponto e o cilindro computacional ajustado. Analisando os resultados do experimento 1, nota-se que o diâmetro estimado pelo algoritmo ao realizar o *bestfit* é de 329,09 mm no caso ponto a ponto e 277,38 mm no ponto a plano, com uma diferença em relação ao diâmetro estimado do CAD do simulacro *riser* de aproximadamente 9,13% e -8,02% respectivamente.

Os algoritmos apresentaram erros máximo e mínimo fora do previsto no catálogo da fabricante, o que já era esperado uma vez que pontos espúrios e fora de série podem estar presente na medição. No entanto o desvio padrão representa um valor que está dentro da normalidade. Considerando os dois algoritmos explorados, tanto para o *bestfit* dos pontos quanto para um *bestfit* do CAD do simulacro *riser*, o modelo ponto a plano apresentou uma performance melhor, sendo aproximadamente 29,27% inferior quando comparado com o ponto a plano para o *bestfit* dos pontos e para o *bestfit* do CAD do simulacro *riser*, respectivamente.

O mapa de desvio do simulacro *riser* no experimento 2 pode ser visualizado na Figura 65 e os resultados estão listados na Tabela 22.

Figura 65 – Comparação entre nuvem de pontos do experimento 2 e primitivo geométrico cilíndrico gerado computacionalmente. a) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir de um *bestfit* de todos os pontos com algoritmo de ICP ponto a ponto; b) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir do CAD do simulacro *riser* com algoritmo de ICP ponto a ponto; c) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir de um *bestfit* de todos os pontos com algoritmo de ICP ponto a plano; d) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir do CAD do simulacro *riser* com algoritmo de ICP ponto a plano.



Fonte: O autor.

Tabela 22 – Resultado das comparações entre nuvem de pontos do experimento 2 e primitivo geométrico cilíndrico gerado computacionalmente.

	Experimento 2			
	<i>Bestfit</i>		Simulacro <i>riser</i>	
	Ponto a ponto	Ponto a plano	Ponto a ponto	Ponto a plano
Número de pontos	42.186	51.652	42.186	51.652
Diâmetro estimado (mm)	303,73	300,16	301,56	301,56
Máximo erro (mm)	36,46	43,79	37,54	43,09
Mínimo erro (mm)	-31,95	-53,86	-30,87	-54,57
Desvio padrão (mm)	8,85	11,17	8,85	11,17

Fonte: O autor.

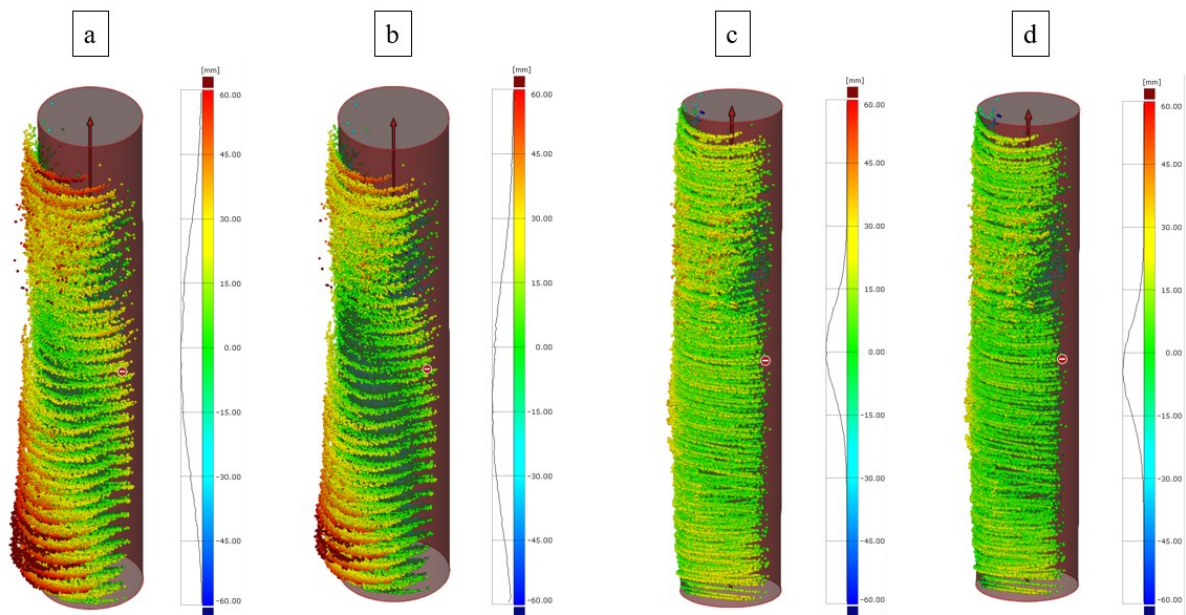
Os diâmetros estimados no *bestfit* realizado com os pontos da concatenação foi de 303,73 mm e 300,16 mm, apresentando variações em relação ao cilindro projeto sobre o CAD do simulacro *riser* de 0,72% e -0,46%, respectivamente. Os desvios padrão encontrados nos modelos com *bestfit* dos pontos concatenados foram idênticos aos encontrados no cilindro

gerado sobre o simulacro *riser*, sendo o ponto a ponto mais eficiente que o ponto a plano, aproximadamente 26,21% inferior.

No entanto, ao analisar visualmente os resultados dispostos na Figura 65 percebe-se o mesmo padrão que ocorreu nos resultados do painel em madeira do experimento 2 (Figura 61): 16 faixas, formadas por pontos, definindo o mensurando. Logo, é possível afirmar que há sobreposição de pontos de regiões diferentes nessas 16 linhas formadas, resultando em uma vasta região que não foi propriamente definida. Portanto, apesar de os resultados de diâmetro demonstrados na Tabela 22 serem idênticos ao do simulacro *riser*, não há como garantir a eficácia deste método, uma vez que a concatenação de nuvens de pontos não ocorreu da forma como deveria.

O mapa de desvio do simulacro *riser* no experimento 3 pode ser visualizado na Figura 66 e os resultados estão listados na Tabela 23.

Figura 66 – Comparação entre nuvem de pontos do experimento 3 e primitivo geométrico cilíndrico gerado computacionalmente. a) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir de um *bestfit* de todos os pontos com algoritmo de ICP ponto a ponto; b) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir do CAD do simulacro *riser* com algoritmo de ICP ponto a ponto; c) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir de um *bestfit* de todos os pontos com algoritmo de ICP ponto a plano; d) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir do CAD do simulacro *riser* com algoritmo de ICP ponto a plano.



Fonte: O autor.

Tabela 23 – Resultado das comparações entre nuvem de pontos do experimento 3 e primitivo geométrico cilíndrico gerado computacionalmente.

	Experimento 3			
	Bestfit		Simulacro <i>riser</i>	
	Ponto a ponto	Ponto a plano	Ponto a ponto	Ponto a plano
Número de pontos	58.287	58.284	58.287	58.284
Diâmetro estimado (mm)	280,14	292,70	301,56	301,56
Máximo erro (mm)	97,76	60,55	87,05	56,12
Mínimo erro (mm)	-77,06	-72,33	-87,77	-76,76
Desvio padrão (mm)	24,00	11,56	24,00	11,56

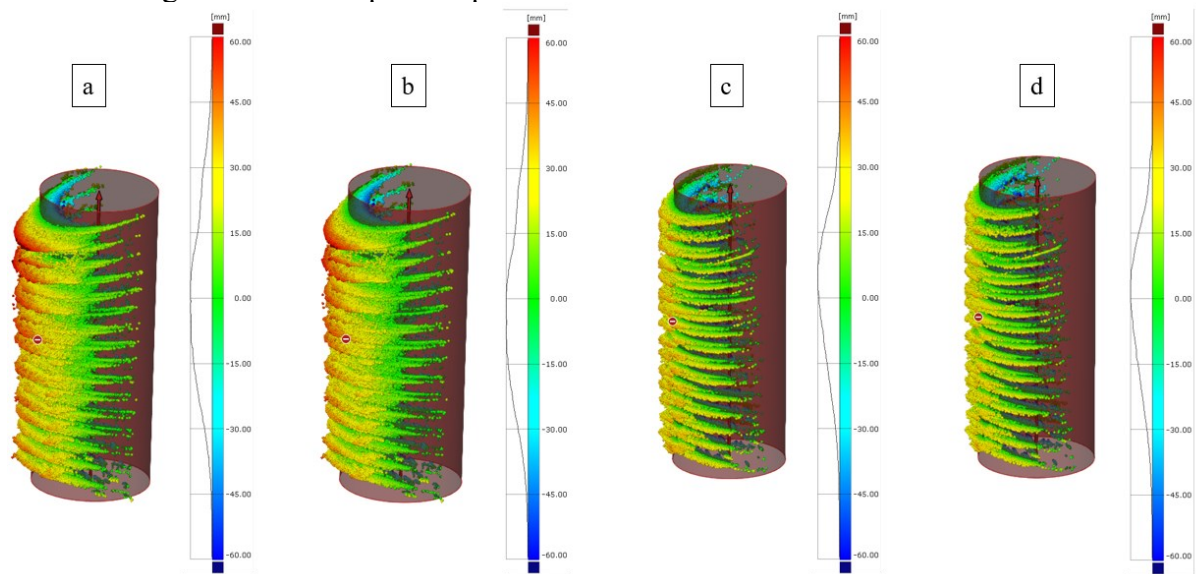
Fonte: O autor.

Os diâmetros encontrados no experimento 3 são 280,14 mm para o modelo ponto a ponto e 292,70 mm para o modelo ponto a plano, representando uma diferença de -7,10% e -2,94%, respectivamente.

O desvio padrão dos modelos ponto a ponto e ponto a plano ao gerar um bestfit dos pontos concatenados é idêntico ao encontrado no simulacro *riser*, sendo o modelo ponto a plano 51,83% inferior que o ponto a ponto.

O experimento 4 traz algumas familiaridades com os resultados encontrados no experimento 2, e é possível observar o comportamento na Figura 67 e comparar com a Figura 65. Os resultados estão listados na Tabela 24.

Figura 67 – Comparação entre nuvem de pontos do experimento 4 e primitivo geométrico cilíndrico gerado computacionalmente. a) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir de um *bestfit* de todos os pontos com algoritmo de ICP ponto a ponto; b) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir do CAD do simulacro *riser* com algoritmo de ICP ponto a ponto; c) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir de um *bestfit* de todos os pontos com algoritmo de ICP ponto a plano; d) Comparação das nuvens de pontos com um cilindro formato a partir do CAD do simulacro *riser* com algoritmo de ICP ponto a plano.



Fonte: O autor.

Tabela 24 – Resultado das comparações entre nuvem de pontos do experimento 4 e primitivo geométrico cilíndrico gerado computacionalmente.

	Experimento 4			
	Bestfit		Simulacro <i>riser</i>	
	Ponto a ponto	Ponto a plano	Ponto a ponto	Ponto a plano
Número de pontos	58.287	58.284	58.287	58.284
Diâmetro estimado (mm)	296,05	295,84	301,56	301,56
Máximo erro (mm)	67,33	44,58	64,58	41,72
Mínimo erro (mm)	-68,25	-77,37	-71,01	-80,23
Desvio padrão (mm)	19,49	16,30	19,49	16,30

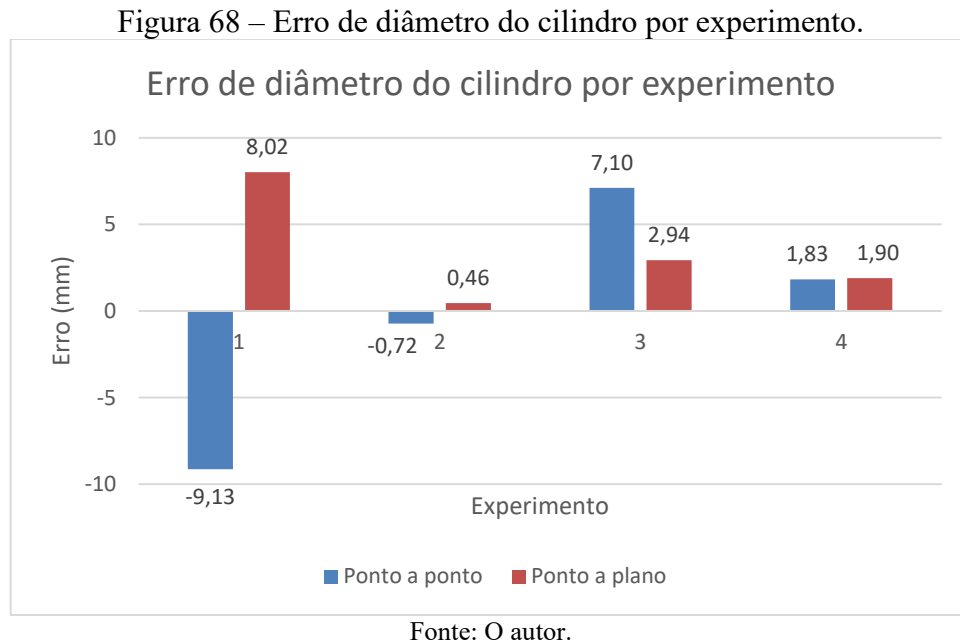
Fonte: O autor.

Os diâmetros encontrados no experimento são de 296,05 mm para o modelo ponto a ponto e 295,84 mm para o ponto a plano, com uma diferença de -1,83% e -1,90% em relação ao cilindro gerado sobre o CAD do simulacro *riser*, respectivamente.

Nota-se a formação de 16 feixes de pontos sobre o cilindro. Esse comportamento, como já citado anteriormente, deduz que parte fundamental da análise do cilindro está ocorrendo em forma de sobreposição em virtude de um mau comportamento do algoritmo de ICP. Ainda que os resultados possam parecer satisfatórios ao observar os desvios padrão da Tabela

24, há o risco de mais de uma região do cilindro estar sendo representada nos mesmos 16 feixes de pontos, o que claramente não é o comportamento desejado.

Os erros de diâmetro encontrados entre o bestfit da concatenação das nuvens de pontos de cada experimento em relação ao cilindro computacional gerado em relação ao CAD do simulacro *riser* estão listados na Figura 68.



Apesar de os experimentos 2 e 4 apresentarem erros de diâmetro inferiores em relação aos outros dois experimentos, eles também demonstraram problemas na ilustração dos resultados. Todos os pontos capturados nesses 2 experimentos foram concatenados de forma equivocada, fazendo com que todos os pontos ficassem sobre 16 linhas, ignorando a posição correta de cada feixe laser que passava sobre o plano.

5.2 DISCUSSÃO

As análises realizadas visaram explorar a usabilidade de radares a laser rotativos em situações de curta distância para inspeções industriais, assim como avaliar o uso do LiDAR somente com algoritmos de estimação de estado e sem o uso de sistemas de navegação.

Os experimentos foram feitos dentro de um laboratório da Fundação Certi, com supervisão de metrologistas que ali trabalham. Cada uma das montagens foi realizada considerando alguns aspectos a serem analisados.

A montagem A, utilizada nos experimentos 1 e 2, foi feita pensando no comportamento do LiDAR ao se afastar do mensurando, buscando compreender se era possível garantir propriedades geométricas dos mensurandos em situações de curta distância. Nessa montagem, houve um erro operacional na primeira medição, fazendo com que ela não fosse utilizada. O experimento continuou normalmente sem outras interrupções.

A montagem B, utilizada nos experimentos 3 e 4, visaram avaliar uma situação de uso específica da Petrobras, onde buscava-se simular o movimento de um sistema drone-LiDAR próximo a um *riser* petrolífero, avaliando se seria possível utilizar este sistema como uma fonte de informação quantitativa nas inspeções industriais em plataformas *offshore*. Nesse experimento, houve um problema operacional na medição número 9, onde houve uma sobreposição de medições. Para resolver esse problema, a medição foi excluída, e foi dado continuidade com as outras medições.

Ao analisar os erros de trajetória dos experimentos 1 e 3, nota-se uma diferença grande nos resultados, e essa diferença pode se dar por três motivos: montagens diferentes, resultando em comportamentos diferentes e exigindo algoritmos específicos para cada caso; o deslocamento a cada captura, onde no experimento 1 foi de 200mm e no experimento 3 foi de 50mm; e a quantidade de capturas, pois uma vez que cada estimativa de estado gera um aumento da incerteza, ao final de 37 medições, como é o caso do experimento 3, a incerteza será muito maior que ao final de 14 medições, como é o caso do experimento 1. E ao considerarmos o erro de ambos especificamente na medição 14, tem-se um erro no experimento 3 maior que o dobro do experimento 1, tanto no caso ponto a ponto, como no caso ponto a plano. Idealmente, deve-se testar novas configurações de ICP e de experimentos para cada montagem, a fim de garantir a melhor condição para cada um.

Os erros de trajetória dos experimentos 2 e 4 não puderam ser avaliados pois não havia equipamento que realizasse deslocamentos automatizados junto ao interferômetro e à guia, e em virtude disso não havia como fazer movimentos contínuos de forma precisa, garantindo somente as avaliações de erro de posição dos experimentos 1 e 3.

As trajetórias dos experimentos 1, 2, 3 e 4 foram analisadas, e somente os experimentos 1 e 3 trouxeram características de padrão de comportamento, onde ambas tendiam a formar uma reta, uma vez que os deslocamentos eram realizados com distâncias constantes. As outras duas apresentaram não somente inconsistências na trajetória, como também apresentaram uma estimativa de trajetória totalmente equivocada quando comparada com a trajetória real.

Em virtude da falta de um suporte específico para tal propósito, o painel foi montado de forma improvisada, sendo posicionado manualmente de modo a deixar o mensurando o mais próximo possível da ortogonalidade com o eixo do interferômetro utilizando grampos de fixação rápida. Esses procedimentos foram todos feitos com o auxílio de metrologistas da Fundação Certi.

Durante o desenvolvimento dos experimentos, previa-se o uso de um INS acoplado ao LiDAR, juntamente com uma base RTK, garantindo trajetórias com menores incertezas e aumentando a confiabilidade do sistema para inspeções de *risers* petrolíferos. No entanto, algumas barreiras acabaram prejudicando o uso do sistema de forma adequada. A primeira delas foi a questão do funcionamento do RTK. O fato de o interferômetro estar em um ambiente fechado prejudicava o sinal de GNSS, tanto para o RTK quanto para o INS acoplado ao LiDAR, e uma vez que o interferômetro e a guia metrológica são fixos dentro do laboratório, ficou impossibilitado o uso do RTK. Outro empecilho foi o próprio funcionamento do INS. Foram feitas diversas tentativas de uso do INS de modo a utilizar a estimação de estado feita pelas duas IMUs que o compunham e sem o uso do GNSS, e diversas combinações de configurações foram testadas na tentativa de fazer o INS funcionar de forma coerente. Os resultados adquiridos com o INS eram pouco precisos, com diversas falhas de configuração, erros de posição da ordem de dezenas de centímetros em poucos segundos, além de um suporte técnico da fabricante pouco eficiente – isso quando havia respostas. Foram feitos projetos mecânicos e eletrônicos para a aplicação, além de um vasto estudo sobre fusão de sensores, que acabaram não sendo diretamente utilizados nos experimentos.

Diante das dificuldades, optou-se por uma abordagem com uso de algoritmos de estimação de estado, focando em algoritmos clássicos já consagrados e testando a funcionalidade do LiDAR a curtas distâncias, que por si só já é um grande desafio.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho visou explorar a usabilidade de um LiDAR em curtas distâncias, de modo a avaliar sua aplicação para inspeções de *risers* petrolíferos *offshore* e para inspeções industriais de curta distância em geral.

As montagens realizadas visaram entender o comportamento de um LiDAR rotativo em duas diferentes configurações, avaliando assim aspectos relacionados à concatenação de nuvens de pontos ao se aproximar/afastar de mensurandos, e ao realizar movimentos longitudinais em frente a um mensurando com uma distância pré-estabelecida.

Foi possível avaliar a trajetória dos experimentos, além de comparar objetos com primitivos gerados computacionalmente e avaliar sua aplicabilidade em inspeções industriais.

Os principais resultados serão apresentados a seguir, além das contribuições para a literatura, as principais limitações encontradas e sugestões para trabalhos futuros.

6.1 PRINCIPAIS RESULTADOS E CONTRIBUIÇÕES

O uso de um LiDAR para reconstrução tridimensional de curtas distâncias a partir da concatenação de nuvens de pontos utilizando algoritmos de ICP possui uma vasta possibilidade de uso. Este trabalho visou avaliar resultados relacionados não somente a varreduras comumente utilizadas com LiDARs, mas também o comportamento do sensor em situações de aproximação e afastamento do mensurando, características de diferentes tipos de algoritmos de ICP para estimação de trajetória e as diferenças entre varreduras contínuas e varreduras com deslocamentos específicos.

Na análise do erro das trajetórias, foi possível encontrar uma relação entre o deslocamento por captura e o erro de posição. No experimento 1, a razão entre o erro médio da trajetória pelo comprimento total do experimento foi de aproximadamente -1,13% no algoritmo ponto a ponto e -0,82% no ponto a plano, enquanto a mesma relação para o experimento 3 é de aproximadamente -11,38% e -11,56% para os algoritmos ponto a ponto e ponto a plano, respectivamente. Diante disto, conclui-se que para o experimento 1, os erros médios e os desvios padrões foram satisfatórios, ao passo que o experimento 3 apresentou erros médios que representam mais de 10% da trajetória total e desvios padrões igualmente elevados, sendo inadequado para procedimentos de curtas distâncias.

Na análise das trajetórias, foi possível verificar que os experimentos 1 e 3 apresentavam formações semelhantes a uma reta, o que condiz com o deslocamento realizado. No experimento 2, apesar de o comportamento da curva ser condizente com a movimentação reali-

zada, os resultados do deslocamento apresentaram erros elevados. No experimento 4, o comportamento do modelo ponto a ponto foi parecido com o que ocorreu no experimento 2, sendo a curva semelhante ao movimento executado, mas com o deslocamento total equivocado; e no modelo ponto a plano, o resultado apresentou pouca ou nenhuma relação com o movimento realizado.

É possível avaliar também que o número de medições aumenta consideravelmente o erro médio e o desvio padrão. Antes de realizar ensaios e experimentos, é importante avaliar o número de capturas a serem realizadas, de modo a garantir o menor número possível de capturas.

Na análise dos experimentos 1 e 2 em relação ao painel em madeira, foi possível encontrar um erro médio da ordem de dezenas de milímetro, com desvios padrões menores no experimento 1. Notou-se também um comportamento peculiar no experimento 2, em que todos os pontos representados sobre o plano de referência encontram-se concentrados em 16 feixes, o mesmo número de canais do LiDAR, sendo este um comportamento indesejado, uma vez que o algoritmo de ICP utiliza os pontos dos 16 feixes formados como pontos de controle para realizar o alinhamento entre nuvens de pontos, resultando em pontos concentrados em pequenas regiões ao invés de pontos distribuídos uniformemente sobre toda a estrutura do plano. Logo, os resultados atingidos no experimento 1 são considerados satisfatórios, e o experimento 2, apesar de apresentar erro médio pequeno, não apresenta confiabilidade por não explorar corretamente toda a superfície do mensurando em virtude de um mau funcionamento do algoritmo de ICP.

Nas análises referentes ao simulacro *riser*, percebe-se que os experimentos 1 e 3 apresentam uniformidade na distribuição dos pontos sobre a superfície, enquanto os experimentos 2 e 4 apresentam o mesmo comportamento que ocorreu na análise do painel em madeira no experimento 2, onde 16 feixes de pontos se formaram na superfície do cilindro. Esse comportamento apresenta forte relação com a forma como os experimentos foram conduzidos, uma vez que os experimentos 2 e 4 foram realizados com capturas contínuas em um movimento livre executado por um laboratorista. Em relação ao comprimento estimado dos cilindros, percebe-se um erro maior nos experimentos 2 e 4, e um erro mais brando nos experimentos 1 e 3. O fato de serem muitas capturas consecutivas podem ter levado o algoritmo a um mau comportamento, resultando em aferições equivocadas.

De modo geral, o algoritmo ponto a plano apresentou resultados melhores na maioria dos casos. De acordo com as bibliografias, este já era um comportamento esperado, e os experimentos atestaram este fato.

Ainda que os experimentos 2 e 4 tenham sido pouco eficientes e apresentado erros consideravelmente elevados, os experimentos 1 e 3 comprovam que é possível utilizar LiDARs como sistemas de inspeção de curta distância, uma vez que os erros encontrados ficam dentro do previsto pela fabricante, mantendo-se na ordem de dezenas de milímetros. Porém, vale ressaltar que se a necessidade estiver relacionada a caracterização de pequenos defeitos, da ordem de décimos de milímetros, o uso de LiDAR não é recomendado, pois as propriedades do sensor não são específicas para esse tipo de aplicação, devendo então cogitar outra forma de medição que atenda aos requisitos.

6.2 PRINCIPAIS LIMITAÇÕES

Abaixo estão listadas as principais limitações de caráter tecnológico encontradas ao longo do desenvolvimento:

- O sistema não capta detalhes na superfície dos objetos medidos que sejam da ordem de milímetros. Isso se dá por uma limitação natural do próprio sistema de medição.
- Caso o modelo seja testado diretamente em uma aeronave, algumas variáveis devem ser adicionadas, de modo a garantir a confiabilidade dos testes.
- O fato de ser em um ambiente fechado impossibilitou a tentativa de usar GNSS como forma de corrigir a estimativa de movimento.
- a

6.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo da jornada de desenvolvimento deste documento, notou-se que algumas ideias podem ser acrescentadas ao escopo do trabalho como forma de refinar os resultados e proporcionar novas soluções com base no uso de LiDARs a curta distância. São elas:

- Acoplar um INS ao LiDAR e avaliar os resultados da concatenação através da fusão de dados entre os dois sensores.
- Realizar a repetição do experimento com deslocamentos diferentes para cada uma das montagens, visando aumentar a robustez dos resultados.
- Testar diferentes algoritmos de ICP com diferentes parâmetros e configurações, de modo a buscar técnicas que não ocorram os maus comportamentos encontrados nos experimentos 2 e 4.
- Aprimorar técnicas de calibração em relação aos canais do LiDAR, de modo a garantir que os parâmetros intrínsecos informados pela fabricante estão corretos.
- Explorar técnicas de segmentação de nuvem de pontos, de modo a utilizar somente partes da nuvem como entrada ao algoritmo de ICP, visando melhorar os resultados de estimação da trajetória.

Referências

- ABENDI. **Live Abendi - Inspeção Visual Quantitativa com Uso de Drone (RPAS)**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=qGI9c0LDkE0>>. Acesso em: 20 set. 2022.
- ABNT. NBR 15475 - Acesso por corda - Qualificação e certificação de pessoas. 2008a.
- ABNT. **ABNT NBR-15595 - Acesso por corda - Procedimento para aplicação do método**. [s.l: s.n.].
- ABS. GUIDE FOR BUILDING AND CLASSING SUBSEA RISER SYSTEMS. n. January, 2017.
- ADRIANO, C.; TEIXEIRA, N. Produção de petróleo terrestre no Brasil. p. 215–264, 2019.
- ALMEIDA, F. L. DE; MANSOLDO, A. C. **Esporte de Avventura: Perfil dos profissionais em escalada e rapel**. Disponível em: <<https://repositorio.usp.br/item/002298162>>.
- ALMHDIE, A.; SERVICE, L. C.; DERICHE, M. A New Implementation of the ICP Algorithm for 3D Surface Registration using a Comprehensive Look Up Matrix. n. September 2015, 2006.
- ANAC. **REGULAMENTO BRASILEIRO DA AVIAÇÃO CIVIL ESPECIAL RBAC-E 94 Requisitos Gerais para Aeronaves Não Tripuladas de Uso Civil - RBAC-E nº 94**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94-emd-00>>.
- ANP. **Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural**. [s.l: s.n.].
- BAI, Y. Pipelines and risers. v. 3, 2001.
- BAI, Y.; BAI, Q. **Subsea Pipelines and Risers**. [s.l: s.n.].
- BAI, Y.; BAI, Q. **Subsea Pipeline Integrity and Risk Management**. [s.l: s.n.].
- BARFOOT, T. D. State estimation for robotics. **State Estimation for Robotics**, p. 1–368, 2017.
- BESL, PAUL J., N. D. M. A Method for Registration of 3-D Shapes. 1992.
- BROWN, E. **Stereo vision camera pumps up images with Jetson TX2**. Disponível em: <<https://linuxgizmos.com/stereo-vision-camera-pumps-up-images-with-jetson-tx2/>>. Acesso em: 20 set. 2022.

BURGARD, W. et al. **Introduction to Mobile Robotics Iterative Closest Point**. Freiburg, Germany University of Freiburg, , [s.d.].

BUSBY, J. **3D Scanning Reflective Objects With Photogrammetry**. Disponível em: <<https://www.3dscanstore.com/blog/3d-scanning-reflective-objects>>.

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

CAMERINI, M. G. **Monitoramento de Risers Flexíveis Através de Técnica Baseada em Vibrações**. [s.l: s.n.].

CBIE. **Quais as diferenças entre os tipos de Produção de Petróleo?** Disponível em: <<https://cbie.com.br/artigos/quais-as-diferencas-entre-os-tipos-de-producao-de-petroleo/>>. Acesso em: 1 jul. 2021.

CHADHA, H. S. **Kalman Filter Interview**. , 2018.

CHAUDHRY, A. et al. **Inertial Measurement Units. EECS 373 Project Presentation**, 2018.

CHETVERIKOV, D.; STEPANOV, D. **The Trimmed Iterative Closest Point Algorithm**. Budapest Computer and Automation Research Institute, , [s.d.].

COMBÈS, B.; PRIMA, S. registration of 3D point sets A new efficient EM-ICP algorithm for non-linear registration of 3D point sets. 2019.

DANIILIDIS, K.; KLETTE, R. **Imaging beyond the Pinhole Camera**. [s.l.] Springer, 2006.

DIAS, J. L. DE M.; QUAGLINO, M. A. **A questão do Petróleo no Brasil: Uma história da PETROBRAS**. Rio de Janeiro, RJ, Brazil: FGV, 1993.

DOUGLAS, B. **Understanding Sensor Fusion and Tracking, Part 1: What is Sensor Fusion? Video - MATLAB**. Disponível em: <<https://uk.mathworks.com/videos/sensor-fusion-part-3-fusing-a-gps-and-an-imu-to-estimate-pose-1569911082630.html>>.

DU, S. et al. An extension of the icp algorithm considering scale factor. v. 1, p. 193–196, 2007.

EMESENT. **Hovermap - World's first autonomous LiDAR mapping payload**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=2zadTtCadeI>>. Acesso em: 2 dez. 2022.

EMLID. **How RTK works**. Disponível em: <<https://docs.emlid.com/reachrs/rtk-quickstart/rtk-introduction/>>. Acesso em: 26 set. 2022.

FAHLSTROM, P. G.; GLEASON, T. J. **Introduction to UAV Systems: Fourth Edition**. [s.l: s.n.].

FARIAS, N. S. **Influência da Discretização de Espectros de Onda na Resposta de movimento de Plataformas Flutuantes Offshore**. [s.l.] UFRJ, 2017.

FERGESTAD, D.; LØTVEIT, S. A. **Handbook on Design and operation of flexible pipes**. [s.l: s.n.].

FIGUEIREDO, É. A. **Extração de petróleo em terra**. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/quimica/extracao-de-petroleo-em-terra/>>. Acesso em: 1 jul. 2021.

GAKSTATTER, E. RTK Networks – What, Why, Where. **GPS WORLD Market insights**, 2009.

GEEN, J.; KRAKAUER, D. **New iMEMS ® Angular-Rate-Sensing Gyroscope Analog Dialogue**. [s.l: s.n.].

GÉNÉRATION ROBOTICS. **Ellipse 2 Micro IMU**. Disponível em: <<https://www.generationrobots.com/en/403520-ellipse-2-micro-imu.html>>. Acesso em: 29 dez. 2022.

GOMES, C. A. P. M. **FINITE ELEMENT ANALYSIS OF FLEXIBLE PIPES: BENDING COMBINED WITH TENSILE LOAD**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

GROETELAARS, N. J.; LEÃO DE AMORIM, A. **Tecnologia 3D Laser Scanning: características, processos e ferramentas para manipulação de nuvens de pontos**. [s.l: s.n.].

GUPTA, S. G.; GHONGE, M.; JAWANDHIYA, P. M. Review of Unmanned Aircraft System (UAS). **SSRN Electronic Journal**, n. May 2014, 2019.

HACKER, N. L. A. Saúde e trabalho de risco: sentidos da atividade no alpinismo industrial. n. April, 2017.

HARDING, K. **Handbook of optical dimensional metrology**. [s.l: s.n.].

HARIYAMA, M.; YOKOYAMA, N.; KAMEYAMA, M. Design of a trinocular-stereo-vision vlsi processor based on optimal scheduling. **IEICE Transactions on Electronics**, v. E91-C, n. 4, p. 479–486, 2008.

HARTLEY, R.; ZISSERMAN, A. **Multiple View Geometry in Computer Vision**. [s.l: s.n.].

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

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS - Global Navigation Satellite Systems**. [s.l: s.n.].

HORUS AERONAVES. **Precisão de dados:Entenda as diferenças entre os sistemas GPS, RTK e PPK**. Florianópolis, 2020. Disponível em: <<https://horsaeronaves.com/precisao-de-dados-entenda-a-diferenca-entre-os-sistemas-gps-rtk-e-ppk/>>

HOSTETTLER, R. Basics of Sensor Fusion. 2018.

IBP. **Média de produção de petróleo dos poços onshore**. Disponível em: <<https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/snapshots/media-de-producao-de-petroleo-dos-pocos-onshore/>>. Acesso em: 1 jul. 2021.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS)**. [s.l: s.n.].

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

JOSHI, N. **4 sensors that are being used in drones [IOT] Drones Technology | Al-lerin**, 2016.

KIDD, J. R. **Performance Evaluation of the Velodyne VLP-16 System for Surface Feature Surveying Recommended Citation**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://scholars.unh.edu/thesis/1116>>.

KIM, G. et al. Metasurface-driven full-space structured light for three-dimensional imaging. **Nature Communications**, v. 13, n. 1, 1 dez. 2022.

LEÃO, A. P. DE et al. Análise Dos Sistemas De Risers Utilizados Na Produção de Óleo em sistemas Submarinos. **Ciências Exatas e Tecnológicas,Londrina**, v. 2, p. 23–36, 2014.

LECROSNIER, L. **Estimation de pose multimodale-Approche robuste par les droites 2D et 3D**. [s.l: s.n.].

LEITE, C. G. C. L. **Desenvolvimento e Caracterização de Tubos Compósitos para Aplicação em Risers Rígidos**. [s.l.] UFRJ, 2011.

LI, Y. et al. IMU/magnetometer/barometer/mass-flow sensor integrated indoor quadrotor UAV localization with robust velocity updates. **Remote Sensing**, v. 11, n. 7, 1 abr. 2019.

LIMA, A. L. DE. **Avaliação de Metodologias de Análise de Unidades Estacionárias de produção de petróleo Offshore**. [s.l.] UFRJ, 2006.

LUHMANN, T. et al. **Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging**. [s.l: s.n.].

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

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

MARINHO, C.; SANTOS, J. M. C. **Utilização de RPAS na Indústria do Petróleo**. 2018.

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

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

MCMANAMON, P. **Field Guide to Lidar**. [s.l.] SPIE, 2015.

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

MELLISH, B. **How a pinhole camera works**. Disponível em: <<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pinhole-camera.png>>.

MEZIAN, M. et al. **Uncertainty propagation for terrestrial mobile laser scanner**. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives. **Anais...**International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2016.

MILLER, C. A. Risers Introduction. **Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering**, 2017.

MORAIS, J. M. DE. **Petróleo em Águas Profundas - Uma história tecnológica da PETROBRAS na exploração e produção offshore**. Brasília: [s.n.].

MORAIS, J. M. DE. **Petróleo em águas profundas: Uma história tecnológica da PETROBRAS na exploração de produtos offshore**. Brasília: IPEA, 2013b.

NAHANGI, M.; HAAS, C. T. Automated 3D compliance checking in pipe spool fabrication. **Advanced Engineering Informatics**, v. 28, n. 4, p. 360–369, 1 out. 2014.

NETO, J. B. O.; COSTA, A. D. A Petrobrás e a exploração de Petróleo Offshore no Brasil: um approach evolucionário. p. 1–15, 2007.

OLIVEIRA, W. D. S.; GONÇALVES, E. N. Implementação em c: filtro de kalman, fusão de sensores para determinação de ângulos. **ForScience**, v. 5, n. 3, p. 1–18, 2017a.

OLIVEIRA, W. D. S.; GONÇALVES, E. N. Implementação em c: filtro de kalman, fusão de sensores para determinação de ângulos. **ForScience**, v. 5, n. 3, p. 1–18, 2017b.

OSTEN, W.; REINGAND, N. **Handbook of Optical Systems Advances in Speckle Metrology and Related Techniques Ultra-fast Material Metrology**. [s.l: s.n.].

PAUL MCMANAMON. **LiDAR Technology & Systems**. [s.l: s.n.].

PAUL MCMANAMON. **LiDAR Technology & Systems**. [s.l: s.n.].

PENNEY, G. P. et al. A Stochastic Iterative Closest Point Algorithm (stochastICP). p. 762–769, 2001.

PETRÓLEO. **Afinal, o que onshore e offshore?** Disponível em: <<https://www.opetroleo.com.br/afinal-o-que-onshore-e-offshore/>>. Acesso em: 1 jul. 2021.

PETRÓLEO, O. **Drones para o Mercado de Petróleo tem previsão de crescimento para 2024**. Disponível em: <<https://opetroleo.com.br/drones-para-o-mercado-de-petroleo-tem-previsao-de-crescimento/>>.

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

PINTO, T.; KOHLER, C.; GONÇALVES JUNIOR, A. **OPTICAL MEASUREMENT, COMPARISON AND SIGNALING OF LARGE FREE FORM SURFACES**. [s.l: s.n.].

PINTO, T. L. F. C. **Medição Óptica, Comparação e Sinalização de Superfícies com Forma Livre de Grande Extensão**. [s.l: s.n.].

POTTER, M. Pinhole cameras: Positives and negatives. **Scope**, v. 2015, n. 11, p. 49–54, 2015.

SALGADO, A. L. DE P.; AZEVEDO, D. A. G. **Corrosão nas Estruturas Metálicas de Tubos Flexíveis Utilizados para Exploração de Petróleo Offshore**. [s.l.] UFF, 2016.

SARVROOD, Y. B.; HOSSEINYALAMDARY, S.; GAO, Y. Visual-LiDAR odometry aided by reduced IMU. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 5, n. 1, 2016.

- SEAL, A.; BHOWMICK, A. Performance Analysis of Iterative Closest Point (ICP) Algorithm using Modified Hausdorff Distance. p. 2794–2800, 2017.
- SEGAL, A. V.; HAEHNEL, D.; THRUN, S. **Generalized-ICP**. Stanford, , [s.d.].
- SICILIANO, B. et al. **Robotics - Modelling, Planning and Control**. London: [s.n.].
- SIEGWART, R.; NOURBAKHSI, I. R. **Introduction to Autonomous Mobile Robots**. Cambridge: [s.n.].
- SINCLAIR, I. **Sensors and Transducers**. 3rd. ed. [s.l.] Reed Elsevier PLC Group, 2001.
- SUBSEATECH. **Mini-ROV Observer**. Disponível em: <<https://www.subseatech.com/mini-rov-observer/>>.
- THRUN, S. **PROBABILISTIC ROBOTICS**. p. 1999–2000, 2000.
- TIMO ZINSSER*, JOCHEN SCHMIDT, H. N. A REFINED ICP ALGORITHM FOR ROBUST 3-D CORRESPONDENCE ESTIMATION. n. September, p. 3–6, 2003.
- TRAFINA, T.; MILAN, R. Construction of 3D Point Clouds Using LiDAR Technology. n. May, 2016.
- ULC ROBOTICS. **Offshore Wind Turbine Inspection Using Drones**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=l6KwFJ19u4k>>.
- VANCI, P. H. **Fusão de Imagens e Sensores Inerciais para a Estimação e Controle de Veículos Autônomos**. [s.l.: s.n.].
- VANCI, P. H. **Fusão de Imagens e Sensores Inerciais para a Estimação e Controle de Veículos Autônomos**. [s.l.: s.n.].
- VARGAS-LONDOÑO, T. et al. **A theoretical and experimental analysis of the bending behavior**. OMAE 2014. **Anais...**2014.
- VECTORNAV. **MEMS Accelerometers**. Disponível em: <<https://www.vectornav.com/resources/inertial-navigation-primer/theory-of-operation/theory-mems>>. Acesso em: 30 dez. 2022.
- VEITCH-MICHAELIS, J.; STOREY, J. **Fusion of LIDAR with stereo camera data - an assessment**. [s.l.] University College London, 2016.
- VELODYNE. **Puck LITE**.
- VELODYNE. **VLP-16 User Manual**. [s.l.: s.n.].
- VERGOUW, B. et al. The Future of Drone Use. **Asser Press**, v. 27, p. 21–46, 2016.
- WANG, T. et al. Applications of UAS in Crop Biomass Monitoring: A Review. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, n. April, p. 1–16, 2021.

WANG, X. Fast alignment and calibration algorithms for inertial navigation system. **Aerospace Science and Technology**, v. 13, n. 4–5, p. 204–209, jun. 2009.

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

WSJ. **Laser Eyes Pose Price Hurdle for Driverless Cars.** Disponível em: <<https://www.wsj.com/articles/laser-eyes-pose-price-hurdle-for-driverless-cars-1405969441>>. Acesso em: 2 dez. 2022.

YANG, J. et al. Go-ICP : A Globally Optimal Solution to 3D ICP Point-Set Registration. p. 1–14, 2016.

YOSHIZAWA, T. **Handbook of Optical Metrology: Principles and Applications.** [s.l: s.n.].

YOUNG, A. T. **Astronomical refraction.** Disponível em: <https://aty.sdsu.edu/explain/atmos_refr/astr_refr.html>.

ZANGENEHNEJAD, F.; GAO, Y. GNSS smartphones positioning: advances, challenges, opportunities, and future perspectives. **Satellite Navigation**, v. 2, n. 1, 1 dez. 2021.

ZHANG, E. Integration of IMU and Velodyne LiDAR sensor in an ICP-SLAM framework. 2016.

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

Apêndice A

Lista de algoritmos de ICP

Sigla	Nome	Descrição
OICP (BESL, PAUL J., 1992)	Original ICP	Técnica tradicional utilizando variantes do método dos mínimos quadrados.
GICP (SEGAL; HAEHNEL; THRUN, [s.d.])	Generalized ICP	Combinação de técnicas ponto a ponto e ponto a plano, em um mesmo algoritmo.
GoICP (YANG et al., 2016)	Globally Optimal ICP	Utiliza técnicas de <i>Branch and Bound</i> (BnB) para encontrar soluções ótimas.
CICP (ALMHDIE; SERVICE; DERICHE, 2006)(SEAL; BHOWMICK, 2017)	Comprehensive ICP	Utiliza uma técnica chamada <i>Comprehensive Look-up Matrix</i> , o que garante para cada ponto da nuvem um único ponto homólogo compatível na próxima nuvem.
TICP/TrICP (CHETVERIKOV; STEPANOV, [s.d.])	Trimmed ICP	Utiliza métodos estatísticos robustos, como mínimos quadrados aparados e menor mediana dos quadrados.
PICP (TIMO ZINSSER*, JOCHEN SCHMIDT, 2003)	Picky ICP	Semelhante ao OICP, com uma diferença na primeira etapa do algoritmo, utilizando o método de rejeição de pontos duplicados.
SICP (DU et al., 2007)	Scaling ICP	Utiliza fatores de escala para otimização do ICP.
Non-rigid ICP (SEAL; BHOWMICK, 2017)	Non-rigid ICP	Utiliza parâmetros de ajuste e restaurações não-rígidas.
EM-ICP (COMBÈS; PRIMA, 2019)	Expectation-maximization ICP	Utiliza algoritmos de expectativa-maximização e funções de máxima verossimilhança.
stochastICP (PENNEY et al., 2001)	Stochastic ICP	Utiliza perturbação randômica para encontrar a menor distância com o menor erro residual.

Fonte: O autor.