



Universidade Federal de Santa Catarina
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas

Rangel Sonaglio

**TECNOLOGIAS E TÉCNICAS PARA INSPEÇÃO DE DUTOS
E ESTRUTURAS SUBMARINAS EM ÁGUAS RASAS COM
AUV**

Joinville
2017

Rangel Sonaglio

**TECNOLOGIAS E TÉCNICAS PARA INSPEÇÃO DE DUTOS
E ESTRUTURAS SUBMARINAS EM ÁGUAS RASAS COM
AUV**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Simoni

Coorientador: Prof. Dr. Lucas Weihmann

Joinville
2017

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

Sonaglio, Rangel

Tecnologias e Técnicas para Inspeção de Dutos e Estruturas Submarinas em Águas Rasas com AUV / Rangel Sonaglio ; orientador, Roberto Simoni, coorientador, Lucas Weihmann, 2017.

189 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. Veículo Subaquático Não Tripulado. 3. Veículo Autônomo Subaquático. 4. Inspeção. 5. Águas Rasas. I. Simoni, Roberto . II. Weihmann, Lucas. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas. IV. Título.

Rangel Sonaglio

**TECNOLOGIAS E TÉCNICAS PARA INSPEÇÃO DE DUTOS E
ESTRUTURAS SUBMARINAS EM ÁGUAS RASAS COM AUV**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Joinville, 20 de dezembro de 2017.

Prof. Breno Barra, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Roberto Simoni, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Lucas Weihmann, Dr. Eng.
Coorientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Henrique Simas, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Daniel Martins, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Marcos Alves Rabelo, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado à minha família, alicerce sobre o qual é construído o caráter.

AGRADECIMENTOS

Dirijo os agradecimentos aos meus orientadores, que aceitaram o desafio de conduzir este trabalho e me emprestaram suas experiências para que o objetivo final pudesse ser atingido.

Agradeço à minha família, por servir como alicerce que me permitiu continuar na busca de aperfeiçoamento, em especial ao meu filho Gabriel, por não entender que os momentos para estudar e para brincar não eram compatíveis, e minha esposa, por entender e participar desse projeto. Meus pais por incentivarem minha evolução como engenheiro e meus irmãos, cunhados e sobrinhos pela motivação.

Aos professores e colegas, que contribuíram para que o caminho fosse muito rico e proveitoso.

Aos colegas de trabalho, por fazerem parte deste trabalho com seu conhecimento.

"If I have seen further it is by standing on the
shoulders of Giants."
(Isaac Newton, 1675)

"Quidquid latine dictum sit, altum viditur".
(Anônimo)

"O mundo precisa é de mais gênios humildes, hoje
restam poucos de nós".
(Oscar Levant, 1906-1972)

RESUMO

Estruturas subaquáticas, tais como equipamentos da indústria de petróleo (dutos, monoboias, *manifolds*, etc.), estão constantemente sob a ação de agentes nocivos à integridade estrutural assim como estão imersas em um ambiente que dificulta tanto atividades de inspeção quanto de manutenção. Normalmente nessas atividades são empregados mergulhadores, que estão limitados a condições da água e às garantias de segurança do trabalhador. Enquanto tecnologias foram desenvolvidas para substituir esses trabalhadores em situações de risco, tais inovações são usualmente empregadas em instalações de alto custo de operação e alta disponibilidade, justificando assim os investimentos. No entanto, em águas rasas, apesar da grande quantidade de estruturas, ainda são utilizados mergulhadores para tarefas de inspeção e manutenção.

Este trabalho apresenta uma revisão de literatura de técnicas e tecnologias utilizadas atualmente ou que podem ser empregadas com veículos autônomos subaquáticos nos serviços de investigação e inspeção, sobretudo em estruturas e equipamentos da indústria do petróleo, como dutos, manifolds, monoboias, amarras, dentre outros. A introdução de veículos autômatos subaquáticos, também chamados de UUVs, pode trazer ganhos em custo e segurança nas atividades desse meio. Dentre os UUVs, ROVs e AUVs hoje são os mais populares, cada um com suas características peculiares. O AUV apresenta-se como tendo boa adaptação à aplicação em estudo, em vista disso e tendo como motivação uma situação real, utilizando como ponto de partida um modelo comercial de AUV, um conceito ou solução pode ser formulado com o objetivo de empregá-lo como ferramenta de uso acessível para a situação proposta. Nesse âmbito, técnicas e tecnologias de inspeção podem ser incorporadas ao AUV para capacitá-lo à tarefa de inspeção de estruturas subaquáticas em águas rasas. Uma descrição e análise das características do ambiente a ser inspecionado também se faz necessária, devido à sua influência nas escolhas de técnicas e ferramentas e, sobretudo, no resultado esperado. Essas informações serão subsídio para a proposta de projeto de um AUV que teria a capacidade de executar determinadas inspeções nas estruturas designadas.

Palavras-chave: Veículo Subaquático Não-tripulado. UUV. Veículo Autônomo Subaquático. AUV. Inspeção. Ambiente Subaquático. Segurança. Projeto de Produto. Estruturas Subaquáticas. Águas Rasas.

ABSTRACT

Underwater structures are constantly under the action of structural integrity hazards as well as they are immersed in an environment that poses difficulties to develop inspection or maintenance activities. Usually, specialized divers do such activities, but they are limited to operate under certain water characteristics and work safety conditions. Although new technologies are under development to replace those workers in hazardous situations, such innovations are employed, usually, to high operation costs and high availability facilities, so the high costs involved are justified. Nevertheless, for the operation in shallow waters, despite very common, still the work of divers in inspection and maintenance are in demand.

This work presents a literature review on inspection techniques and technologies that are currently used or could be applied on unmanned underwater vehicles to inspect structures and equipments for petroleum industry, like single point mooring and pipelines. The introduction of Unmanned Underwater Vehicle (UUV) has potential to bring a more safety and cost effective operation in such environment. Among the UUV, ROV and AUV are, today, some of the most popular ones in use, each one has its own particularities. The AUV seems to be a good fit to the activity under study, adding to that assumption a real situation as motivation to build a concept or solution aiming the use of it as a tool fitted to the proposed situation, using as a starting build block a commercial model of AUV. Inspection techniques and technologies may be incorporated to a AUV to make it able to inspect underwater structures in shallow waters and may present good response in the environment where it would operate. The environment has to be described and analyzed, what is necessary due to the characteristic behavior of the inspection techniques in different scenarios and the result quality expected. All those information would subsidize the AUV design to be proposed, that would have the abilities necessary to accomplish designed tasks for shallow water structures.

Keywords: Unmanned Underwater Vehicle. UUV. Autonomous Underwater Vehicle. AUV. Inspection. Safety. Underwater Environment. Product Design. Underwater Structures. Shallow Waters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - ROV.....	4
Figura 2 - IAUV.....	4
Figura 3 - AUV.....	4
Figura 4 - ASC.....	5
Figura 5 - Glider.....	5
Figura 6 - Biomimetizador.....	5
Figura 7 - AUV Ecomapper da YSI Systems.....	6
Figura 8 - Ciência e Tecnologia do espaço oceânico.....	6
Figura 9 - Macrofases, fases e saídas do modelo de referência.....	20
Figura 10 - Localização de painel baseada em visão e realização de sequências de teste.....	25
Figura 11 - Sequência de docagem do Girona 500.....	25
Figura 12 - Princípio de localização com transponder.....	29
Figura 13 - Imagem capturada com sensor óptico a partir de um AUV.....	35
Figura 14 - AUV Ecomapper com suporte adaptado para câmera externa.....	40
Figura 15 - Câmera pivotante.....	41
Figura 16 - Câmera estereoscópica com iluminação LED do AUV AVALON.....	42
Figura 17 - Configuração de sensores do Atlas Maridan.....	43
Figura 18 - Localização do duto com dados integrados.....	43
Figura 19 - Comparativo entre imagens com razão PSNR – figuras (a) e (b) utilizam o modelo HEVC e as imagens (a') e (b') são do modelo proposto.....	45
Figura 20 - Etapas de rastreamento dos cabos a partir de sensores visuais.....	46
Figura 21 - Marco Autossimilar.....	47
Figura 22 - Imagens processadas da estrutura de estudo.....	48
Figura 23 - Erros de posição medidos no ROV.....	48
Figura 24 - Área de sombra com uso de sensores acústicos.....	54
Figura 25 - Imagem acústica do SVL.....	55
Figura 26 – Ecobatímetro.....	56
Figura 27 - HiSAS instalado no AUV HUGIN.....	57
Figura 28 - Princípios de funcionamento de LDL (a) e USBL (b).....	58
Figura 29 - AUV e componentes internos.....	72
Figura 30 - Ponteira desenvolvida para o AUV Iver2 pelo laboratório PeRL, da Universidade de Michigan.....	73
Figura 31 - Micro AUV.....	75
Figura 32 - Caminho percorrido pelo micro AUV em testes de laboratório	

(linha tracejada é o caminho programado, linha contínua o caminho percorrido).....	75
Figura 33 - Imagens da câmera durante ensaio de turbidez a uma distância de 1800mm	82
Figura 34 - Influência da turbidez no sinal do laser para diferentes posições a um raio de distância de 1800mm, para 2 objetos diferentes	83
Figura 35 - Processamento de imagem.	84
Figura 36 - Representação teórica da batimetria longitudinal do solo sob os dutos a serem estudados.	85
Figura 37 - Representação teórica da batimetria transversal do solo sob os dutos a serem estudados no ponto com maior diferença de profundidade.	85
Figura 38 - Traçado teórico dos dutos submarinos	86
Figura 39 - Duto submarino e relevo oceânico.	87
Figura 40 - Duto submarino e obstáculo.	87
Figura 41 - Monoboia (ou Single Pont Mooring) conectada a navio.	88
Figura 42 - Vão livre em duto submarino.	92
Figura 43 - Exemplo de falha de revestimento de duto subaquático. Falha da jaqueta de concreto e do revestimento anticorrosivo.	92
Figura 44 - Representação de duto, monoboia, PLEM, amarras e mangote.	99
Figura 45 - PLEM.	99
Figura 46 - Tabela de Mergulho para mergulho com descompressão e mergulho sem descompressão.....	101
Figura 47 - Casa da Qualidade para veículos subaquáticos - telhado ..	125
Figura 48 - Casa da Qualidade para veículos subaquáticos – requisitos do cliente.....	126
Figura 49 - Casa da qualidade para projeto de AUV para inspeção em águas rasas	130
Figura 50 - Base da casa da qualidade para projeto de AUV para inspeção em águas rasas.....	131
Figura 51 - Subistemas do AUV	135
Figura 52 - AUV Ecomapper da YSI Systems pertencente ao LRRG.	137
Figura 53 - AUV ECOMAPPER conforme fornecido pela YSI.....	139
Figura 54 - Ecomapper adaptado pela Universidad Politécnica de Cartagena	139
Figura 55 - Plano esquemático do AUV Ecomapper.	140
Figura 56 - Esquemático do HUGIN 3000 com principais sistemas e componentes.	141
Figura 57 - Representação e AUV de inspeção	145
Figura 58 - AUV, caminho e zona de inspeção.....	146

Figura 59 - Traçado dos dutos submarinos.....	147
Figura 60 - Campos de velocidade para veículo com formato torpedal.	148
Figura 61 - Trecho dos dutos (azul e vermelho) e linhas médias (marrom e preto)	149
Figura 62 - Área a ser inspecionada a partir dos caminhos de inspeção das linhas médias.....	149
Figura 63 - Veículo sobre a zona de inspeção, uma passagem e cobertura incompleta.....	150
Figura 64 - Veículo sobre a zona de inspeção, duas passagens e cobertura completa	151
Figura 65 - Planejamento de trajeto para batimetria em um lago com o AUV Ecomapper.....	151
Figura 66 - Deslocamento entre dois pontos, através de obstáculos ...	154
Figura 67 - Variação da curvatura.....	155
Figura 68 - Plano de missão para AUV Iver2.....	158
Figura 69 - Caminho de cortador de grama com cobertura completa.	158
Figura 70 - Caminho de cortador de grama com raio de manobra 0m.	159
Figura 71 - Caminho de cortador de grama com raio de manobra adequado e cobertura completa.	159
Figura 72 - Caminho de cortador de grama com raio de manobra maior que raio de alcance de sensor.	160
Figura 73 - Caminho de cortador de grama com sensores de longo alcance.	160
Figura 74 - Caminho com sobreposição de sinal dos sensores.....	161
Figura 75 - Sobreposição de sinal dos sensores.	161
Figura 76 - Caminho longitudinal ao traçado com sobreposição de sinal.	162
Figura 77 - Interrupção de traçado e perda de sinal de inspeção.....	163
Figura 78 - Trecho encoberto do duto.....	164
Figura 79 - Rotina do AUV Ecomapper para adquirir sinais de GPS .	164
Figura 80 - Caminho trocoidal.....	165
Figura 81 - Estação de carga para AUV.....	171
Figura 82 - Caminhos retilíneo, semicircular e cicloide prolata tangenciais.....	187
Figura 83 - Caminhos retilíneo, senoide e cicloide prolata tangenciais.	189

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de UUV e Aplicações.....	8
Tabela 2 - Empregos de UUV.....	8
Tabela 3 - Comparativo qualitativo entre AUV e outras técnicas de inspeção.....	14
Tabela 4 - Constantes de tempo de processos medidos X instrumentos.....	31
Tabela 5 - Relevância dos elementos da arquitetura computacional de PANDORA para os desafios.....	71
Tabela 6 - Lista de instrumentos fornecidos com o AUV IVER2 e aqueles instalados na Universidade de Michigan.....	74
Tabela 7 - Gradiente de turbidez em relação à presença de argila suspensa na água.....	81
Tabela 8 - Tabela resumo de inspeções em equipamentos e intervalos.....	103
Tabela 9 - Requerimentos de inspeção por técnica de inspeção.....	110
Tabela 10 - Relação entre serviços de inspeção e tecnologias que os atendam.....	116
Tabela 11 - Matriz de Pugh para seleção das tecnologias para os serviços.....	117
Tabela 12 - Solução tecnológica para os serviços relacionados.....	118
Tabela 13 - Resumo da proposta de sensoriamento para execução por serviço.....	119
Tabela 14 - Sensoriamento presente no AUV Avalon desenvolvido por Hildebrandt e Hilljegerdes (2010).....	123
Tabela 15 - Requisitos e Ciclo de Vida do Produto.....	129
Tabela 16 - Requisitos de engenharia por ordem de relevância quanto ao peso definido pelo cliente.....	133
Tabela 17 - Requisitos de engenharia por ordem de relevância quanto à meta estabelecida no projeto.....	133
Tabela 18 - Especificações do YSI Ecomapper.....	138
Tabela 19 - Módulos de um AUV conceitual.....	142
Tabela 20 - Configurações de AUV modular para multiplas corridas para mapeamento de vão livre em dutos submarinos.....	153

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D - Duas dimensões
2,5D – Duas dimensões e meia ou pseudo 3D em imagens gráficas
3D - Três dimensões
4K - Resolução de imagens de 3840x4320 pixels
8K - Resolução de imagens de 7680x4320 pixels
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADCP - *Acoustic Doppler Current Profilers*
AHWD - *Adaptive Hybrid Wavelets and Directional filter banks*
AMOS - *Centre for Autonomous Marine Operations and Systems*
ASC - *Autonomous Surface Craft*
AUV - *Autonomous Underwater Vehicle*
BIH - *Bureau International de L'Heure*
CCD - *Charge-Coupled Device*
CMAC - *Cerebellar Model Articulation Controller*
CMOS - *Complementary Metal-Oxide Semiconductor*
CMRE - *Centre for Marine Research and Experiment*
CRLB - *Cramer Rao Lower Bound*
CTD - *Conductivity, Temperature and Depth*
CTP – *Conventional Terrestrial Pole*
DGPS - *Differential Global Positioning System*
DVL - *Doppler Velocity Log*
DWT - *Discrete Wavelet Transform*
EKF - *Extended Kalman Filter*
FTU - *Formazine Turbidity Unity*
Full HD - Resolução de imagens de 1920X1080 pixels
GPS - *Global Positioning System*
HD - Resolução de imagens de 1366x768 pixels
HiSAS - *High-resolution Synthetic Aperture Sonar*
HVCE - *High Efficiency Video Coding*
IAUV - *Intervention Autonomous Underwater Vehicle*
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICP - *Iterative Closest Point*
IEKF - *Iterative Extended Kalman Filter*
IEMM - *Integrated Environmental Mapping and Monitoring*
IERS - *International Earth Rotation System*
ISME - *Interuniversity Center of Integrated Systems for the Marine Environment*
ISO - *International Organization for Standardization*
Laser - *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*

LBL - *Long BaseLine*
LIDAR - *Light Detection And Ranging*
LRRG - Laboratório de Robótica Raul Gunther
MEMS - *Micro Electro-Mechanical System*
NAVSTAR - *NAVigation Satellite And Ranging Global Positioning System*
NBR - Norma Brasileira
NORMAM - Normas da Autoridade Marítima
NORMEG - Normas de Mergulho
NR - Normas Regulamentadoras
NTNU - *Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet*
OHI - Organização Hidrográfica Internacional
OpenCV - *Open Source Computer Vision*
PANDORA - *Persistent Autonomy through Learning, Adaptation, Observation and Re-planning*
PeRL - *Perceptual Robotics Laboratory*
PETROBRÁS - Petróleo Brasileiro S.A.
PIG - *Pipeline Inspection Gauge*
PLEM - PipeLine End Manifold
PRODIP - Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos
PVC - Policloreto de Vinila
ROV - *Remotely Operated Vehicle*
SAD69 - *South American Datum 1969*
SAS - *Synthetic Aperture Sonar*
SBAT - Soprintendenza per i Beni Archeologici di Toscana
SBL - Short BaseLine
SBP - Sub Bottom Profilers
SD - Secure Digital Card
SLAM - Simultaneous Localization and Mapping
SMF - Sondadores de Multifeixe
SPC - Sistema de Proteção Catódica
SSD - *Solid State Drive*
SSMF - Sistema de Sondadores de Multifeixe
SSMT - Sistema Sondador
SSS - *Side Scan Sonar*
SVL - Sonar de Varredura Lateral
UAV - *Unmanned Aerial Vessel*
UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina
Ultra HD - Resolução de imagens de 3840x4320 pixels
UNIVPM - *Università Politecnica delle Marche*
USB - *Universal Serial Bus*

USBL - *Ultra Short BaseLine*

USV - *Unmanned Surface Vessel*

UTM - *Universal Transverse Mercator*

UUV - *Unmanned Underwater Vehicle*

VGA - Resolução de imagens de 640x480 pixels

WGS84 - *World Geodesic System 1984*

WiMUST - *Widely Scalable Mobile Underwater Sonar Technology*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	O ambiente subaquático	1
1.2	Veículos subaquáticos não tripulados	2
1.3	Aplicação de ROV e AUV	7
1.4	Autonomia dos UUV	9
1.5	A aplicação de AUVs.....	11
1.6	Justificativa	15
1.7	Motivação	16
1.8	Objetivos do estudo.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Desenvolvimento de Projeto de Produto.....	19
2.2	SLAM e Localização	21
2.3	Tecnologias de inspeção subaquáticas	30
2.4	Classificação de sensores	32
2.5	Revisão complementar de literatura.....	67
2.6	Comentários sobre o capítulo.....	77
3	AMBIENTE DE TRABALHO DO AUV	79
3.1	A água	79
3.2	Objeto de interesse para o estudo.....	84
3.3	Inspeção em estruturas subaquáticas.....	88
3.4	Inspeção e manutenção com mergulhadores	98
3.5	Comentários sobre o capítulo.....	104
4	PROJETO DE PRODUTO: AUV PARA INSPEÇÃO EM ÁGUAS RASAS.....	105
4.1	Sensoriamento.....	108
4.2	Projeto de produto.....	121
4.3	Projeto informacional.....	128
4.4	Projeto conceitual.....	134
4.5	Comentários sobre o capítulo.....	143

5	ABORDAGEM DE TRAJETO PARA O SERVIÇO DE INSPEÇÃO.....	145
5.1	Múltiplas passagens.....	149
5.2	Planejamento de movimento.....	154
5.3	Caminhos para cobertura completa.....	156
5.4	Comentários sobre o capítulo	166
6	CONCLUSÃO.....	167
6.1	Tendências futuras e desafios	169
6.2	Propostas para o futuro	170
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	173
	APÊNDICE.....	187

1 INTRODUÇÃO

Atualmente há uma evidente demanda para serviços na área de inspeção automatizada de instalações submarinas em águas rasas.

A tecnologia atualmente empregada para inspeção de equipamentos submarinos já está bastante evoluída, pois está inserida em um mercado onde há altos orçamentos envolvidos e o ambiente altamente hostil a que está sujeito o trabalho também serve de motivador. O emprego dessa tecnologia está geralmente relacionado a instalações de alto custo de operação e que precisam ter alta disponibilidade, atraindo assim investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento e Inovação (SONAGLIO, SIMONI E WEIHMANN, 2016).

Esses custos tornam-se proibitivos quando se tratam de trabalhos em profundidades menores, sobretudo em áreas próximas à costa, pois tais atividades podem ser executadas por técnicas menos elaboradas e os riscos envolvidos são menores (SONAGLIO, SIMONI E WEIHMANN, 2016). Floriani (2013) coloca propriamente que métodos de investigação de águas profundas não são diretamente transferíveis para águas rasas e o trabalho em águas rasas requer equipamentos específicos. A envergadura dos equipamentos de inspeção robotizada também dificulta a operação junto à costa, já que espaço para manobra é limitado e os equipamentos auxiliares também são, normalmente, bastante robustos. Nesse caso, são largamente usados os serviços de mergulhadores, que carregam consigo todo uma gama de instrumentos e aparelhos, assim como o trabalho está sujeito a um rol de riscos, sobretudo para os próprios mergulhadores.

Mesmo o trabalho desses profissionais não é capaz de cobrir a extensão dos equipamentos submarinos a serem inspecionados, assim como faltam instrumentos necessários para aprimorar a precisão da inspeção. Há ainda questões como condições meteorológicas, condições marinhas, tempo de mobilização, precisão de localização e dimensionamento preciso de características importantes (SONAGLIO, SIMONI E WEIHMANN, 2016).

Para essas tarefas o uso de ferramentas robotizadas, tais como veículos subaquáticos não tripulados, oferece uma série de ganhos, sobretudo no aumento de precisão e segurança das operações.

1.1 O ambiente subaquático

A água é o elemento mais presente na superfície terrestre, distribuída em aproximadamente 71%, sendo 97,5% desta correspondente a oceanos e mares (ROCHA, 2012). Ela tem grande importância

econômica e social para os habitantes do planeta, e armazena grandes recursos naturais. Dividida em oceanos, lagos, rios, cursos de águas doce etc., onde se encontram grandes e variados ecossistemas, além de servir como meio de navegação e transporte para toda a humanidade, ao longo de toda sua história. No entanto, os recursos hídricos requisitam técnicas e equipamentos específicos para que sejam acessados, mesmo sobre sua superfície.

O meio subaquático é um gigante desconhecido, em sua grande parte, o que não impede que desperte o desejo humano de explorá-lo e dominá-lo, sobretudo porque ali existem diversas fontes de recursos desejados pela sociedade humana, tais como alimentos ou minerais, como o petróleo e o gás. A importância econômica dos mares é inegável, tanto para o transporte como linhas de comunicação, visto que pelos leitos oceânicos cruzam diversos cabos de comunicação que ligam continentes, além de túneis para transporte humano ou dutos de transportes de petróleo e gás (ROCHA, 2012).

A busca por combustíveis fósseis, importantes em nossa matriz energética, levou à exploração de novas fontes no solo do oceano, atingindo grandes profundidades: 3.107m na Índia (OFFSHORE ENGINEERING, 2011 *apud* ROCHA, 2012); em 2011 a PETROBRÁS chegou a 1.886m para extração e 1.413m produção (PETROBRÁS, 2011 *apud* Rocha, 2012), chegando a 2.990m em 2015 (PETROBRÁS, 2017).

Pesquisas submarinas também são executadas por diversas áreas da ciência, além de buscas arqueológicas ou puramente como planejamento turístico. Nesse contexto os veículos subaquáticos não tripulados são ferramentas que contribuem para a redução de riscos e custos (ANTONELLI; FOSSEN; YOERGER, 2008; MARANI; CHOI; YUH, 2009 *apud* ROCHA, 2012).

1.2 Veículos subaquáticos não tripulados

Em ambientes aquáticos, o emprego tradicional de mergulhadores ou veículos subaquáticos tripulados vêm sendo sistematicamente substituído por veículos subaquáticos não tripulados com vantagens sobretudo quanto à redução de risco de segurança, como a exposição à pressão, temperatura ou a falta de ar (BENNETT *et al.*, 1984; TONJUM *et al.*, 1984 *apud* ROCHA, 2012) e, ainda, quanto à sua capacidade de acessar áreas de extrema profundidade, até recentemente impossíveis ao humano (YUH, 1990 *apud* ROCHA, 2012). Os UUVs são capazes de trabalhar em espaços e a custos que veículos subaquáticos tripulados não são capazes de alcançar (ANTONELLI, 2006 *apud* ROCHA, 2012), por

isso superam estes no número de operações subaquáticas (ANTONELLI *et al.*, 2008 *apud* ROCHA, 2012).

Veículos subaquáticos não tripulados são classificados como robôs móveis com capacidade de trabalho submarina, que tanto podem ser operados (comandados) remotamente, quanto atuar autonomamente a partir de parâmetros pré-definidos.

O uso de veículos subaquáticos não tripulados (UUV, do inglês *Unmanned Underwater Vehicle*) tem como alguns dos motivantes:

- Diminuir custos de inspeção;
- Aumentar a frequência de operações de inspeção;
- Diminuir os tempos gastos com as inspeções;
- Diversificar o uso de ferramentas de inspeção;
- Aumentar a precisão das inspeções;
- Diminuir a exposição humana ao risco;
- Acessar áreas impossíveis ao ser humano.

Lapierre (2006) classifica os UUVs de acordo com características, dentre eles os mais evidentes e utilizados na indústria são:

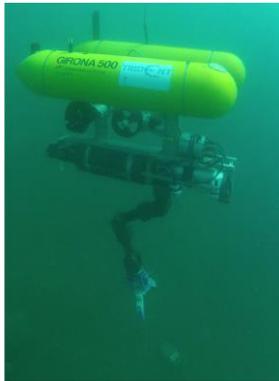
- *Remotely Operated Vehicle* (ROV): veículos que são teleoperados, geralmente possui manipuladores para executar tarefas (Figura 1);
- *Intervention Autonomous Underwater Vehicle* (IAUV): veículos autônomos dotados de manipuladores (Figura 2);
- *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV): veículos autônomos para uso em inspeção, sem intervenção (Figura 3);
- *Autonomous Surface Craft* (ASC): veículos com navegação sobre a superfície da água, que, no entanto, possuem instrumentos para atuação subaquática (Figura 4);
- *Glider Systems*: são UUVs que controlam profundidade e direção através de atuadores internos (Figura 5);
- *Biomimetizadores*: veículos que procuram imitar o movimento dos animais (Figura 6);
- *UUVs Platoons*: grupos que combinam vários UUVs, que cooperam entre si para execução de tarefas (Figura 7).

Figura 1 - ROV.



Fonte: Lapierre (2006).

Figura 2 - IAUV.



Fonte: Ridao *et al.* (2015).

Figura 3 - AUV.



Fonte: Lapierre (2006).

Figura 4 - ASC.



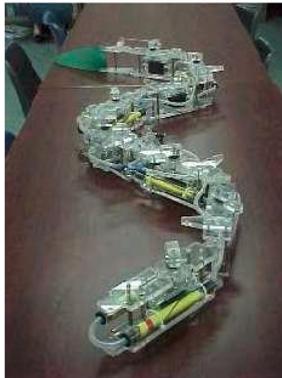
Fonte: Lapierre (2006).

Figura 5 - Glider.



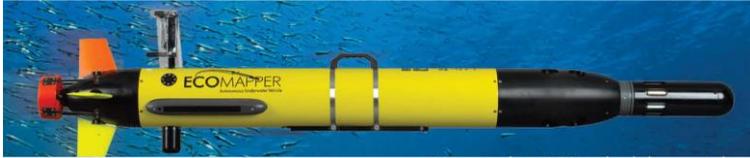
Fonte: Lapierre (2006).

Figura 6 - Biomimetizador.



Fonte: Lapierre (2006).

Figura 7 - AUV Ecomapper da YSI Systems.



Fonte: YSI Incorporated (2016).

A Figura 8 representa a presença dos diversos veículos robotizados nos diversos ambientes aquáticos, na superfície da água (como veículos não tripulados de superfície, ou *Unmanned Surface Vessel* – USV e barcos) sobre a superfície (como veículos não tripulados aéreos ou *Unmanned Aerial Vessel* – UAV, aviões e satélites de sensoriamento remoto), que podem ser usados como plataformas de sensores e como distribuidores de comunicação, e, por fim, os UUVs, como ROV, AUV e *glider*.

Figura 8 - Ciência e Tecnologia do espaço oceânico.



Fonte: Sørensen e Ludvigsen (2015).

Plataformas de superfície podem ser fixas em terra, flutuantes ou observatórios oceânicos, possuem alta resolução temporal, fornecimento satisfatório de energia e capacidade de armazenamento. No entanto estão limitadas à cobertura e alcance dos sensores instalados. Muitos sensores são coletores pontuais de amostras, outros podem cobrir grandes áreas

como sensoriamento acústico, que, a depender da frequência de trabalho, podem cobrir desde metros a quilômetros (SØRENSEN e LUDVIGSEN, 2015).

Sørensen e Ludvigsen (2015) chamam de plataformas subaquáticas aparatos que podem executar serviços que objetivam os corpos d'água, e sugerem que podem ser terrestres ou flutuantes, ROV, AUV e *glider*.

Plataforma de sensoriamento móvel, ROV é operada sob coluna d'água e normalmente é lançada a partir de embarcações. Sistemas de controle de movimento provêm capacidade de manobra e de manter sua posição estática, além de rastrear pontos de interesse e de trajetória. Dados de alta resolução de monitoramento de áreas podem ser conseguidos com o detalhamento do solo oceânico e amostras com resoluções milimétricas. O umbilical (que é o cabo que une a embarcação de apoio ao ROV) fornece alimentação elétrica e canal de comunicação ilimitados.

Gliders cobrem áreas muito mais extensas e em intervalos muito maiores em comparação com ROVs e AUVs, pois opera em baixa velocidade e com baixo uso de energia para propulsão. Tal característica permite operações que podem durar semanas, portanto o alcance espacial é grande. Para medições no ambiente aquático é uma boa ferramenta, no entanto, tanto a precisão na navegação quanto o controle é limitado, e devido à dificuldade em manter a distância com alvo fixo, tarefas como monitorar o solo oceânico não são indicadas para esse equipamento.

AUVs no formato de torpedo são largamente utilizados em mapeamento, têm boa hidrodinâmica e capacidade de manobra para navegação e manutenção de trajetória (MOLINE *et al.* 2005 *apud* SØRENSEN e LUDVIGSEN, 2015). Os pequenos AUVs possuem a vantagem de serem operados a partir de pequenas embarcações ou da costa. Atualmente, AUVs com capacidade de manter posição estática (um misto entre ROV e AUV) são capazes de executar intervenções leves (IAUV). Tais veículos podem fornecer dados do ambiente subaquático e do leito do corpo d'água com alta resolução espacial de vastas áreas. A área de cobertura por corrida é significativamente maior que a do ROV (PROENÇA, 2016).

1.3 Aplicação de ROV e AUV

Autores apontavam em 2009 que haviam 629 AUVs em operação, estimando-se uma demanda em torno de 1.150 veículos em 10 anos (Rocha, 2012). Para os ROVs os números seriam de 420 subindo para 570 em 5 anos para veículos de trabalho para a indústria de petróleo e gás (Douglas-Westwood, 2011 *apud* Rocha, 2012), no mesmo ano haviam

mais de 1.000 ROV de pequeno porte como modelos comerciais e de instituições de pesquisa (Button *et al.*, 2009 *apud* Rocha, 2012).

Os UUVs são relacionados em classes na Tabela 1 de acordo suas características (Rocha, 2012). Já a Tabela 2 lista uma descrição resumida dos tipos de empregos para veículos subaquáticos não tripulados.

Alguns sistemas subaquáticos que não atendem as classificações de UUV relacionadas, tais como veículos híbridos ROV/AUV, podem possuir o cordão umbilical para operação, comunicação e energia (características de ROV) ou operar por baterias, servindo a conexão apenas para comunicação (Rocha, 2012). Operando autonomamente, sem cordão umbilical, a comunicação é intermitente, e a ferramenta assume função autônoma, características de AUV (Rocha, 2012).

Tabela 1 - Classes de UUV e Aplicações.

Classe	Autonomia	Carga	Lançamento	Aplicações
Portáteis	até 20h	até 45kg	Manual	Operações de inspeção e coleta de dados
Leves	até 40h	até 220kg	Por lançadores	Coleta de dados, mapeamento, inspeção
Pesados	até 80h	até 1.350kg	Compatíveis com submarinos	Aplicações militares
Grandes	até 400h	até 10.000kg	Compatíveis com submarinos e navios	Aplicações militares

Fonte: Rocha, (2012).

Tabela 2 - Empregos de UUV.

Tipo	Atividade
Científica	Coleta de amostras físicas, químicas e biológicas. Mapeamento do leito oceânico e das calotas polares. Caracterização do perfil da coluna d'água Exploração de sítios de grande profundidade. Transporte e operação de equipamentos de pesquisa. Arqueologia subaquática Ensaio não destrutivos. Investigação de sítios de desastres.
Ambiental	Monitoramento de propriedades da água. Monitoramento de espécimes biológicos. Remoção de destroços e detritos
Militar	Investigação de locais de atracação. Contramedidas contra minas aquáticas. Busca e resgate de submarinos e armamentos. Vigilância de portos e costa.
Industrial e Comercial	Lançamento e manutenção de cabos. Inspeção de cabos e tubulações. Manutenção de tubulações. Construção e manutenção de estruturas <i>offshore</i> . Operação de painéis e válvulas. Inspeção de cascos e tanques de navios. Inspeção de usinas nucleares. Salvatagem.

Fonte: Rocha, 2012.

A classificação da missão, capaz de influenciar na escolha do UUV mais bem adaptado a ela, também é bastante útil.

Operações em cruzeiro são aquelas nas quais o veículo segue uma trajetória pré-definida e mantém movimento constante durante a execução da tarefa, durante a qual pode coletar dados ou amostras. Normalmente, são serviços de inspeção (ANTONELLI; FOSSEN; YOERGER, 2008; YUH, 2000 *apud* ROCHA, 2012). Nesses casos, os AUVs são os mais bem adaptados e mais eficientes energeticamente (TAVARES, 2003 *apud* ROCHA, 2012). Operações executadas em cruzeiro não precisam ser necessariamente contínuas, pois é bastante comum o emprego de tarefas intermitentes ou pulsadas, o que economiza energia, quantidade de dados armazenados, comunicação, dentre outros fatores.

Durante operações de intervenção o veículo interage com objeto da tarefa, o que exige que ele mantenha uma posição controlada (a fixação da posição é bastante difícil no ambiente aquático) (ANTONELLI, 2004; MARANI; CHOI; YUH, 2009; SOYLU; BUCKHAM; PODHORODESKI, 2010 *apud* ROCHA, 2012). Nessas missões, o ROV é o veículo mais adequado, principalmente devido à sua característica de manter sua posição, de interagir com objetos e de receber comandos do operador (ROCHA, 2012).

1.4 Autonomia dos UUV

A principal característica do AUV faz parte de seu próprio nome: autonomia. Aprimorar essa autonomia para quaisquer situações é um desafio permanente, e, portanto, de longo prazo no desenvolvimento dessa ferramenta (BUTTON *et al.*, 2009 *apud* ROCHA, 2012). É elementar para o AUV a sua capacidade de localização, pois esta influencia diversas tarefas por ele executadas, tais como navegação e inspeção. Todo UUV precisa evitar obstáculos, atingir objetivos físicos e executar tarefas ligadas ao posicionamento preciso e, para tal, se fazem necessários sensores que identifiquem sua posição e as condições do ambiente e atuadores capazes de seguir trajetórias e corrigi-las de modo necessário. Sistemas de mapeamento, localização e de reação a situações estão em constante desenvolvimento (ROCHA, 2012).

Rocha *et al* (2010) apresentam dois enfoques para o problema em questão:

- Autonomia física: o veículo estará livre de limitadores físicos, tais como umbilicais;

- Autonomia operacional: o veículo está capacitado para, a partir de uma definição de missão, analisar os dados, planejar sua trajetória e executar correções, tendo sempre firme o objetivo da tarefa.

Os AUVs são veículos com autonomies física e operacional mais bem definidas, enquanto os ROVs não têm a autonomia como parte importante de seu projeto (o que não impede que de alguma forma essa característica esteja presente nesse veículo).

O aperfeiçoamento da capacidade de sensoriamento e de reação a agentes do meio de trabalho é necessário para melhorar a autonomia operacional dos veículos não tripulados.

A autonomia tende a evoluir para viabilizar a dispensa do operador e para o veículo cumprir suas missões desassistido, assim reservando ao operador tarefas de mais alto nível, delegando ao sistema do próprio veículo decisões que seriam tomadas por humanos (MARANI *et al.*, 2009; YUH *et al.*, 1998 *apud* ROCHA, 2012). A autonomia, além das vantagens já apresentadas, pode ser considerada necessária ou imprescindível para a execução de algumas tarefas, principalmente ao se levar em consideração as seguintes condições:

- Profundidade;
- Temperatura;
- Tempo de missão;
- Extensão da missão;
- Visibilidade;
- Animais predadores;
- Agentes nocivos.

Considerando o mercado atual de veículos subaquáticos não tripulados, há grande variedade de ferramentas tanto teleoperadas quanto autônomas, e essa variedade não é necessariamente questão de evolução da ferramenta (da teleoperada para a autônoma) como é função da adaptabilidade do equipamento à missão. A mudança que motivaria a adoção de veículos autônomos em tarefas que ainda não o sejam hoje passa pelo avanço da tecnologia de autonomia operacional, pois, além do planejamento de movimentos (normalmente executados pelos AUVs), o aparelho deve ser capaz de executar tarefas que podem incluir intervenção (como os IAUVs).

Rocha (2012), em sua tese sugere que ROVs tendem a evoluir para AUVs (ROCHA, 2012). Tal sugestão depende diretamente da capacidade do AUV de reconhecer e atuar sobre problemas, o que, por sua vez, depende de uma programação muito bem planejada ou até do uso da

inteligência artificial para interpretar dados recebidos ao longo da missão e planejar e executar a reação necessária. Há, também, a barreira de comunicação, pois, devido à dificuldade na transmissão sem fio de dados no meio aquático, comandos enviados ao veículo podem não ser recebidos e interpretados a tempo para o correto desenvolvimento da missão.

1.5 A aplicação de AUVs

Dentre os equipamentos listados na seção 1.2, os AUVs possuem um diferencial muito importante: a capacidade de operar de maneira autônoma. Ou seja, após programada a missão em seu sistema de controle e colocado o equipamento no ambiente de trabalho, ele é capaz de executar todas as tarefas envolvidas sem necessidade de intervenção humana.

Concentrando-se em uma demanda específica de inspeção de estruturas em águas rasas, em vista à diminuição de custos e riscos das atividades hoje executadas na indústria petrolífera, algumas características do AUV que o tornam aplicável a essa situação e mais vantajoso em relação aos outros UUVs são identificadas a seguir:

- Opera de modo autônomo e programável;
- Adaptado para uso contínuo e em longo termo;
- Opera em velocidade de cruzeiro;
- Alcança grandes distâncias;
- Inspecciona estruturas contínuas;
- É aplicável sobretudo em inspeção submarina;
- Relativamente menores custo de operação, equipe envolvida e estruturas de apoio, em relação a outras técnicas ou tecnologias de inspeção submarina.

A Tabela 3 é um comparativo entre o AUV e outras técnicas a partir de características relacionadas à tarefa de inspeção. A tabela sintetiza informações sobretudo qualitativas coletadas em trabalhos de Lapierre (2006), Sørensen e Ludvigsen (2015), Lane *et al.* (2015) e Brown, Kim e Eustice (2008), relacionadas aos diferentes veículos, para efetuar uma comparação. A metodologia empregada é inspirada na matriz de Pugh, (PUGH 2002, *apud* MELLO, 2011), e se resume a definir um padrão (conhecido como *benchmark*, assumido como sendo o AUV), lado a lado com outros itens (discriminados a cada coluna), e comparar as características (discriminadas a cada linha da tabela) dos outros itens às características do padrão estabelecido. O padrão tem suas características consideradas neutras, com um identificador “0”, e as características dos

outros itens são avaliadas como superiores ao padrão, com o símbolo “+”, ou inferiores ao padrão, com o símbolo “-”.

Os critérios comparativos utilizados para a construção da Tabela 3 são baseados em características que atendam às condições comumente encontradas nos trabalhos de inspeção de estruturas submarinas até 8km da costa, como sistemas de dutos e monoboias:

- Tempo de missão: duas vezes superior ao determinado para mergulho não descompressivo (maior o tempo, avaliação positiva, menor o tempo, avaliação negativa);
- Estruturas extensas: comprimento total de 300m (um mergulhador deve percorrer 14,5m/min, considerando subida e descida de 24m cada, para cobrir essa distância em mergulho não descompressivo). Comprimento menor, avaliação negativa, comprimento maior, avaliação positiva;
- Alto mar: capazes de trabalhar a partir de 20m de profundidade (maior a profundidade sem adição de nova estrutura de apoio, avaliação positiva, menor profundidade, negativa);
- Inspeção submarina: execução de técnicas de inspeção variadas, principalmente em proximidade ao objeto inspecionado – sonar, imagem, laser, magnetômetro (caso seja possível executar inspeção além desses, avaliação positiva, menos que esses, avaliação negativa);
- Economia de energia: podem operar sem fornecimento externo constante durante o tempo de missão superior a duas vezes o de um mergulho não descompressivo e em velocidade de cruzeiro (caso precisem de fornecimento adicional de energia, avaliação é negativa, caso superem o tempo, avaliação positiva);
- Tempo de comissionamento: tempo entre embarque para missão e entrada na água para execução da tarefa desejada – 30 minutos (superado esse tempo, avaliação negativa, tempo inferior a esse, avaliação positiva);
- Equipe de apoio: número de pessoas esperadas – 2 pessoas (se necessárias mais pessoas, a avaliação é negativa, menos pessoas, avaliação é positiva);
- Estrutura de apoio: sistema de transferência de dados com e sem fio (WiFi) e computador – considera-se que o veículo pode ser lançado da costa (qualquer estrutura

adicional é considerada como critério negativo, estrutura menor que esta, é positiva);

- Desempenho autônomo: programador e sem operador durante a tarefa (se usa operador, avaliação negativa, se não precisa de programador, avaliação positiva);
- Manobrabilidade: execução de tarefas com manutenção de posição ou raio de manobra de 10m (raio maior, avaliação negativa, raio menor, avaliação positiva);
- Aplicabilidade a águas rasas: trabalho em águas de 0m a 200m de profundidade sem necessidade de adaptações (alcance menor, avaliação negativa, alcance maior, avaliação positiva);
- Aplicabilidade a águas profundas: trabalho em águas além de 200m de profundidade com barco para lançamento (alcance menor ou maior estrutura de apoio, avaliação negativa, estrutura menor, avaliação positiva);
- Custo/tarefa: custo de execução por tarefa, contando custos operacionais e de manutenção, descontados os custos de aquisição e depreciação. O AUV tem custos de manutenção elétrica e eletrônica e programação, além da equipe de apoio com duas pessoas. Como a avaliação é puramente qualitativa, portanto, são considerados custos como embarcações e equipamentos auxiliares, pessoal, mão de obra especializada, operadores, combustível etc. Avaliação negativa ou para maior estrutura de apoio, ou menor economia de energia, ou maior tempo de comissionamento, maior equipe de apoio ou menor tempo de missão. Avaliação positiva para menor estrutura de apoio, ou menor tempo de comissionamento, menor equipe de apoio, ou maiores economia de energia ou tempo de missão.

Tabela 3 - Comparativo qualitativo entre AUV e outras técnicas de inspeção

Escalas:		0: Benchmark							
		-: Característica menos favorável							
		+: Característica mais favorável							
		AUV	Mergulhador	IAUV	ROV	ASC	Glíder	Biomimetizadores	UUVs <i>Platoons</i>
1	Tempo de missão	0	-	-	+	0	0	-	0
2	Estruturas extensas	0	-	0	-	0	0	-	0
3	Alto mar	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Inspeção submarina	0	0	0	0	-	0	0	0
5	Economia de energia	0	-	-	-	0	-	0	-
6	Tempo de comissionamento	0	-	-	-	0	-	0	-
7	Equipe de apoio	0	-	-	-	-	0	0	-
8	Estrutura de apoio	0	-	-	-	-	0	0	-
9	Desempenho autônomo	0	+	+	-	0	0	0	-
10	Manobrabilidade	0	+	0	+	0	-	+	-
11	Aplicabilidade a águas rasas	0	0	0	0	0	0	0	0
12	Aplicabilidade a águas profundas	0	-	0	0	-	-	-	-
13	Custo/tarefa	0	-	-	-	0	0	0	-
Total 0		13	3	6	4	9	9	9	5
Total -			8	6	7	4	4	3	8
Total +			2	1	2	0	0	1	0

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Tabela 3 sintetiza elementos que justificam uma escolha inicial de adaptabilidade do AUV como ferramenta de inspeção para água rasas. O erro sistemático é inerente à avaliação qualitativa, e esta poderá ser corrigida com base em dados e observações posteriores. A escolha dos critérios utilizados também sofre com qualquer viés particular da pesquisa, e também podem ser revistos para se adaptar ao projeto necessário.

O ganho em segurança para o trabalhador ou à aplicabilidade em tarefas, situações ou ambientes não seguros pode ser uma vantagem adicional a ser considerada em comparação a outros métodos.

1.6 Justificativa

Sobre um sistema de descarga de navios (monoboia acoplada a dois dutos submarinos, que transportam produtos entre os navios e a terra, onde há o terminal aquaviário) é feita a proposta de uso de veículos de inspeção submarina para o auxílio na operação e manutenção dos dutos.

O histórico de operação dos dutos e padrões e normas de integridade servem de base para definir a necessidade de inspeção. Espera-se observar sobretudo defeitos normalmente encontrados nesses equipamentos, assim como outras características em que haveria necessidade ou desejo para que sejam monitorados.

Considerando as características das instalações e seu ambiente, serão avaliadas a aplicabilidade e a viabilidade do emprego do AUV para auxílio às atividades de operação e inspeção.

O objetivo principal deste estudo é de substituir os trabalhos de mergulhadores sempre que possível. Tal substituição deve ser vantajosa tanto do ponto de vista de eficiência quanto de riscos assim como de custos. Adicionalmente, pode-se promover a redução da exposição de mergulhadores, que são trabalhadores expostos a um grau de risco considerável e que exigem a disponibilidade de vários equipamentos de segurança de alto custo. A ferramenta AUV teria disponibilidade para operar continuamente, sem restrição de horário ou de condições do mar.

O AUV poderia ser posto em operação a partir da costa, evitando os custos de embarcação, câmara hiperbárica, equipe de apoio e equipamentos de mergulho exigidos quando se empregam mergulhadores.

A geografia do local, assim como o comportamento ao longo do tempo, sobretudo com a atuação das marés, ondas ou navegação serão importantes tanto para a localização do equipamento de inspeção, como para a trajetória do veículo.

Há uma proposta de pesquisa, com iniciativa do Laboratório de Robótica Raul Guenther da UFSC, de integrar o AUV Ecomapper® nas tarefas de inspeção de dutos e equipamentos subaquáticos. Como parte desse esforço, este trabalho se propõe a estudar tecnologias e iniciativas para a aplicação do AUV como ferramenta de inspeção, e como prepará-lo para atender à demanda de inspeção de estruturas em águas rasas.

1.7 Motivação

Ao se mostrar aplicável, o dispositivo de inspeção submarina poderá ser uma ferramenta de uso aplicável à indústria, que promoveria diminuição de custos de inspeção submarina e poderia diminuir a exposição humana a riscos. Também haveria a simplificação do processo de mobilização e execução de inspeções, aumentando a celeridade do serviço, sobretudo em emergências.

1.8 Objetivos do estudo

1.8.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é estudar a aplicabilidade de um AUV como ferramenta de inspeção de estruturas em águas rasas.

1.8.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

1. Identificação de técnicas e ferramentas já existentes que são empregadas para serviços de inspeção subaquática e que possam ser aplicadas em veículos subaquáticos.
2. Analisar o problema específico de inspeção do trecho submarino de oleodutos e a aplicabilidade de veículos submarinos para tal tarefa.
3. Proposição de AUV para a aplicação em questão.
4. Propor uma abordagem para inspeção, Análise de localização e caminho específicos para inspeção de dutos submarinos.

1.8.3 Metodologia e Organização de Trabalho

Este trabalho foi construído através de pesquisa da literatura, da busca de conhecimento técnico e de mercado, no emprego de ferramentas experimentadas e validadas e na experiência de profissionais de manutenção e de inspeção de estruturas subaquáticas. O texto foi construído de modo a conduzir de maneira estruturada o estudo aos objetivos lançados.

No capítulo 2 é apresentado o estudo de literatura em desenvolvimento de projeto de produto, técnicas e tecnologias de localização e mapeamento e inspeção e uma revisão de trabalhos que tiveram como escopo desenvolvimento de ferramentas de inspeção e

subaquática para aplicações que tivessem relação com os objetivos deste trabalho.

No capítulo 3 são apresentados o ambiente e o equipamento para os quais a ferramenta de inspeção a ser proposta se destinam. Uma revisão de serviços de inspeção para esse ambiente e equipamento é feita para que as demandas para o projeto do produto sejam conhecidas.

O capítulo 4 sintetiza o desenvolvimento do projeto de produto, onde as ferramentas da metodologia escolhida são aplicadas e onde são feitas as propostas de soluções para que os objetivos sejam atendidos.

Uma discussão sobre o problema delimitado de inspeção de dutos é feita capítulo 5, no qual caminhos para atendimento do planejamento de movimento e para a atuação autônoma de um veículo subaquático têm o assunto desenvolvido.

Por fim, o capítulo 6 é a conclusão do trabalho, com a identificação dos objetivos atingidos e a discussão de prospectos para novos desenvolvimentos na área de robótica subaquática.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No capítulo anterior foi fundamentada a definição dos objetivos deste trabalho, para os quais serão necessários a busca de referências na literatura científica e técnica e a fundamentação teórica. Considerando, portanto, que o AUV é um veículo adequado aos requisitos definidos para a tarefa a que se objetiva

Neste capítulo será apresentada a metodologia a ser seguida para o desenvolvimento do projeto do AUV que atenda aos objetivos definidos.

SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*) é um tema de elevada importância para a localização navegação submarina e é introduzida em seção específica.

As técnicas e tecnologias de inspeção que podem ser empregadas na investigação subaquática serão introduzidas a seguir.

Trabalhos científicos e técnicos de relevância na área de robótica subaquática, inspeção, trajetória, dentre outros temas foram selecionados para compor a fundamentação teórica deste trabalho e são apresentados neste capítulo.

2.1 Desenvolvimento de Projeto de Produto

Propor um veículo subaquático que deve ter a capacidade de executar inspeções (dispensando a presença humana) envolve análises e detalhamentos de projeto que devem resultar em um produto que atenda a requisitos e premissas que permitam a execução o serviço esperado.

Um método formal e sistemático oferece um caminho estruturado para o desenvolvimento de projeto de produto. A metodologia empregada por Romano (2003) e consolidada por Back *et al.* (2008), conhecida com o acrônimo PRODIP (Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos) se mostra bastante difundido, incluindo-se também trabalhos na área de robótica, como o de Simoni (2008), e veículos submarinos, como Floriani (2013). Tal metodologia considera etapas de desenvolvimento de projeto de produto predefinidas, representadas na Figura 9 junto com os resultados esperados para cada etapa.

Figura 9 - Macrofases, fases e saídas do modelo de referência.



Fonte: Romano (2003).

As três macrofases, normalmente nomeadas Planejamento, Projetação e Implementação, compreendem, cada uma, diferentes conjuntos de fases. No entanto, as fases limítrofes podem se deslocar entre as macrofases, atendendo, dessa forma, necessidades específicas de cada projeto de produto. Até mesmo a quantidade total de fases pode se alterar. Isso é importante, porque permite liberdade criativa e o modelo continua sendo válido para diferentes objetivos (FLORIANI, 2013).

De modo resumido, para Romano (2003), que usou o modelo para desenvolvimento de máquinas agrícolas,

- Planejamento: Primeira fase, envolve a elaboração do plano de projeto, com informações preliminares para o produto;
- Projetação: Elaboração de projeto de produto e plano de manufatura, que resulta em um produto definido, quando já terão sido desenvolvidos protótipos, testes e simulações;
- Implementação: Plano de manufatura e encerramento do projeto, incluindo um monitoramento pós-vendas e avaliação do produto pelos clientes.

Da mesma forma, resumidamente, as fases têm os seguintes escopos:

1. Planejamento do Projeto: mapeamento tecnológico, plano para o desenvolvimento das ideias de produto selecionadas;
2. Projeto Informacional: especificações de projeto;
3. Projeto Conceitual: alternativas são geradas e avaliadas técnica e economicamente;
4. Projeto Preliminar: configuração da solução selecionada;
5. Projeto Detalhado: detalhes da solução otimizada são finalizados;
6. Preparação da Produção: lote piloto;
7. Lançamento: lançamento do produto no mercado;
8. Validação: os produtos são monitorados no mercado e é feita uma avaliação junto aos usuários.

Como a metodologia permite liberdade para adaptação, Simoni (2008) adotou a proposta de Tsai (2001, *apud* SIMONI, 2008) para as macrofases e fases do PRODIP em um projeto de mecanismos. Essa proposta se adequa ao projeto de produto para um AUV de maneira mais própria, seccionado da seguinte forma:

1. Especificação e Planejamento: Identificação das demandas para o produto como especificações técnicas (requisitos funcionais, tempo, recursos), o que corresponde ao planejamento do projeto e projeto informacional da metodologia de Back *et al.* (2008).
2. Projeto conceitual: geração de alternativas para atender aos requisitos funcionais e a escolha do melhor projeto funcional para a elaboração do projeto detalhado, equivalente aos projeto conceitual e projeto preliminar na metodologia de Back *et al.* (2008).
3. Projeto do produto: são desenvolvidas a análise e a otimização do conceito, quando são considerados a função, a forma, os materiais e os métodos de produção e, finalmente a entrada em produção. Corresponde às fases de projeto detalhado, preparação da produção, lançamento e validação do produto na metodologia de Back *et al.* (2008).

O modelo a ser adotado para o desenvolvimento do projeto do produto AUV para inspeção em águas rasas usará como referência os trabalhos citados nesta seção, assunto que voltará a ser tratado no capítulo 4, quando será introduzida uma proposta para um AUV com seu conjunto de sensores próprios para as tarefas designadas.

2.2 SLAM e Localização

- **SLAM**

SLAM é o acrônimo em inglês para *Simultaneous Localization And Mapping* (Localização e Mapeamento Simultâneos, em tradução livre), que sintetiza a técnica de processamento de dados que alia a tarefa de inspecionar com a tarefa de navegar. Ou seja, os dados colhidos pelos sensores do veículo lhe permitem tanto identificar o ambiente em que se encontra e seguir o caminho planejado ao mesmo tempo em que coleta dados do objeto de seu monitoramento e registra os dados de acordo com sua posição.

Van Middlesworth *et al.* (2015), Kim e Eustice (2009), Reeves *et al.* (2014) e Scaradozzi, Rossie Zubčić (2011) são autores que apresentam técnicas de SLAM aplicadas à inspeção usualmente realizada por veículos subaquáticos. Reeves *et al.* (2014) trabalharam com sensores acústicos capazes de recriar o ambiente em três dimensões (propuseram uma evolução para sensores a laser), enquanto Scaradozzi, Rossim e Zubčić (2011) trabalharam tanto com coleta de dados acústicos quanto visuais. É possível, portanto, entender que para o SLAM a natureza do dado pode variar e mesmo a precisão da posição calculada depende muito dos dados levantados em diversos pontos (no mínimo 3) e não apenas da precisão de um único ponto. Burguera, Bonin-Font e Oliver (2015) puderam medir o erro de posicionamento com o uso de sensores visuais. Sun, Yu e Xu (2013) sugerem o uso de marcos autossimilares como ponto de marcação visual para auxílio na localização.

Espera-se que a aplicação do SLAM proporcione uma navegação autônoma através do reconhecimento do ambiente e do caminho a ser seguido e criação de mapa com dados do ambiente.

Diversos sensores podem contribuir para o uso da técnica e para aprimorar a precisão da localização do veículo subaquático. Alguns citados neste trabalho, como:

- Câmeras;
- Sonares;
- Sensores a laser,
- Magnetômetro.

Outras soluções são adotadas na implantação ou no aprimoramento dessa técnica, como:

- Marcos de trajetória: elementos do próprio equipamento ou adicionados com o propósito de servirem como pontos de referência do curso do veículo. Eles são incluídos nos mapas dos ambientes através de padrões de reconhecimento;
- Magnetos: ímãs permanentes que sejam detectáveis por instrumentos de inspeção, tais como magnetômetros;
- Transponder: emissores ativos de sinais para detecção pelos sistemas do veículo, que podem ser visuais ou acústicos.

O SLAM demanda processamento embarcado dos sinais lidos e seu cruzamento com dados previamente conhecidos, como mapas, trajetórias e pontos de referência.

É importante a formação de banco de dados compacto e de rápido acesso para ser utilizado pelo processador a bordo do veículo. Tal banco

de dados, além de informações sobre traçado e relevo, deve envolver padrões de reconhecimento (também conhecidos como *templates*) dos pontos de referência ao longo do caminho. Os elementos encontrados pelo veículo em seu deslocamento são comparados aos padrões, quando o resultado for positivo, tal padrão fornecerá dados de localização, que também devem estar marcados no mapa.

Quando navegando às escuras (sem acesso a sistemas de comunicação ou de posicionamento global, como GPS), o veículo deve ser capaz de executar cálculos de integração a partir de dados diferenciais de posição, velocidade, aceleração, profundidade, distância para o fundo e orientação do veículo. Ao se integrar tais dados, a posição relativa é determinada em relação ao último ponto conhecido de navegação.

Van Middlesworth *et al.* (2015) apresentam uma técnica para melhorar o mapeamento de ambientes subaquáticos complexos. AUVs podem contribuir na criação de mapas em três dimensões (3D) de ambientes usando um sonar de alta frequência. No entanto, a qualidade dos mapas é limitada devido a erros no sistema de navegação do veículo. Os autores desenvolveram uma técnica para localização e mapeamento simultâneos (SLAM) alinhando nuvens de pontos coletados em um intervalo curto de tempo usando o algoritmo da iteração do ponto mais próximo (ICP, acrônimo em inglês para *Iterative Closest Point*). Os submapas criados têm suas bordas suavizadas através da integração de restrições do alinhamento do submapa em um gráfico de posição de seis graus de liberdade, que é otimizado para estimar a trajetória total do veículo na duração da tarefa de inspeção.

Kim e Eustice (2009) discutem o uso do *Cramer Rao Lower Bound* (CRLB) como uma ferramenta de planejamento de trajetória para AUVs com navegação por imagens. CRLB, também chamada de desigualdade da informação, é um método estatístico para verificar se um determinado estimador (base estatística em que se assume que um valor está contido em um espaço paramétrico) é ou não eficiente. Inicialmente é discutida a informação de Fisher¹ como uma medida para limite inferior da incerteza em um gráfico de posição SLAM. Acerca da trajetória do AUV como um

¹ Informação de Fisher é a esperança matemática do gradiente quadrado da probabilidade logarítmica avaliada em parâmetros reais. É uma maneira de medir a quantidade de informação que uma variável aleatória observável carrega sobre um parâmetro desconhecido em uma modelo de distribuição de um valor. É um método para medir a precisão da amostra estatística.

parâmetro não aleatório, a informação Fisher é derivada do CRLB e depende somente da geometria do caminho e ruído do sensor. Os efeitos da trajetória nos parâmetros de projeto são avaliados pelo cálculo do CRLB com diferentes parâmetros. Parâmetros de pesquisa otimizados são selecionados para melhorar a taxa de cobertura total com uma precisão de localização aceitável para um número fixo de amostras. A utilidade do CRLB como uma ferramenta de projeto em um pré-planejamento de uma pesquisa com AUV é demonstrada usando dados sintéticos. Na demonstração a inspeção aprimorada com o CRLB é comparada ao de uma inspeção real do casco do navio USS Saratoga. A inspeção é avaliada pela medida da área de cobertura total e a precisão da localização CRLB para um número fixo de nós no gráfico.

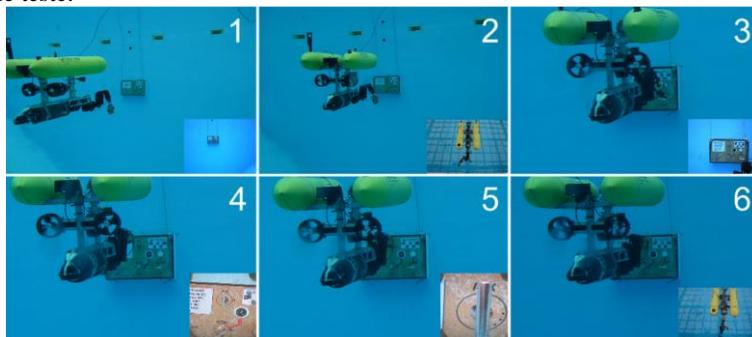
Burguera, Bonin-Font e Oliver (2015) apresentam um sistema de localização baseado em visão para AUVs com limitação computacional e de sensores, como alternativa ao algoritmo já consolidado, EKF²-SLAM (*Extended Kalman Filter for Simultaneous Localization and Mapping*). A posição do veículo pode ser estimada com o uso de sensores inerciais (como giroscópios e acelerômetros), uso de odometria com controle via câmeras ou sensores acústicos, e ainda a combinação de sensores inerciais e odômetros, utilizando filtros de navegação para relacionar os dados (filtros como o EKF). A posição do veículo é estimada com o uso do EKF, que prevê o movimento pelo odômetro visual com correção através do uso de associações de dados entre o estado atual e o anterior. O método de registro de imagens é uma etapa muito importante, pois reforça a associação de dados. O uso de EKF iterativo (IEKF) corrige erros de linearização. Experimentos conduzidos em ambientes subaquáticos mostram resultados satisfatórios, com erros pequenos de posição e na trajetória. Os autores consideram que a matéria suspensa no meio aquático pode criar problemas para dados visuais pois podem ser interpretados como parte de uma estrutura.

Ridao *et al.* (2015) assertam sobre a aplicação de AUVs capazes de efetuar intervenções, além de inspeções, em substituição de equipes humanas ou ROVs. No trabalho há uma análise de projetos que são marcos do estado da arte: ALIVE, SAUVIM e GIRONA 500, e a arquitetura de *software* deste último é apresentada. Alguns exemplos práticos são relatados, como o acionamento de uma válvula e a

² *Kalman Filter* é um algoritmo que usa dados medidos com ruídos estatísticos e produz estimativa mais precisa que a própria medição em si. *Extended Kalman Filter* é a extensão do algoritmo para sistemas não lineares.

manipulação de uma conexão, o acionamento de uma válvula de flutuação livre e recuperação de objeto. O Girona 500 é capaz de reconhecer visualmente os padrões como de um painel no qual deve realizar manobras de teste (Figura 10). O IAUV também é capaz de utilizar uma plataforma de docagem, como ilustrado na Figura 11.

Figura 10 - Localização de painel baseada em visão e realização de sequências de teste.



Fonte: Ridao *et al.* (2015).

Figura 11 - Sequência de docagem do Girona 500.



Fonte: Ridao *et al.* (2015).

• GEOPOSICIONAMENTO

O geoposicionamento pressupõe um sistema que pode fornecer localização precisa aos registros feitos pelo serviço de inspeção, através do uso de unidade de recepção de sinal do *Global Positioning System* (GPS, em tradução livre Sistema de Posicionamento Global) e cálculos de posição relativa. Para UUVs, a técnica mais comum adotada é mais conhecida como DGPS, ou *Differential Global Positioning System* (Sistema de Posicionamento Global Diferencial, em tradução livre), pois o ambiente subaquático não é acessível para o sinal eletromagnético da tecnologia GPS (o sinal desta não é capaz de adentrar ao meio aquoso). O cálculo diferencial então é feito adotando um ponto com posição absoluta conhecida como referência e calculando a posição relativa entre esse ponto e a posição real do veículo, levando em consideração dados

medidos pelo sistema de inspeção presente no veículo e por dados de orientação e deslocamento do próprio veículo, como arfagem (*pitch*, rotação em torno do eixo Y), rolagem (*roll*, rotação em torno do eixo X), guinada (*yaw*, rotação em torno do eixo Z), velocidade e profundidade.

Após cálculos realizados, o veículo será capaz de se localizar com o grau de incerteza relativo à técnica utilizada. Quanto maior a distância percorrida ou o tempo afastado de um sistema de localização absoluta, o erro tende a aumentar.

A informação sobre a posição é determinante pois a ela se relacionam de maneira intrínseca os dados coletados, além de orientar o próprio veículo em sua trajetória.

- GPS

NAVigation Satellite And Ranging Global Positioning System cuja abreviatura é NAVSTAR GPS, mais popularmente conhecido como GPS, é um sistema de posicionamento absoluto em 3 dimensões, baseado em satélites orbitais artificiais que enviam sinais rádio para os receptores na terra. O sistema foi criado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América e é atualmente administrado em colaboração com o Departamento de Comércio daquele país.

Esse sistema se utiliza de unidades receptoras móveis para a leitura de sinal eletromagnético enviado pelos satélites componentes da rede. As unidades são capazes de calcular sua posição aproximada a partir dos dados. A precisão depende da capacidade de recepção dos sinais nos receptores, da quantidade de sinais de diferentes satélites recebida e da capacidade de cálculo do próprio receptor.

Receptores de medição do código C/A são os mais simples, com erro de posicionamento de até 30m.

Receptores de código P e dupla frequência podem adquirir todas as partes do sinal emitido pelo NAVSTAR GPS (L1, L2, C/A, P), e calcular sua posição com erros de 5 a 15m.

Usar um sistema de referências universal é necessário para que os dados gravados possam ser lidos posteriormente sem erros de interpretação. O georeferenciamento se baseia em um modelo geodésico para correção da posição conhecido como *datum*.

Datum é um Sistema Geodésico de Referência definido por uma superfície de referência posicionada e fixa no espaço, gerado por uma rede compensada de pontos (OHI, 2005). O OHI (1994) define um Datum geodésico como “conjunto de parâmetros especificando a superfície de referência ou o sistema de coordenadas de referência usado para controle geodésico na determinação de coordenadas de pontos da superfície

terrestre; são vulgarmente definidos separadamente como horizontal e vertical”. O *datum* SAD69 era o sistema de referência geodésico para a América do Sul até 25 de fevereiro de 2015 (IBGE, 2017). Atualmente o sistema geodésico utilizado para a região é o SIRGAS2000.

WGS84 é o acrônimo para “World Geodesic System 1984” (Sistema Geodésico Mundial 1984, em tradução livre) e define o sistema como geodésico e universal em 1984. É um sistema de eixos cartesiano OXYZ com origem no centro de massa convencional da Terra e o eixo dos ZZ dirigido para o Pólo Norte terrestre convencional (CTP Pólo Terrestre Convencional), em 1984 pelo IERS (*International Earth Rotation System*, antigo BIH, *Bureau International de l’Heure*). O eixo dos XX é a linha de intersecção do plano meridiano origem que passa por Greenwich, definido pelo IERS em 1984, e o plano equatorial referente ao CTP. O eixo dos YY é estabelecido no plano equatorial 90° a este do eixo dos XX. A origem das coordenadas e dos eixos coincidem com o centro de massa da Terra e os eixos do elipsóide são coincidentes com os do sistema (elipsóide bi-axial, WGS84 geocêntrico), o eixo dos ZZ é o eixo de simetria (OHI, 2005). Esse é o sistema de coordenadas utilizado pelo GPS e é o mesmo lido nos seus receptores.

- DGPS

Devido à grande atenuação em ambiente aquático do sinal eletromagnético gerado por um satélite de localização, o uso da tecnologia GPS nesse meio precisa de técnicas auxiliares, tais como DGPS.

Com o DGPS as correções diferenciais de posição são calculadas por uma estação de referência com coordenadas conhecidas, e são aplicadas à posição absoluta de um receptor. Os cálculos são executados com dados medidos pelo próprio veículo, como ângulos de orientação, tempo de resposta de sinal de comunicação e ângulo de incidência. Até 10km, a precisão pode ser de centímetros (AMMAR 2017).

Para um veículo subaquático, a medição da posição é feita em relação a um ponto de referência na superfície, e a o Delta x y z entre o veículo e esse ponto de referência permite que se conheça a posição relativa do veículo.

- Ponto isolado (*Stand Alone*)

Navegação em Ponto Isolado (frequentemente citada como *Stand Alone*) é a determinação da posição absoluta de um único ponto utilizando a distância estimada a partir da integração dos dados de posição do veículo. É utilizado quando não há detecção de um referencial de

localização ou não há comunicação possível para determiná-la, dessa forma o veículo deve operar de maneira isolada e determinar sua posição com os dados que possui ou que pode medir. Exige o processamento contínuo desses dados para a manutenção da trajetória. Se utiliza de técnicas como SLAM, DVL, LBL, SBL e USBL para manter o registro de posição enquanto o sinal de GPS ou a comunicação com a estação de DGPS é perdida.

- Infraestrutura

O uso da tecnologia de GPS demanda uma infraestrutura robusta, visto que, além dos receptores de sinais, é necessário garantir a comunicação entre o veículo e a estação de referência, que pode ser um ponto flutuante sobre a água ou mesmo um ponto conhecido em terra.

O próprio veículo pode funcionar como estação de referência quando necessário, bastando para tal que a antena do receptor de sinal de GPS acesse a superfície da água de modo a estar acessível ao sistema. Em uma programação de trajetória, esses processos de emersão para coleta de dados de posição absoluta podem ser previstos. Enquanto o veículo navega sob a água, sua navegação de basearia em SLAM ou determinação por Ponto Isolado. Ao emergir, o veículo tem a oportunidade de corrigir seus cálculos e reiniciar um novo cálculo de posicionamento a partir dessa nova referência. De modo a melhorar o alcance do sinal, o veículo pode contar com uma antena na parte superior do veículo. A posição do receptor não é importante, uma vez que a antena esteja posicionada convenientemente.

A depender do receptor a ser utilizado no veículo e da estratégia de cálculo de posição adotada, a precisão com o uso de GPS é estimada entre 5 e 30 metros.

O AUV precisa ser capaz de navegar com precisão localmente, mas também precisará se localizar globalmente, sobretudo quando sua tarefa for de localizar ou identificar defeitos. Os dados de posição são muito importantes para a referência geográfica dos dados coletados, além da própria orientação do veículo para executar suas tarefas, manutenção e correção de trajetória e, ao atingir os parâmetros predefinidos, retornar à origem. O processamento, portanto, deve ser contínuo, mas de baixa complexidade.

Vestgard *et al.* (2001) propuseram o uso de DGPS para a localização do AUV Hugin 3000, com o uso de embarcações na superfície da água.

Dentre as vantagens para o emprego do geoposicionamento:

- Localização absoluta com erro pequeno;
- Permite cálculo de posição relativa;
- Velocidade de captação de dados;
- Baixo uso de energia;
- Apresenta grande vantagem sobre método não robotizado atual, que usa geolocalização através de barcos na superfície e mergulhadores com uma referência física.

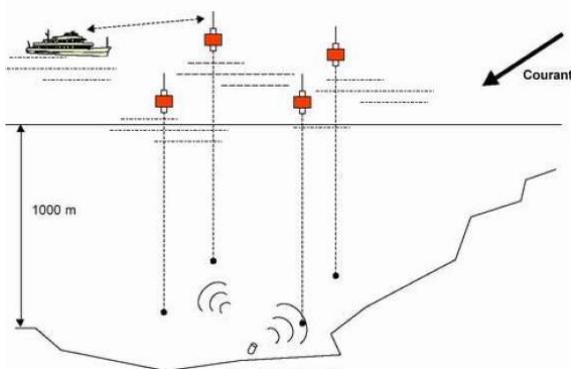
Dentre as desvantagens:

- Inacessível abaixo da superfície da água;
- Necessária antena;
- Erros de localização relevantes, principalmente para a cobertura de equipamentos menores que o erro;

• TRANSPONDER

Transponders são emissores de sinais que podem ser programados para enviar dados sobre localização. Esses emissores teriam sua localização absoluta conhecida, portanto serviriam como marcos de localização. Se forem fixos, assume-se que sua localização não sofre alteração. Se forem removíveis, sua posição deve ser atualizada para cada missão.

Figura 12 - Princípio de localização com transponder.



Fonte: Streeksoff (2011).

O resultado esperado é o fornecimento de dados de localização para o veículo de modo a que ele possa se localizar em regiões onde não haja alcance para o sinal do GPS. Na Figura 12 o transponder se encontra no solo subaquático emitindo sinais, que são detectados por sensores, no caso da figura são representados hidrofones.

A precisão envolvida afeta a posição do veículo, que passa a ser de centímetros, devido à capacidade de correção.

Para uso em terra, esses equipamentos usam normalmente sinais de rádio para sua comunicação. Devido à dificuldade que a água oferece às ondas eletromagnéticas de rádio (de 3kHz a 3000GHz), a alternativa mais apropriada para o meio aquático são ondas acústicas, com alcance de até 160m. Da mesma forma, o veículo precisa portar o receptor de sinais acústicos e a capacidade de interpretá-los. Essa é a técnica utilizada para o LBL, SBL e USBL. O veículo pode ser equipado com câmeras e o *transponder* pode emitir sinais de luzes ou laser com efeito similar ao sinal acústico.

Essa técnica exige uma pré-arranjo dos *transponders* antecipadamente ao uso do UUV, pois eles seriam os guias tanto para o planejamento da trajetória, quanto para o controle dela. Os *transponders* precisam de alimentação elétrica suficiente para o tempo de corrida e para sua localização e recuperação posterior.

Dentre as vantagens do uso dos *transponders* estão:

- Localização mais precisa da trajetória;
- Menor necessidade de processamento de posição.

Dentre desvantagens estão:

- Arranjo prévio dos equipamentos e sua recuperação posterior;
- Necessidade de equipar o veículo com receptor de sinais de ultrassom ou visual.

2.3 Tecnologias de inspeção subaquáticas

Existem no mercado hoje diversas tecnologias e técnicas na área de inspeção submarina que podem ser adaptadas para uso em veículos subaquáticos e que são adequadas aos serviços previstos para estruturas subaquáticas. Essas técnicas e ferramentas buscadas em referências bibliográficas e junto a fornecedores são apresentadas, sendo que algumas delas já se encontram presentes em veículos subaquáticos, sobretudo naqueles mais robustos, como, por exemplo, no AUV REMUS, apresentado por Hagen (2014), desenvolvido para serviços de grande envergadura, como em grandes profundidades.

Sørensen e Ludvigsen (2015) apresentam um conceito de mapeamento e monitoramento ambiental integrado (IEMM, do inglês *Integrated Environmental Mapping and Monitoring*), proposto originalmente por Nilssen *et al.* (2015 *apud* SØRENSEN e Ludvigsen, 2015), que descreve etapas de um sistema, desde definição de inspeções

preliminares até à seleção de parâmetros, sensores e plataformas, aquisição e armazenamento de dados, sua análise e interpretação para tomada de decisão confiável. Esse conceito é baseado em duas premissas:

- A qualidade da interpretação dos dados é dependente da resolução espacial e temporal e da cobertura;
- Essa resolução pode variar, a depender do propósito da missão.

Considerando essa proposta, a seleção de sensores estará diretamente ligada ao objetivo que o veículo terá e à capacidade que o sensor em si terá de coleta de dados (levando em conta o resultado esperado). A Tabela 4 exemplifica a importância da escolha do meio de inspeção ou monitoramento considerando a aplicação a que se destina – processos que têm sua evolução medidas em grandes unidades de tempo não fazem uso de sensores com sensibilidade para identificar mudanças de curto intervalo de tempo; a negativa também é verdadeira. A escala do processo define a precisão sensor e a tolerância para a navegação requeridos.

Tabela 4 - Constantes de tempo de processos medidos X instrumentos.

Processo	Imagem ótica	Sonar	Magnetômetro	ADCP	Refletância ótica	CTD
Arqueologia	10 – 100 anos	10 – 100 anos				
Geologia	10 – 1M anos	10 – 1M anos	10 – 1M anos			
Operações Industriais	Segundos – Anos		Anos			
Biologia	Segundos – Anos			Segundos – Anos	Horas – Anos	
Oceanografia				Horas – Anos	Horas – Anos	Horas

Fonte Sørensen e Ludvigsen (2015).

Dentre os diversos meios de inspeção utilizados pela indústria e disponíveis no mercado, muitos foram identificados durante a revisão bibliográfica que inclui algumas tecnologias conhecidas e de uso aplicável para a tarefa em questão. O resultado dessa seleção é apresentado nesta seção.

Tratando especificamente de dutos submarinos, Nasr *et al.* (2013) relaciona como necessidades para inspeção o seguinte:

- Navegação subaquática;
- Inspeção visual;

- Inspeção por sonar;
- Avaliação de danos;
- Identificação de detritos;
- Detalhes construtivos dos dutos;
- Rastreamento de dutos encobertos;
- Detecção de vãos livres e medição;
- Condições do leito subaquático;
- Monitoramento de flambagem;
- Detecção de movimentação do duto;
- Monitoramento de corrosão e
- Relatórios técnicos.

Sua abordagem é de que esses requerimentos definem o que o panorama atual de inspeção com o uso de UUVs busca, e sua pesquisa é direcionada a empresas petrolíferas.

A escolha de uso dos sensores durante a navegação é tarefa importante, uma vez que cada dado coletado só tem importância quando relacionado intrinsecamente a um ponto do ambiente monitorado, esse ponto precisa ser localizado posteriormente quando for necessário. Além disso, vários sensores precisam de proximidade com o objeto monitorado para que possam coletar dados de qualidade. O uso de sensores para a navegação é parte integrante do planejamento da trajetória, e, para tal, estratégias como SLAM foram citadas em diversas fontes.

2.4 Classificação de sensores

Sørensen e Ludvigsen (2015) propuseram uma separação entre os sensores para veículos subaquáticos em dois principais grupos:

- Sensores de serviço ou carga (*payload*, em tradução livre do inglês): unidades de medição para coletar dados tanto por sensoriamento remoto quanto por medição direta. Nesses casos, o objetivo da plataforma é de posicionar o sensor ou instrumento em um local específico. Projetos com maior autonomia demandarão que esses sensores não sejam mais passivos, pois os dados coletados terão uso no planejamento da missão, orientação e otimização das operações da missão do veículo.
- Sensores de navegação: São instrumentos ligados à navegação do veículo e seu controle de trajeto. Não têm como alvo primário a coleta de dados objetivo da missão,

mas são essenciais para estes sejam atingidos à medida que orientam o veículo à sua localização.

Nesta seção o propósito é apresentar as diversas soluções de sensoriamento e técnicas encontradas na bibliografia, que são divididas como apresentado a seguir:

1. Grupo de sensores de carga ou serviço:
 - CTD;
 - Câmeras, inclusa interferometria;
 - Laser;
 - Acústica, inclusos SVL, ADCP, SBP, SAS e ecobatimetria;
 - Sismologia de reflexão;
 - Magnetometria;
 - Coleta de dados do sistema de proteção catódica.

2. Grupo de sensores de navegação:
 - Pressão;
 - Direcionais;
 - Inerciais;
 - Acústica, inclusos LBL, SBL, USBL e DVL;
 - GPS e cálculo de posição;
 - Transponder.

A divisão entre sensores de carga e sensores de navegação é mais metodológica do que prática, uma vez que, por exemplo, o SLAM emprega sensores de carga para navegação. Essa classificação, no entanto, é útil no planejamento das tarefas dentro de um projeto de veículo subaquático.

- **CTD**

Alguns sensores medem as condições ambientais da água, como condutividade, temperatura, turbidez, profundidade etc. Sørensen e Ludvigsen (2015) se referem a esses como sensores CTD (do inglês *Conductivity, temperature and depth*), e fornecem dados necessários para cálculos de diversas propriedades da água, como concentração de sal, massa específica e velocidade do som, essencial para o uso de sonares. São, portanto, suplementares para o uso de outros sensores.

- **PRESSÃO**

Sensores de navegação como o de pressão determinam a profundidade com alta precisão, a partir do conhecimento da massa específica da água à temperatura medida (SØRENSEN e LUDVIGSEN, 2015). Esses dispositivos são compactos e utilizam baixa quantidade de energia.

- **TURBIDEZ**

Sensores de turbidez são importantes para medir a qualidade da água, pois é capaz de perceber as matérias suspensas no meio, que pode ser de origem orgânica, muitas vezes causadas pela alta proliferação da vida aquática ou despejo de dejetos, ou matéria inorgânica, causada pela agitação da água ou por contaminação externa. A medida utilizada é o NTU, utilizada para monitoramento da saúde do ecossistema.

- **SENSORES DIRECIONAIS**

Sensores direcionais fazem parte dos sensores de navegação que atendem à necessidade do veículo de controlar sua trajetória, medindo tanto a orientação em torno do eixo vertical principalmente com o uso de 3 métodos: rotação da terra, campo magnético terrestre e a posição relativa entre dois ou mais pontos, sendo este último o mais comum para trabalhos subaquáticos (SØRENSEN e LUDVIGSEN, 2015).

- **SENSORES INERCIAIS**

Sensores inerciais são a base para o sistema de navegação em Ponto Isolado (SØRENSEN e LUDVIGSEN, 2015). Integrando dados de aceleração e das taxas de mudança de ângulos de orientação no tempo é possível estimar a posição, ângulos de orientação, velocidade e aceleração. A componente de erro do sistema inercial causa erros progressivos no desvio de curso que podem ser limitados com o uso de DVL, sensores de pressão e acústicos e, eventualmente, GPS.

- **SENSORES VISUAIS**

O objetivo da inspeção visual é ter acesso visual dos equipamentos objeto de estudo e poder identificar defeitos até o grau de resolução disponível, quer seja do dispositivo de captura de imagens ou o olho nu.

Câmeras de vídeo geram imagens óticas do leito e do meio subaquático. São fonte de informação qualitativa (SØRENSEN e LUDVIGSEN, 2015) e potencialmente quantitativa (ARNONE, WOOD e GOULD, 2004) de alta resolução sobre formato, cor e textura. É o

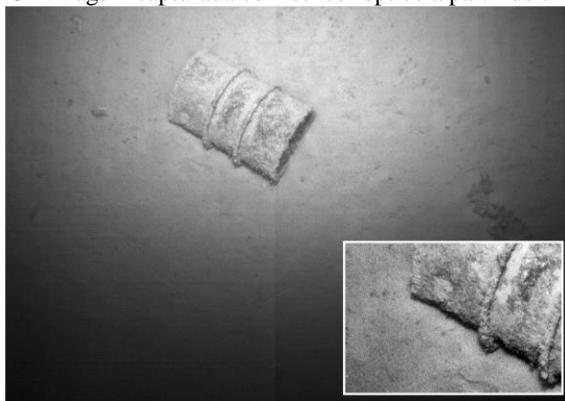
método mais confiável para identificar objetos no leito subaquático. No entanto, obter dados quantitativos a partir de imagens é um desafio. A visibilidade também limita o alcance. São usadas para observar processos como condições geológicas ou arqueológicas e comportamentos biológicos.

Imagem hiperespectral subaquática (UHI, do inglês *Underwater Hyperspectral Imaging*) é uma tecnologia com possibilidade de processamento rápido para a identificação de objetos de interesse. Utiliza dados fornecidos pelas cores da imagem, em todas os comprimentos de onda da luz visível, que podem ser quantificados (JOHNSEN *et al.*, 2013, *apud* SØRENSEN e LUDVIGSEN, 2015). Ao medir seu espectro total, a absorção da luz pelo leito subaquático e pela água pode ser quantificada e caracterizada através do conhecimento da distribuição espectral da luz aplicada. Muitas substâncias podem ser caracterizadas pelo espectro de reflexão. Hollinger, Mitra e Sukhatme (2017) propuseram um arcabouço teórico para ajudar na formulação de algoritmos de reconhecimento de padrões para a automatização de inspeções subaquáticas.

Dispersão ótica e atenuação de sinal podem ser usadas para caracterização da água com o uso de fluorímetros, sensores de turbidez e de dispersão. Condições biológicas e químicas, concentração de oxigênio e saturação podem ser medidas por um sensor ótico.

O resultado esperado para a inspeção visual é a identificação local de defeitos ou da ausência desses e criação de relatórios, registro e transmissão de imagens.

Figura 13 - Imagem capturada com sensor óptico a partir de um AUV.



Fonte: Hagen (2016).

Para o olho nu, não há precisão esperada, mas é estimado que tenha 576 megapixels (DPREVIEW, 2017). Para equipamentos de captura de imagens, a precisão dependerá da resolução (normalmente medida em pixels). As resoluções são, sobretudo, determinadas pelos sensores óticos da câmera.

O alcance dessa técnica depende diretamente da qualidade visual da água, pois tanto o olho nu quanto equipamentos de imagens dependem da luz que é refletida pelo objeto de estudo. A distância focal das lentes é outro fator determinante para o alcance.

Os métodos de investigação visuais por meio de uma plataforma subaquática se apresentam como substitutivos diretos ao uso de mergulhadores nas tarefas de inspeção.

Scaradozzi, Rossi e Zubcić (2011), Bingham *et al.* (2010) e Galceran e Carreras (2013) apresentam aplicações em que veículos subaquáticos são capazes de gerar imagens com o intuito de inspeção. Em ambientes onde é possível, o emprego de imagens é altamente desejável, pois pode diminuir a frequência do uso de mergulhadores em tarefas de simples inspeção, além de serem equipamentos de custo mais baixo e que permitem, em certos casos, uma resposta mais rápida.

Reeves *et al.* (2014) propõem o uso de sensores a laser, que podem tanto melhorar a precisão das inspeções como aumentar a qualidade das imagens geradas, eventualmente ultrapassando a dificuldade de baixa visibilidade à luz natural.

Jacobi e Karimanzira. (2013) fizeram inclusive testes de campo com reconhecimento de padrões através do uso de imagens. Zhang, Negahdaripour e Li (2016) propuseram uma técnica de tratamento de imagens que tanto reduz seu tamanho, reduzindo a exigência de armazenamento, quanto melhora o reconhecimento dos contornos. Essa técnica é útil para todo o sensoriamento visual. Hurtós *et al.* (2013, 2014) utilizaram sensores visuais para um veículo identificar e seguir os elos de amarras subaquáticas. Eustice, Pizarro e Singh (2008) utiliza câmeras para o SLAM em veículos de teste. Narimani, Nazem e Loueipour (2009) demonstram resultados de como o sensoriamento visual pode reconhecer padrões com sensoriamento visual e uso de modelos matemáticos. Kuhn *et al.* (2015) conseguiram com sucesso utilizar imagens recebidas por um ROV para reconhecer estruturas. Ridao *et al.* (2015) utilizam sensores visuais para que um IAUV navegue e realize tarefas com seus braços robóticos, operando uma bancada de testes. Ortiz *et al.* (2002) utilizaram um sistema baseado na visão para que um ROV pudesse reconhecer e inspecionar cabos subaquáticos.

Na seção 3.4 foi abordado o uso de mergulhadores para o serviço de inspeção submarina que é regido principalmente por duas normas brasileiras, NORMAM 15 (2016) e NORMEG 01 (2016). Grande parte do serviço subaquático realizado por profissionais de mergulho consiste apenas em inspeção ou vistoria do estado dos equipamentos objeto de avaliação, e isso só pode ser feito na sua porção aparente, e também está condicionada a condições visuais da água. Tais condições podem ser passageiras, em locais como a costa norte de Santa Catarina (onde normalmente há uma boa condição visual que pode piorar com a ação das marés ou com a presença de particulados), ou permanentes, como na costa do Rio Grande do Sul (onde a visibilidade subaquática é permanentemente muito limitada). Em condições extremas de visibilidade, caberá aos profissionais executar a inspeção através do tato, o que também só é possível na parte acessível da tubulação e tem cobertura muito limitada quando se compara ao método visual.

Adicionalmente à visão natural dos mergulhadores, equipamentos de captura de imagens e sua respectiva transmissão por cabo são largamente utilizados e, além de servir para registro, também aumentam o alcance e a capacidade de inspeção, na medida em que permitem que análises posteriores possam ser feitas, ou até mesmo simultâneas (no caso de analistas acompanharem as transmissões de imagens). Tais equipamentos também podem aumentar a cobertura da inspeção, assim como diminuir o tempo do mergulho.

Para auxílio à visualização é empregada luz artificial visível e, em casos de utilizar-se receptores específicos (óculos ou câmeras), luz infravermelha ou ultravioleta.

Mesmo com o uso de iluminação auxiliar, a condição da água é determinante para a qualidade das imagens geradas.

Considerando todas as condições até aqui expostas, as imagens são coletadas e os dados precisam necessariamente ser processados por modelos computacionais para identificação de padrões ou por especialistas para que relatórios específicos sejam criados, e esta última, em um veículo autônomo, só será efetuada após as corridas. A atividade de processamento está relacionada a fatores tais como:

- Necessidade de processamento em tempo real;
- Capacidade de processamento embarcada;
- Algoritmo apropriado, dentre outros.

Essa atividade de processamento, cabe ressaltar, demanda energia extra. Ademais capacidade de processamento exige processadores que correspondam à tarefa e velocidade necessárias, o que podem aumentar

tanto peso como dimensões do veículo, e, portanto, também aumentam o consumo de energia.

Por vezes, uma estratégia de trajetória definida adequadamente pode eliminar a necessidade de processamento em tempo real, considerando-se que um pós-processamento seria perfeitamente capaz de atender à demanda.

É necessário também definir uma estratégia para a coleta de dados, pois ela interfere no tamanho da reserva de energia e na capacidade de armazenamento e, por conseguinte, no tempo da missão.

Como qualquer processo de monitoramento ou de coleta de dados, a aquisição de imagens³ consome tanto energia como capacidade de armazenamento. A aquisição contínua (ou a alta frequência), tais como filmagens, onde a frequência normalmente utilizada é de 23 quadros por segundo, exige iluminação e fornecimento de energia contínuos, além de consumir muito a capacidade de armazenamento. Filmagens utilizam resoluções desde muito baixa, como o VGA (resolução de 640x480 pixels), capaz de reproduzir até 256 cores, até as mais usuais atualmente, como HD (1366x768 pixels), Full HD (1920x1080 pixels), Ultra HD ou 4K (3840x4320 pixels) e 8K UHD (7680x4320 pixels).

Contornando o problema de armazenamento⁴ e de processamento, uma opção viável é a diminuição da frequência de imagens adquiridas, de

³ Câmeras são produtos bastante populares atualmente e há uma grande variedade de equipamentos e fornecedores. Câmeras esportivas compactas, com ângulos de abertura de 130° horizontal e 100° vertical, além de alta taxa de recepção de dados (até 120Mb/s), são opções acessíveis para tal aplicação.

As câmeras digitais comerciais utilizam, geralmente, dois tipos de sensores, CMOS e CCD. Câmeras compactas, como de celulares ou de máquinas pequenas, utilizam sensores usualmente CCD, consomem menos energia e podem ser fabricadas em tamanhos diminutos, com a desvantagem de conseguirem um desempenho esperado menor na aquisição da imagem quando comparado à outra tecnologia. Câmeras profissionais ou que possam oferecer alta qualidade de imagem normalmente usam a tecnologia CMOS, o que exige um tamanho de sensor maior, mas permite captar melhor detalhes de objeto ou ambiente, com uma exigência maior de energia. Comparado ao tamanho de um veículo subaquático, a massa do sensor da câmera é algo de baixo impacto, sendo mais relevante, nesse caso, seu consumo de energia. O tamanho do sensor também afeta o tamanho da lente, que são diretamente proporcionais. Os sensores também podem ter tamanhos variados, aqueles que possuem maior área tendem a gerar imagens com maior qualidade.

⁴ Armazenamento em memórias digitais, como cartões SD ou discos rígidos de estado sólido (SSD), são opções confiáveis, de baixo consumo de energia e baixo

maneira a não haver perda de área coberta (em uma relação entre velocidade de deslocamento e cobertura de imagens). Fotografias tendem a ter maiores resoluções em comparação a filmes, para uma mesma configuração de câmera.

Há a possibilidade de se processar as imagens para a navegação automatizada o que, no entanto, exige um processamento rápido. O SLAM alia a tarefa de inspecionar com a tarefa de navegar, os dados colhidos pelos sensores do veículo lhe permitem tanto identificar o ambiente em que se encontra e seguir o caminho planejado ao mesmo tempo em que coleta dados do objeto de seu monitoramento.

O uso de dados visuais é uma forma bastante corriqueira na navegação humana, e depende da identificação de objetos previamente mapeados. São necessários:

- Mapas atualizados e de alta resolução;
- Pontos de fácil identificação;
- Sensores de resolução compatível com os mapas;
- Capacidade de processamento.

A criação de tais mapas depende de percursos executados para coleta de dados com essa finalidade e seu pós-processamento para tornar evidentes os pontos de interesse ou marcos de localização. Portanto, o uso do SLAM necessita de uma estratégia de trajetórias que ajudem a mapear a área a ser inspecionada.

Referindo-se à importância da manutenção da trajetória, variações no movimento do veículo podem atrapalhar na fixação do foco das lentes nos objetos de estudo, para isso câmeras com alta velocidade de ajuste de foco são mais adequadas. O controle de posição do veículo também beneficia o ajuste do foco, o que pode ser difícil devido a ação de forças externas sobre o veículo e a velocidade deste.

Os equipamentos de captura de imagem precisam estar em uma posição vantajosa para cobrir a área de inspeção desejada e não serem encobertos por outras partes do próprio veículo.

Câmeras fixas à frente do veículo têm posição de vantagem, pois podem captar o ambiente avante em tempo de ajustar foco, no entanto perdem a possibilidade de captar imagens abaixo do veículo. Elas estão

peso. No entanto, devido à interação com outras técnicas de inspeção, ou até mesmo campos magnéticos presentes nas regiões por onde o veículo possa transitar, é necessário garantir a integridade dos dados adquiridos, por meio de blindagem de proteção ou por testes que comprovem a ausência desses campos danosos.

mais sujeitas a impactos de objetos estranhos enquanto o conjunto se desloca. Câmeras fixas no corpo, geralmente na parte baixa do veículo, podem captar o ambiente abaixo, mas desse ponto de vista o ajuste de foco fica comprometido devido ao tempo de resposta no movimento das lentes. Uma estratégia de várias corridas, em que uma passagem fornece parâmetros para a seguinte, permitiria a elaboração de um plano de monitoramento em que diferentes áreas possam receber um detalhamento maior, com velocidade de avanço adequada para permitir um melhor ajuste de foco. Essa solução foi adotada por Pagán (2016), que adaptou um suporte à parte externa de um AUV comercial, o Ecomapper, para fixação de uma câmera esportiva convencional (Figura 14).

Figura 14 - AUV Ecomapper com suporte adaptado para câmera externa.



Fonte: Pagán (2016).

Há a alternativa de câmeras pivotantes (Figura 15) que, no entanto, consome mais energia e exige uma instalação elétrica e eletrônica mais complexa do veículo, além de exigir uma autonomia exclusiva na operação da câmera (como alternativa à teleoperação da câmera ou do veículo), e para tal o próprio sistema embarcado do veículo precisaria ser capaz de reconhecer quando deve alterar velocidade e ângulo de apontamento da câmera.

Figura 15 - Câmera pivotante.



Fonte: Albiez *et al.* (2015).

O uso de múltiplas câmeras, apesar do custo energético, é uma alternativa que pode eliminar a necessidade de várias corridas e acelerar o serviço de inspeção. A sobreposição de imagens permite também a geração de imagens em 3 dimensões.

A Figura 30 mostra a iniciativa dos autores Brown, Kim e Eustice (2008) de implantar uma câmera em um veículo que não previa sua presença inicialmente. A ponteira projetada pelos autores pode portar duas lentes, permitindo assim aplicação de interferometria por imagens, além do uso de câmeras comuns.

Há algumas opções comerciais disponíveis de lentes que permitem um ângulo de visão horizontal maior de 130° e vertical de 100° (como referência, o olho humano médio tem abertura de 210° na horizontal e 150° na vertical), viabilizando uma área de cobertura muito vasta, com boa resolução.

Lentes fixas são mais simples e consomem menos energia para focalizar, mas possuem um alcance limitado.

Câmeras de 360° , popularizadas por serviços como o Google Street View (que cobre inclusive áreas subaquáticas oceânicas, tais como baía Tedau, na Malásia, praia Nishibama da ilha Aka, no Japão, a Grande Barreira de Corais da Austrália), dão a possibilidade de varredura em todas as direções, muito útil para a necessidade de identificação de ambientes, sobretudo para criação de mapas e identificação de marcos de localização.

Tanto câmeras de 360° quanto as câmeras de amplo ângulo de visão necessitam se posicionar para além do corpo do veículo, o que pode atrapalhar seu projeto hidrodinâmico.

Um método derivado da fotogrametria aérea pode se mostrar útil para levantamentos subaquáticos. A fotogrametria é uma técnica de levantamento topográfico de uma área através de fotografias tiradas de diferentes pontos de vista (OHI, 2005). Na fotogrametria aérea são geralmente utilizadas câmaras com fotografias nadir (que têm o eixo óptico coincidente com o eixo vertical), o que fornece fotogramas com escala constante caso o terreno for plano bem como permitir a observação estereoscópica.

Hildebrandt e Hilljegerdes (2010) utilizaram câmeras estereoscópicas pivotantes (Figura 16) em seu conceito de AUV, Prosilica GE1900C com conexão Gigabit-Ethernet, com sensores CCD Full-HD da Kodak, campo de visão de 67° na água (101° no ar).

Figura 16 - Câmera estereoscópica com iluminação LED do AUV AVALON.

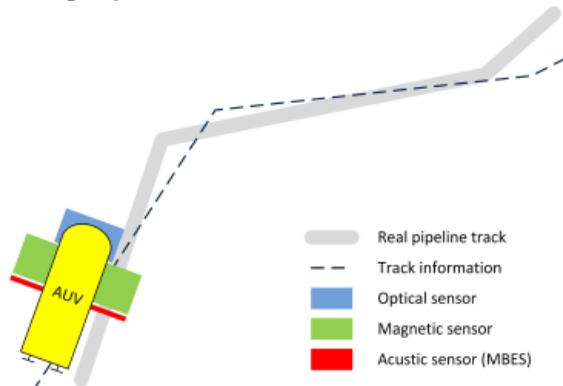


Fonte: Hildebrandt e Hilljegerdes (2010).

Jacobi e Karimanzira (2013) apresentam um sistema robusto e confiável de localização de AUV. O desempenho do sistema desenvolvido foi testado em diferentes dutos e com cenários diversos. O AUV Atlas Maridan utilizado pelos autores foi modelado com sensores como câmeras, ecobatímetros, *Sub-Bottom Profilers* e magnetômetros e seus resultados foram avaliados no atendimento a uma trajetória de acompanhamento do traçado de um objeto em um ambiente controlado. Na Figura 17 é feita uma representação do AUV com seus sensores instalados em diferentes posições do veículo. Essa configuração é importante, sobretudo para sensores que geram ruído e que podem influenciar as leituras de outros sensores, ou para sensores mais sensíveis aos sinais, para que não recebam emissões dos outros sensores. Os dados coletados são integrados por um sistema embarcado de processamento, que determina um traçado para acompanhamento da estrutura, no caso

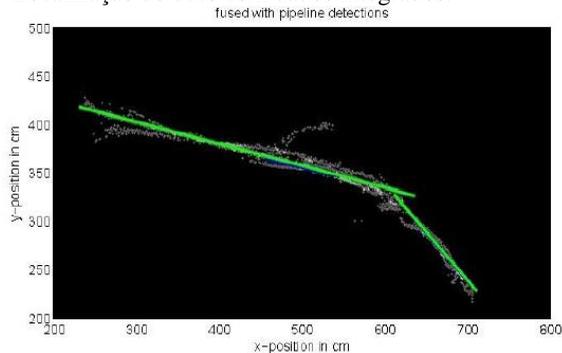
estudado, um tubo de PVC de 160mm de diâmetro. O resultado é visível na Figura 18.

Figura 17 - Configuração de sensores do Atlas Maridan



Fonte: Jacobi e Karimanzira (2013)

Figura 18 - Localização do duto com dados integrados.



Fonte: Jacobi e Karimanzira (2013)

Algumas iniciativas de inspeção subaquática são motivadas por interesses arqueológicos que trazem uma abordagem inovadora para essa tarefa. É comum em pesquisas dessa área que as investigações iniciais precisem localizar os objetos de interesse em uma região esperada sem se saber com precisão sua localização ou seu estado. Além disso, as estruturas buscadas possuem materiais diferentes daqueles utilizados em estruturas modernas, tais como madeira e rocha. Nos últimos dez anos duas autarquias italianas, ISME (*Interuniversity Center of Integrated Systems for the Marine Environment*) e SBAT (*Soprintendenza per i Beni*

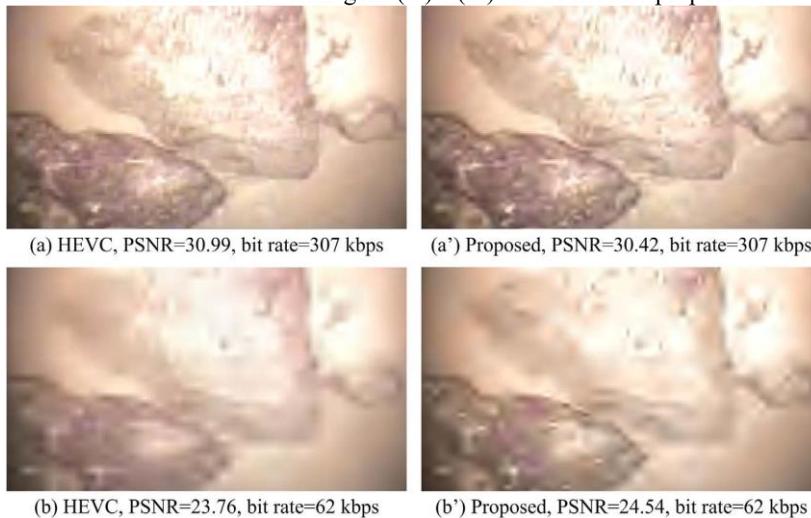
Archeologici di Toscana), tem trabalhado no sentido de automatizar o processo de pesquisa arqueológica. O objetivo é o desenvolvimento de sistemas não invasivos, simples e de baixo custo para obter mapas georreferenciados de sítios de arqueológicos navais. No projeto VENUS, foram desenvolvidas metodologias científicas e ferramentas tecnológicas para a exploração virtual de sítios arqueológicos de grandes profundidades. O projeto melhorou a acessibilidade de sites subaquáticos pela geração de uma exploração virtual 2D e 3D bastante completa.

Scaradozzi, Rossi e Zubčić (2011) apresentam os resultados obtidos pela UNIVPM (*Università Politecnica delle Marche*) ao estudar um sítio arqueológico no arquipélago Komati. Vários mergulhos foram feitos nesse sítio e um programa de sensoriamento remoto usando um AUV e um ROV com câmera foi desenvolvido. Além dessas explorações, várias descobertas foram geolocalizadas e um mapa foi criado, iniciando-se do mosaico fotográfico do fundo do mar. Com esse intuito, componentes tecnológicos diferentes foram desenvolvidos e integrados, incluindo uma câmera para fotogrametria do sítio e um sistema de posicionamento USBL (acústico). A integração entre o posicionamento acústico e as imagens do mosaico no algoritmo de estimação do mergulho foi crucial para o sistema automatizado, sobretudo no desenvolvimento e definição de formatos específicos de dados a serem armazenados, no georreferenciamento da posição estimada e na determinação de características geométricas dos sítios. Os dados de localização facilitarão as operações de escavação, focando o trabalho dos mergulhadores em pontos precisos.

Zhang, Negahdaripour e Li (2016) apresentam o tratamento de imagens, a compressão de vídeos por uma nova técnica baseada em comprimentos de ondas adaptativos e filtros direcionais, que devem atingir alta eficiência e boa qualidade de imagem, o que virá a contribuir para missões de grande duração e economia de espaço de armazenamento. Além disso, o tratamento das imagens simplifica o serviço de reconhecimento de padrões útil para navegação autônoma e localização de pontos de interesse. A transformada ondaleta discreta (ou DWT, acrônimo do inglês *Discrete Wavelet Transform*) é usualmente utilizada para compactação de imagens de vídeos. Os autores propõem uma substituição desse modelo por uma solução baseada na transformada adaptativa híbrida de ondaleta (ou AHWD, acrônimo do inglês *Adaptive Hybrid Wavelets and Directional filter banks*) e bancos de filtros direcionais, que se mostrou capaz de produzir imagens de qualidade com menor sobreposição de dados, maior eficiência de código e baixas taxas de dados (do inglês *bit rate*), quando comparado com a transformada

adaptativa híbrida de Wavelets. A comparação de resultados pode ser vista na Figura 19, onde estão postas as imagens criadas por métodos convencionais como o HVCE (acrônimo do inglês *High Efficiency Video Coding* – Codificação de Vídeo de Alta Eficiência), e as imagens criadas com o modelo proposto AHWD. Para taxas superiores, os resultados são comparáveis (Figura 19 a e Figura 19 a'). Para taxas menores, os resultados de AHWD demonstram contornos mais visíveis (Figura 19 b e Figura 19 b').

Figura 19 - Comparativo entre imagens com razão PSNR⁵ – figuras (a) e (b) utilizam o modelo HEVC e as imagens (a') e (b') são do modelo proposto



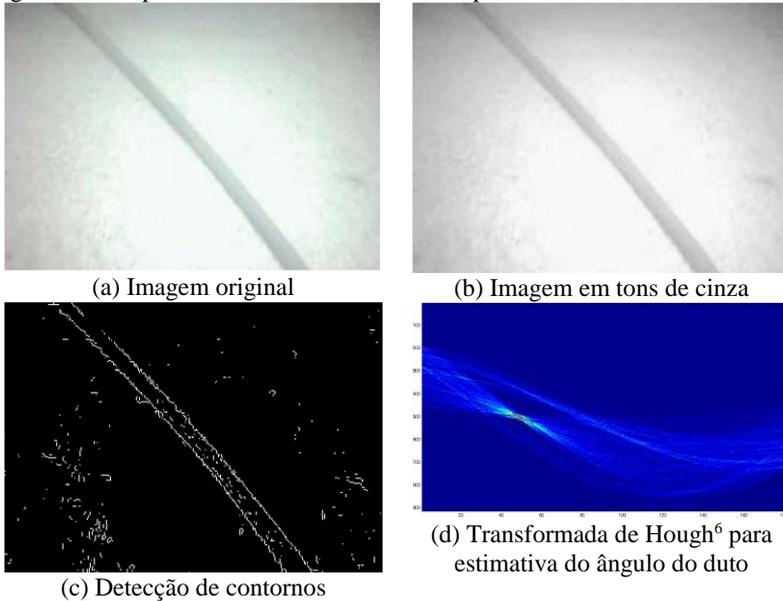
Fonte: Zhang, Negahdaripour e Li (2016)

Narimani, Nazem e Loueipour (2009) publicaram artigo que trata do rastreamento de dutos ou cabos submarinos baseado em sistemas de imagem, utilizados para aumentar a automatização de ROVs, que também detecta obstáculos e possui navegação inteligente. Há um foco no desenvolvimento de algoritmos para processamento de imagens e controle não linear para o rastreamento de estruturas submarinas. Imagens são processadas em tons de cinza e tem os contornos identificados usando transformadas de Hough, permitindo encontrar o ângulo do robô, que é então usado pelo controlador de avanço. O ROV encontra as estruturas

⁵PSNR do inglês Peak Signal-to-Noise Ratio – Razão de Pico Sinal/Ruído

usando o modo de controle de deslizamento adaptativo. O sistema é testado com o uso de um vídeo gravado com várias estruturas submarinas, e são ilustrados parcialmente na Figura 20.

Figura 20 - Etapas de rastreamento dos cabos a partir de sensores visuais



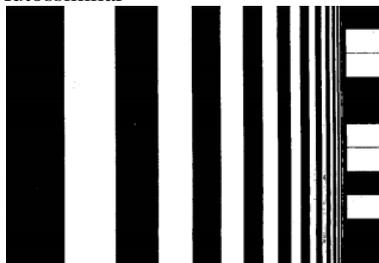
Fonte: Narimani, Nazem e Loueipour (2009)

Os artigos de Sun, Xu e Li (2010) e Sun, Yu e Xu (2013) são revisões bibliográficas sobre uso de tecnologias de imagens para o sistema de controle de AUVs. O controle visual de veículos subaquáticos é um desafio pois, nesse meio, a iluminação não é uniforme e as partículas suspensas são confundidas com ruídos nos modelos baseados em observação. Eles dividem o controle visual subaquático em quatro fases principais, que são aquisição de imagem, pré-processamento, processamento e controle de movimento. Para tratar do problema da iluminação, um método que utiliza iluminação artificial (com 3 lâmpadas halógenas dispostas circularmente) e lentes com filtros compostos foi

⁶ Transformada de Hough é uma ferramenta matemática capaz de relacionar dados próximos de tal modo que possam ser reconhecidos como linhas. A versão parametrizada utilizada no trabalho é $\rho = x_n \cos \theta + y_n \sin \theta$.

usado. Para contornar o problema de dispersão da luz, que causa degradação na imagem, filtros polarizados são empregados. Marcos visuais conhecidos autossimilares (Figura 21) são dispostos ao longo da trajetória para referência e localização. Durante o processamento deve ser dada ênfase em se conseguir iluminação uniforme da imagem e analisar as causas da baixa qualidade das imagens, tanto para sua restauração quanto para atuação em tempo real no sistema de iluminação. Os autores ainda sugerem uma arquitetura de multiprocessadores embarcados com microcontroladores para uma boa performance de trabalho. Inspirados em algoritmos biônicos, sugerem o uso de *Cerebellar Model Articulation Controller* (CMAC) para melhorar a adaptabilidade dos sistemas visuais.

Figura 21 - Marco Autossimilar



Fonte: Briggs *et al.* (2000)

Kuhn. *et al.* (2015) apresentam a implementação de um sistema de controle de posição e orientação de um veículo subaquático empregado em inspeção de estruturas. A abordagem é utilizar sensores de baixo custo na instrumentação, e tornar o robô autônomo. O veículo em questão é um ROV com sensoriamento de profundidade (pressão), giroscópio Sistema Micro Eletro-Mecânico (MEMS, do inglês *Micro Electro-Mechanical System*) e câmera de vídeo (resolução de 640x480 pixels). O ROV foi equipado com processador embarcado para processamento de imagem utilizando a biblioteca OpenCV⁷, e a amostra de resultado pode ser observada na Figura 22. O tempo de processamento dos dados dos sensores ficou abaixo de 100ms. Os autores puderam avaliar os erros entre o posicionamento medido e o real (máximos de 2,5cm para profundidade e 8cm para distância entre ROV e estrutura) apresentados na Figura 23.

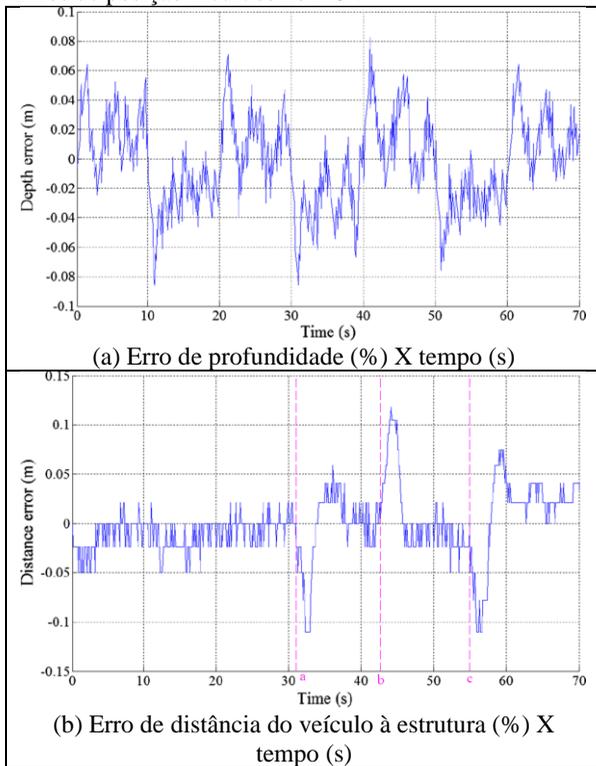
⁷ OpenCV: biblioteca em linguagem de programação computacional C/C++ com algoritmos para reconhecimento de imagens.

Figura 22 - Imagens processadas da estrutura de estudo



Fonte: Kuhn *et al.* (2015)

Figura 23 - Erros de posição medidos no ROV



Fonte: Kuhn *et al.* (2015)

Dentre as vantagens da inspeção visual estão:

- Produto comercial de fácil acesso
- Velocidade de inspeção
- Baixo custo
- Ampla gama de resoluções
- Grande ângulo de abertura
- Diversidade de tecnologias
- Fácil adaptação ao veículo
- SLAM
- Baixo uso de energia
- Compacto
- Baixo peso

Dentre desvantagens da inspeção visual estão:

- Depende das condições de transparência da água
- Depende de iluminação
- O foco pode ser afetado pela variação da posição do veículo por forças externas, prejudicando a coleta de dados;

• **INSPEÇÃO A LASER**

Laser (acrônimo para *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) são feixes concentrados de fótons monocromáticos e colimados (feixes de ondas paralelas). O sistema de inspeção emite sinais conhecidos (características físicas) e lê as respostas do meio. A diferença entre as características dos sinais emitido e recebido é interpretada, tais como intensidade e ângulo, e esses dados permitem o cálculo da posição em três dimensões do ponto de onde o sinal foi refletido.

O objetivo dessa técnica é o mapeamento de estruturas de acesso direto e visível subaquáticas com identificação de detalhes superficiais com dados medidos a partir de emissor e receptor laser atrelado ao veículo através de um feixe planar.

É esperado que se obtenha o mapa visível e quantitativo da superfície visível dos equipamentos e meio subaquáticos. Devido à capacidade do sistema, os dados adquiridos também possuem grandezas como tamanho do objeto e distância entre superfície e receptor.

Devido à precisão da técnica, sua introdução permite o dimensionamento de defeitos superficiais pequenos. Dentro de um raio de alcance curto, a precisão do sistema poderia ser milimétrica (REEVES *et al.*, 2014), porém, considerando o veículo em movimento e a difusão do meio aquoso, a uma distância de até 10m pode-se esperar erros em centésimos de metro.

O alcance dos feixes de laser é bastante limitado ao se comparar às outras técnicas apresentadas neste texto, pois a perda do sinal na água (devido à difusão) é bastante acentuada, e é diretamente influenciada pela presença de massa dispersa na água.

O mapeamento a laser opera com emissão de sinal, eliminando a necessidade de iluminação. No entanto, essa é sua principal limitação, visto que o raio emitido precisa atingir o alvo, ser refletido e, posteriormente, recebido pelo sensor a bordo do veículo e esse trânsito do sinal é diretamente afetado pela turbidez da água. A difusão do laser, que é um feixe de luz de alta intensidade e concentrado, é bastante acentuada na água.

Receptores sensíveis ao laser podem ser menos sensíveis que aquelas que trabalham com luz visível, visto que somente precisam receber um espectro da luz, e o recebe de maneira concentrada.

Tratar e extrair dados relevantes das imagens criadas a partir dessa técnica de inspeção passa a ser valioso para atividades que envolvam emergência, com identificação de vazamento ou defeitos catastróficos de maneira expressa, além de possibilitarem a sua utilização como dados de localização e mapeamento (SLAM). Devido à característica dos dados obtidos, que retornam informação como distância e geometria da região em estudo, o processamento embarcado permite a programação de alertas e repostas para o veículo.

Devido à natureza dos dados coletados, essa técnica é bastante proveitosa para uso de localização de mapeamento, permitindo não somente a localização de marcos de posição como a medição *in loco* da posição relativa do veículo ao ponto de referência.

Para uso do SLAM, e considerando atividades executadas em movimento de cruzeiro, o posicionamento mais propício do sensor é frontal, pois diminui o risco de colisão e aumenta a percepção de obstáculos à frente do veículo. Considerando também objetos localizados abaixo do veículo, a disposição em ângulo (como 45°) melhora a percepção dessa área, além de evitar o direcionamento do feixe para área não úteis. Essa configuração é inclusive apresentada pelos autores Ridao *et al.* (2015).

Sendo um feixe planar, deve-se atentar ao plano preferencial a ser adotado, longitudinal ou axial à direção de deslocamento. Devido ao deslocamento contínuo do veículo, o uso de feixes longitudinais faria somente a varredura de uma linha contínua, portanto, o feixe axial atenderá de maneira mais ampla a área objeto do estudo, além de coletar mais dados.

Feixes contínuos de laser demandam um uso intenso de energia. Uma estratégia de emissões pulsadas e com intervalos que respeitem à resolução desejada podem ser muito propícias na gestão da energia. Assim como para os sensores visuais, a cobertura pode ser planejada de modo a sobrepor imagens à medida em que pulsos são gerados para cobrir a totalidade da área sob inspeção. A estratégia de feixes pulsados também é benéfica quanto à solicitação do armazenamento, pois, com menos dados coletados, a capacidade de memória é reduzida proporcionalmente.

A solução laser também foi utilizada por Hagen (2016), apontados como uma nova geração em precisão, que poderia atingir até a escala de milímetros por Reeves *et al.* (2014)

Dentre as vantagens do sensoriamento a laser estão:

- Precisão dos dados obtidos;
- Sinal emitido com potência elevada;
- Velocidade de inspeção;
- SLAM;
- Baixo peso.

Dentre desvantagens do sensoriamento a laser estão:

- Alto consumo de energia;
- Baixo alcance e cobertura;
- Perda de sinal com a turbidez da água.

• **INTERFEROMETRIA**

A interferometria tem o objetivo de criar mosaicos holográficos digitais a partir de duas imagens refletidas do objeto estudo. Essa composição permite criar um efeito 3D do objeto detalhado. Outra abordagem permite observar alterações na superfície visível, detectando deformações. O sinal pode ser criado a partir de sinais emitidos por laser, ondas eletromagnéticas, micro-ondas ou sonar (para o meio aquático, laser e sonar são as opções mais comuns, já que as micro-ondas são completamente absorvidas pelas moléculas de água e as ondas eletromagnéticas têm grande atenuação nesse ambiente).

Os resultados esperados são varreduras de superfícies visíveis, imagens sucessivas ou filmagens com a cobertura total da área estudada prevista, processamento e criação de mosaicos holográficos.

A técnica tem capacidade de perceber mudanças pequenas, a depender diretamente da qualidade dos dados adquiridos, do contraste da superfície e da distância entre o sensor e a superfície. Considerando um UUV que executa sua inspeção em velocidade de cruzeiro, a turbidez da

água, da capacidade reflexiva das superfícies, pode-se atingir uma precisão milimétrica (REEVES *et al.*, 2014).

Ridao *et al.* (2015), demonstram resultados coletados através do uso de interferometria. Brown, Kim e Eustice (2008) fizeram uma modificação em um veículo comercial para permitir a instalação de duas câmeras em um AUV, de modo a viabilizar a aplicação de interferometria.

A depender da escolha do sinal a ser emitido, o alcance pode ser amplo, e a precisão diminuirá em razão direta à distância entre fonte e objeto. A técnica é utilizada por satélites para mapeamento terrestre, com precisão de 10cm a 50m.

O processamento necessário para os dados de interferometria pode ser executado posteriormente à leitura. Dados necessários para o pós-processamento são todos os que tendem a gerar interferência dos dados medidos, como aqueles referentes à posição e à orientação do veículo, temperatura da água, turbidez e profundidade.

Os padrões interferométricos podem ser correlacionados através de uma das seguintes técnicas:

1. Tempo real – são necessários ao menos um emissor e dois receptores, considerando uma única passagem do veículo pela área monitorada;
2. Tempo médio ou média temporal – pode adotar apenas um receptor e utilizar a mudança no tempo ou na posição para capturar uma segunda resposta, exigindo mais de uma passagem do veículo sobre a área monitorada;
3. Dupla exposição – pode ser executada como a opção 1, com duas câmeras e uma passagem, ou como a opção 2, com uma câmera e duas passagens.

Assim como com as outras técnicas de criação de imagem, é necessário que o emissor esteja sob o corpo do veículo, com um ou dois receptores posicionados da mesma forma, mas distanciados um do outro.

O meio de inspeção a ser escolhido, visual, laser ou acústico, depende do ambiente de trabalho (como condições visuais) e da precisão definida. Inspeções a laser ou visuais são muito influenciados pela turbidez da água, porém são capazes de resultados mais precisos. Meios acústicos perdem em precisão para estes últimos, no entanto têm a capacidade de trabalhar em ambientes turvos e de baixa iluminação (HURTÓS *et al.*, 2013).

Llort-Pujol, Sintès e Lurton (2006) sugerem a interferometria para maior resolução de ecobatimetria a 300kHz. Bahr, Lerch (2008) apresentam trabalho sobre análise da refração da luz como forma de detectar vibrações acústicas e assim identificar perfis. Cranch, Nash e

Kirkendall (2003) sugerem o uso de redes de fibra ótica para sensoriamento interferométrica com ondas acústicas.

Dentre vantagens da interferometria estão:

- Criação de mosaicos 3D detalhados;
- Avaliação estrutural;
- Levantamento prévio;
- Precisão.

Dentre desvantagens estão:

- Consumo de energia;
- Velocidade da inspeção;
- Processamento elaborado;
- Sensível à estabilidade do veículo.

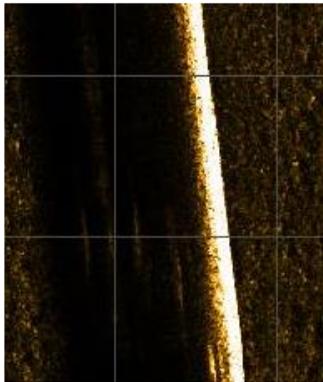
• **SENSORES ACÚSTICOS**

A técnica acústica permite a varredura da superfície visível através de uso de sonares, capturando dados através de diferentes faixas de frequências que são emitidas a partir de uma fonte, então refletidas pelas superfícies monitoradas e captadas posteriormente por um receptor. A escolha das faixas de frequência deve atender à estratégia de inspeção, pois, para cada intervalo, há uma resposta esperada, devido ao comportamento diverso da onda propagada ou refletida pelos meios. Estão incluídos como sensores acústicos Sonar Monofeixe, Sistema Sondador Multifeixe (SMF), geralmente utilizados em ecobatimetria, Sonar de Varredura Lateral (SVL) e o Sonar de Abertura Sintética (SAS).

Jacobson *et al.* (2013) atribuem ao SVL precisão de 5cm. Jacobi e Karimanzira (2013) dissertam sobre algumas vantagens do sensor acústico sobre o sensor laser, como a maior cobertura, porém com a desvantagem de ser menos preciso (precisão de 1mm para laser em comparação a 5cm para sonar).

O resultado esperado são mapas detalhados da cobertura total da área inspecionada, com perfil de estruturas e relevo, tal como o apresentado na Figura 24. Devido à dependência da geometria da fonte, do formato do feixe e da geometria do objeto, podem acontecer áreas de sombra, que são áreas não atingidas diretamente pelo feixe emissor ou sobre as quais a resposta refletida não é capaz de retornar ao receptor.

Figura 24 - Área de sombra com uso de sensores acústicos



Fonte: Hagen (2014)

Os resultados conseguidos a partir da inspeção por sonar têm precisão diretamente influenciada pela frequência do sinal, da capacidade de reflexão da superfície objeto e da distância entre emissor e superfície. Os resultados esperados terão precisão na casa de décimetros (GEORGE *et al.*, 2002, CHURCH *et al.*, 2011).

A precisão é inversamente proporcional ao alcance. A marca resultante é bastante influenciada pela estratégia escolhida, o que envolve escolha de parâmetros sobre o feixe emitido, velocidade de deslocamento, tamanho do objeto esperado etc. OHI (2005) fornece um exemplo para um sonar de 100 kHz: alcance máximo de 270 m para destroços de grande dimensão, improvável a detecção de pequenos objetos (1-2 m) para além dos 120 a 150 m.

Sonares estão ligados às primeiras iniciativas de uso de SLAM. Considerando que esses sensores conseguem identificar marcos em uma área inspecionada, essa facilidade pode ser utilizada para ajudar o veículo em seu controle autônomo de trajetória. Como na tecnologia visual, padrões e mapas precisam ser fornecidos ao sistema para que ele possa interpretar o sinal e reconhecer os pontos possíveis. A estratégia de executar corridas sucessivas, com um grau inicial muito baixo de autonomia, que realize apenas para mapeamento primário para posterior processamento e criação de mapas confiáveis de navegação e padrões de reconhecimento para uso nos veículos subaquáticos. Claramente, o SLAM exige o processamento embarcado dos dados que são adquiridos, portanto, uma vez mapeado o ambiente, o próprio sistema embarcado deverá interpretar os dados em comparação com os mapas armazenados.

O processamento a bordo passa a ser relevante com o uso do SLAM.

Dados que são necessários para o registro são os referentes à posição, absoluta ou relativa, com DGPS ou DVL, temperatura da água, turbidez, pressão e profundidade.

Para o emprego de sinais acústicos é preciso conhecer o estado da água. Uma grandeza de relevância primária à técnica é a velocidade do som na água que varia proporcionalmente à densidade do líquido (que, por sua vez, é função da temperatura), portanto instrumentos CTD são necessários.

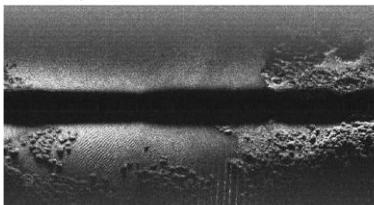
A utilidade dos sinais acústicos permite sua aplicação de diferentes formas. Os sensores podem ser aplicados como sensores de carga ou de navegação (conforme definição apresentada por Sørensen e Ludvigsen, 2015), em diferentes configurações, como apresentado a seguir.

SENSORES DE CARGA

- *Sonar de Varredura Lateral (SVL):*

O sonar de Varredura Lateral (SVL), também conhecido pelos termos em inglês *Side Scan Sonar (SSS)*, é uma versão do sonar desenvolvida para varredura lateral do ambiente ao redor do veículo (Figura 25). Mede a refletância das superfícies sob a água, medindo a intensidade do sinal refletido, assim como tempo de resposta, um mapa subaquático pode ser produzido, assumindo que o fundo subaquático é plano. Consiste de dois canais (bombordo/estibordo) que varrem, cada um, uma lateral do veículo, com um feixe planar. Essa configuração permite que o sonar faça uma varredura do ambiente à medida em que o veículo se desloca.

Figura 25 - Imagem acústica do SVL.



Fonte: Burguera, Bonin-Font e Oliver (2015).

Burguera, Bonin-Font e Oliver (2015) propuseram o uso do SVL para criação de mapas de alta resolução do solo subaquático. Um sistema

envolvendo SVL, DVL, GPS e processamento de dados seria capaz de gerar mapas de alta resolução.

- **ADCP:**

Perfiladores de Corrente Acústica Doppler, tradução livre de *Acoustic Doppler Current Profilers* (ADCP), são usados para medir velocidades de correntes pela medição da dispersão de intensidade e distorção por efeito Doppler da reflexão do sinal acústico, determinando, assim, o perfil em três dimensões do vetor corrente. Tais sensores se prestam ao monitoramento da água, pois o perfil da corrente é dependente das variações de marés, variações climáticas, dentre outros fatores.

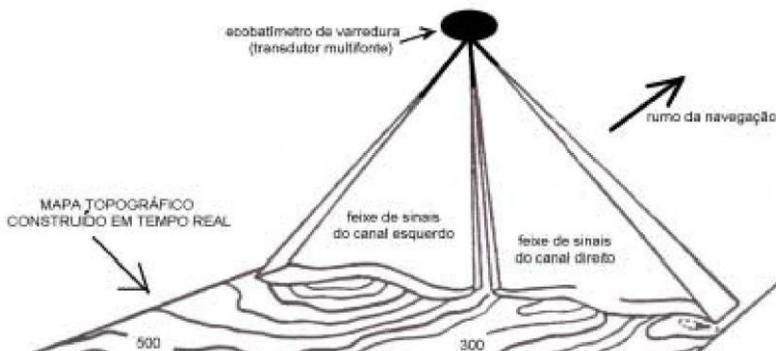
- **Ecobatímetros:**

Ecobatímetros Monofeixes ou Multifeixes transmitem sinais acústicos, com direções conhecidas e suas respostas podem ser usadas para produzir um modelo 3D do ambiente subaquático (Figura 26).

Sistemas de monofeixe ou multifeixes devem ser posicionados na parte inferior do veículo, de modo a apontar para o objeto a ser observado. O posicionamento de sensores frontais é útil para a autonomia do veículo, de modo que o orientam a evitar colisão devido à detecção de obstáculos.

Floriani (2013) sugere que sistemas com capacidade de executar tarefas corriqueiras em alto-mar, principalmente batimetria, são perfeitamente adaptáveis em veículos subaquáticos. Toda a tarefa de batimetria poderia ser realizada por um AUV corretamente preparada para isso.

Figura 26 – Ecobatímetro.



Fonte: Souza (2006, *apud* FLORIANI, 2013).

- **SBP:**

Sub Bottom Profilers (SBP) podem produzir imagens de estruturas sob o solo aquático, através da transmissão de pulsos de baixa frequência e alta potência, capaz de penetrar o solo e medindo a intensidade do sinal refletido.

- **SAS:**

Sonares de Abertura Sintética (SAS), que têm sido implementados em AUVs, usando pulsos simultâneos para cada ponto, conseguindo um alcance maior e resolução melhorada se comparado ao SVL. HiSAS (*High Resolution Interferometric Synthetic Aperture Sonar*, Figura 27), como o usado pela Kongsberg Maritime (HAGEN, 2016), implementou o uso de interferometria. Processos que podem ser observados por sonares ativos podem se geológicos, arqueológicos ou estruturas de construção artificial.

Figura 27 - HiSAS instalado no AUV HUGIN.



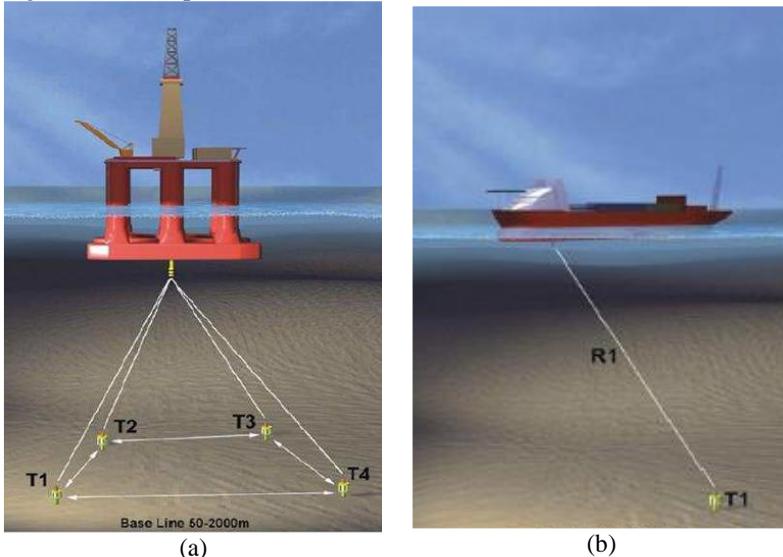
Fonte: Hagen (2016).

SENSORES DE NAVEGAÇÃO

- **Sensores de linha base acústica:**

Sensores de Longa Linha Base (LBL, do inglês *Long Base Line*) e de Linha Base Ultra Curta (USBL, do inglês *Ultra Short Base Line*), Figura 28, têm sido há muitas décadas os sensores mais usados para posicionamento em operações subaquáticas. Eles medem o tempo de resposta do sinal para calcular o alcance, sendo que USBL também mede a fase do sinal de retorno para determinar direção. A posição é determinada em função do intervalo de tempo e do ângulo. Têm como vantagem a detecção de erros e sua delimitação. Suas desvantagens são a instalação necessária no leito subaquático para o LBL e a embarcação necessária para o USBL, o que são grandes dificuldades para uso em AUVs.

Figura 28 - Princípios de funcionamento de LDL (a) e USBL (b).



Fonte: KONGSBERG (2018).

- **DVL:**

Registro de velocidade Doppler (DVL, do inglês *Doppler Velocity Log*), que calcula a defasagem Doppler do sinal de retorno refletido pelo leito oceânico ou por partículas na água, usando os mesmos princípios que o ADCP. Demanda diversos transdutores posicionados em diferentes direções para observar velocidade em 3 dimensões.

Reeves *et al.* (2014) tratam de uma solução comercial desenvolvida pela Lockheed Martin. Um AUV com capacidade de inspeção estrutural usando o mapeamento 3D e a detecção de mudanças com um sonar 3D foi desenvolvido. Testes de validação para a tecnologia foram conduzidos e tendo sucesso em 2011, culminando em uma operação comercial em 2012. A modelagem 3D está evoluindo para o uso de sensores laser, o que deve melhorar a precisão em 10 vezes, de centímetros para milímetros. AUVs capacitados com sistemas de imagem em laser 3D poderão aumentar a definição da varredura para inspeções próximas nas áreas de problemas e o uso do *Light Detection And Ranging* (LIDAR) para o mapeamento 3D e inspeção de estruturas submarinas caminha nesse sentido. O escopo do projeto relatado no artigo seria de desenvolver e demonstrar a tecnologia como útil para a inspeção e geração de imagens em uma plataforma AUV. Entre os objetivos estão a

demonstração de imagens próximas e de alta resolução e estruturas subaquáticas.

Hurtós *et al.* (2014) estudaram a utilização de veículos subaquáticos para inspeção de correntes de monoboias (amarras), aplicando a tecnologia de sonares, incluindo uma análise 3D de imagens para auxiliar na identificação de defeitos. É uma pesquisa que envolve não somente o controle autônomo do veículo, com o reconhecimento do ambiente, mas também avançou no quesito inspeção, com o uso de ferramentas visuais e de sonares.

Hurtos *et al.* (2013) consideram a tarefa de inspecionar as correntes de amarração de uma monoboia usando AUV equipado com um sonar de varredura posterior para superar as dificuldades em ambientes de baixa visibilidade e alta turbidez. Apesar das vantagens, o ultrassom exige o processamento dos dados. O artigo apresenta um sistema de detecção que explora o radar de alta velocidade e testa a capacidade de detecção no padrão local. Então, o sistema de planejamento guia o veículo pelo caminho esperado. Por fim, o veículo é conduzido pelos pontos de controle através do controlador feito sob medida para simultaneamente cruzar a corrente e seguir aos elos seguintes. Experimentos em dados reais demonstram a capacidade de seguir a corrente de modo autônomo com suficiente exatidão para conduzir tarefas de limpeza e inspeção. Ao contrário do trabalho citado anteriormente, este está mais concentrado no uso de sonares para navegar, porém a tarefa ainda consiste na mesma.

Eustice, Brown e Kim (2008) apresentam uma visão geral do projeto de pesquisa em AUV conduzido pelo *Perceptual Robotics Laboratory* (PeRL) da Universidade de Michigan, EUA, sobretudo em três grandes áreas de pesquisa, que são: (1) mapeamento e localização simultâneos através de imagens em tempo real; (2) navegação cooperativa multiveículos; (3) controle através da percepção. Eustice, Brown e Kim (2008) aplicou navegação aumentada por imagens para uso de AUVs em áreas próximas ao solo do oceano, o que é atrativo na medida em que dispensa infraestrutura de navegação, sobretudo em contraste com o uso de técnicas baseadas em acústica. Para atingir o objetivo, foi usada uma plataforma que explora o uso de câmeras no lugar dos sensores, com a aplicação de SLAM. O resultado é uma técnica de navegação empírica robusta para um ambiente de baixa sobreposição de imagens. O método aplica uma representação baseada em imagem onde a câmera define posições relativas através de medições de restrições no ambiente, o que força a trajetória à consistência e também serve como um mecanismo para um circuito fechado, tornando o erro sistemático independente do tempo para uma dada imagem. Os autores também definem uma plataforma e

demonstram suas vantagens sobre uma abordagem puramente de imagem que: (1) aprimora a robustez de baixa sobreposição de imagens subaquáticas; (2) define uma escala livre para sensoriamento e (3) permite o uso de uma câmera desconectada através da topologia de obstáculos.

Dentre vantagens para o DVL estão:

- Capaz de substituir o ensaio visual com precisão de centímetros;
- Ampla cobertura;
- Velocidade de inspeção;
- Produto comercial;
- Menor influência do estado da água em relação ao ensaio visual;
- SLAM.

Dentre as desvantagens estão:

- Área coberta menor que do ensaio visual com condições ideais de iluminação;
- Tamanho dos equipamentos comerciais muito grande para um UUV compacto.

- **ECOBATIMETRIA**

Essa técnica permite a varredura da superfície visível, fornecendo dados de formação do terreno e sua geografia através de uso de sonares. Sonar é o acrônimo de *Sound Navigation and Raging* (ou Navegação e Determinação de Distância através do Som, em português). Sinais acústicos são emitidos a partir do veículo e refletidos pela superfície sub estudo, sua resposta é captada pelo transdutor no veículo. A diferença entre os sinais emitido e recebido é interpretada para o cálculo de posição e de características da superfície.

São usados, normalmente, sistemas capazes de emitir feixes cilíndricos que podem ser usados separadamente ou combinados, como:

- Sistemas Sondadores Monofeixe, que utiliza um único feixe, normalmente emitido na vertical abaixo da embarcação;
- Sistemas Sondadores de Multifeixe (SSMF), com uma formação semicircular (ou “leque”) de uma série de sistemas de feixes simples combinados a um único ponto focal;
- Sistema Sondador Multitransdutores (SSMT), que também utiliza diversos feixes, porém dispostos lado a lado, formando uma cortina vertical.

Os dados coletados através da ecobatimetria geram gráficos de profundidade a uma boa resolução (até 10mm), que permitem identificar defeitos e pequenos desvios do padrão esperado.

Ecobatímetros são consistentes em sua coleta de dados, sendo pouco afetados pelas condições da água. No entanto, condições que façam a posição do sensor variar afetam diretamente o resultado a ser obtido. Essa atividade é bastante comum para embarcações de superfície (FLORIANI, 2013). Considerando que o ambiente subaquático é menos suscetível a variações climáticas que a superfície, a batimetria realizada por UUVs sofre menor influência de ondas e ventos.

Utilizado a partir de barcos, sobretudo por sua aplicação para a pesca, levantamento topográfico para navegação e segurança de estruturas submersas, é um sensor de uso descomplicado e fácil adaptação a barcos. No entanto, devido às dimensões dos ecobatímetros comerciais, sua instalação em um UUV de pequenas dimensões não é direta, ou seja, o equipamento precisa de adaptações para o veículo desejado.

Os ecobatímetros comerciais usualmente têm alcance de 0,15m a 300m, com precisão decimétrica, o que permite identificar defeitos como desvios de traçado, falhas de revestimentos de concreto, detritos etc. Eles são podem ser considerados para o uso em SLAM ou na identificação de pontos específicos para inspecionar, o emprego de ecobatímetro tem as mesmas condicionantes de processamento apresentados na seção sobre inspeção visual.

Ecobatímetros precisam que o transdutor esteja apontado para a direção esperada em que estão os objetos de inspeção. Considerando-se um AUV, que deverá inspecionar objetos longos, a posição preferencial será a parte inferior do veículo, sua área de varredura pode ser imediatamente abaixo dele para inspeção.

Dentre vantagens do sensoriamento acústico estão

- Precisão de localização relativa dos objetos em relação ao veículo;
- Ampla cobertura;
- Diversidade de aplicações;
- Uso para o SLAM;
- Velocidade de inspeção;
- Produto comercial;
- Menor influência do estado da água em relação ao ensaio visual;
- Medições subaquáticas são mais estáveis que as de superfície.

Dentre desvantagens estão:

- Feixes cilíndricos e discretos;
- Necessária integração de dados entre os diversos transdutores;
- Tamanho dos equipamentos comerciais muito grande para um UUV compacto.

- **SUB-BOTTOM PROFILING**

A técnica de *Sub-Bottom Profiling* (SBP) objetiva a criação de perfil subsuperficial do solo subaquático através de ondas acústicas de baixa frequência, permitindo identificar estruturas não visíveis.

É esperado como resultado o perfil subsuperficial do solo subaquático com detalhamento de traçado de estruturas enterradas até 3m, onde podem ser identificados a continuidade de equipamentos ou a presença de objetos enterrados. A precisão é função direta do alcance, pois há perda de sinal à medida que este adentra no meio em que se encontra o objeto de inspeção.

A técnica foi aplicada em AUV, como relatado por Pallayil e Chotiros (2016) com o uso de transdutores rebocados, e foi possível com o uso do AUV Ocean Explorer do Centre for Marine Research and Experiment (CMRE), da Itália, e teve alcance de centenas de metros e foi capaz de detectar estruturas de 40 a 80mm de diâmetro.

O processamento embarcado dos dados coletados através dessa técnica torna possível utilizá-los para auxílio à navegação, ou seja, o veículo pode ser orientado a continuamente seguir o curso do equipamento detectado. O processamento pode ser dispensado quando adotada uma estratégia mais robusta de navegação (como identificação de marcos, uso de *transponders* etc.), visto que, mesmo com a detecção da estrutura enterrada, podem haver regiões não perceptíveis do equipamento e ao algoritmo de navegação caberia definir se essa ausência de dados é fruto de uma mudança de traçado ou da interrupção da continuidade do equipamento. OHI (2005) sugere que, nesses casos, o veículo execute uma manobra transversal à primeira passagem, algo que será discutido em seção específica deste trabalho.

Os SBP são usualmente rebocados por embarcações na superfície, os emissores e receptores de sinais ficam dispostos ao longo da parte inferior do corpo do veículo.

Tian (2008) assume que o alcance do SBP é de 2,3m, com frequência de 3,5kHz a uma distância de 25m.

Dentre principais vantagens do SBP estão:

- Detecção de estruturas em áreas não visíveis ou acessíveis diretamente;
- Levantamento de estruturas geotécnicas próximas ao equipamento objeto de estudo;
- Produto comercial;
- Velocidade de inspeção;
- Relevante para levantamento prévio.

Dentre desvantagens estão:

- Tamanho do equipamento;
- Equipamento comercial é normalmente rebocado.

• **SISMOLOGIA DE REFLEXÃO E REFRAÇÃO**

A sismologia de reflexão e refração utiliza cargas de alto impacto para prospecção do subsolo, de uso bastante comum na prospecção e estudo do perfil de formações rochosas. Objetiva a investigação do terreno para determinar sua composição em termos de formações geológicas ou de estruturas ocultas pelo solo. As ondas de choque geradas pelo emissor conseguem alcançar grandes profundidades, por isso são bastante utilizadas em investigações de novas jazidas subterrâneas de formações geológicas, com aplicações diversas, tais como gás e petróleo. Em ambientes marítimos, o emissor geralmente são cargas de explosivos dispostas na superfície da água.

Com seu emprego, espera-se gerar mapas de composição das formações geológicas com identificação de regiões com evidência de estruturas subterrâneas.

No emprego dessa tecnologia não é necessariamente relevante a precisão estreita de posicionamento, já que objetiva a investigação de material formador do terreno. No entanto, a tecnologia tem se mostrado bastante útil em trabalhos arqueológicos, quando o objeto é inicialmente investigar evidências que motivem uma análise posterior mais detalhada.

A sismologia de reflexão não demanda processamento em linha. Dentro de uma estratégia de serviço, ela seria utilizada como uma das partes iniciais de coleta de dados, para definir o traçado dos equipamentos e posterior consideração na determinação da trajetória de um veículo.

Pleskach (2017) apresenta o projeto WiMUST⁸ que visa utilizar uma rede de AUV como sensores sísmicos de sinais emitidos a partir da superfície da água.

Como principais vantagens da técnica sísmica apresentam-se:

- Detecção de estruturas em áreas não visíveis ou não acessíveis diretamente;
- Levantamento de estruturas geotécnicas na região onde se espera esteja o equipamento a ser investigado;
- Produto comercial;
- Velocidade de inspeção;
- Relevante para levantamento inicial e planejamento de trajetória.

Dentre suas desvantagens estão:

- Emissor não pode estar no mesmo veículo que o receptor;
- Emissor de alto impacto exige muita energia mecânica;
- Influência do equipamento emissor sobre outros equipamentos do veículo.

- **MAGNETOMETRIA**

Magnetômetros são usados para localizar objetos construídos por mãos humanas, tais como equipamentos, naufrágios e artefatos arqueológicos, assim como para medir características magnéticas de rochas. Seu funcionamento se baseia na interferência das estruturas no campo magnético gerado.

A análise da magnetometria pode determinar a presença e o traçado de objetos ferromagnéticos ao alcance do sinal refletido, mesmo ocultos. O resultado tem maior importância qualitativa do que quantitativa, devido à menor precisão no dimensionamento do objeto inspecionado. PIGs, citados na seção 3.3, também adotam sinais eletromagnéticos em algumas de suas configurações. Nesse caso, devido à sua proximidade com o objeto de estudo conseguem alta precisão na detecção de defeitos (os PIGs se deslocam internamente aos dutos e inspecionam toda sua espessura). Infelizmente, em veículos de navegação livre, tais como embarcações ou UUVs, essa mesma experiência não pode ser repetida, visto que é tarefa difícil a manutenção de uma rota próxima às estruturas sob monitoramento.

⁸ *Widely scalable Mobile Underwater Sonar Technology*

O resultado esperado da magnetometria é detectar a presença de materiais ferromagnéticos ao longo do traçado do veículo, incluindo aqueles enterrados – a interferência magnética é proporcional à massa do material.

A precisão de dimensionamento depende do sinal gerado e da massa do objeto. Para a aplicação subaquática, devido à necessidade de investigar abaixo do solo, é esperada uma precisão muito baixa, que seja capaz de detectar materiais com pelo menos 1ton.

O alcance depende do tamanho do objeto buscado, chegando a pelo menos 3m sob o solo, por exemplo. A atenuação do sinal emitido é mais função de dispersão magnética do que da presença de material não magnético.

A orientação do veículo pela percepção de material ferromagnético contínuo (SLAM) é bastante útil, sobretudo para estruturas como dutos.

Exceto para uso do SLAM, não é necessário o processamento embarcado dos dados coletados. Dados necessários para o pós-processamento são referentes à posição e à orientação do veículo e profundidade.

A posição do emissor precisa ser de modo a não interferir com outros sistemas do veículo, ou até mesmo influenciar o receptor.

Os eletroímãs podem ser robustos para gerar um campo magnético grande o suficiente para estender seu raio de ação, o que demanda alta corrente elétrica. Alternativamente, o veículo pode manter uma distância curta com a área de interesse para o campo magnético possível consiga atingir a estrutura em estudo.

A interferência magnética é prejudicial aos dispositivos de memória mais utilizados atualmente. Para evitar perdas de dados, os componentes de armazenamento de dados precisam ser protegidos com blindagem eletromagnética.

A magnetometria é citada para uso em AUVs por diversos autores, como Jacobi e Karimanzira (2013), Tian (2008). Ito *et al.* (1994) utilizaram o AUV Aqua Explorer 1000 para inspecionar um cabo submarino, e em seu trabalho apresentam resultados satisfatórios, com o uso de um magnetômetro que conseguir 10nT de campo magnético alternado, e foi capaz de detectar o cabo a uma distância de 2m. (a uma velocidade de 1nó). Allen, Purpura e Overway (2002) avaliam a interferência de campo eletromagnéticos gerados tanto pelos equipamentos do próprio veículo quanto pelas estruturas subaquáticas, e recomendaram que o veículo utilizado, o AUV Remus tenha os sensores instalados a duas vezes o diâmetro do veículo e rever o projeto do veículo quanto ao ruído eletromagnético por ele mesmo gerado. Jacobi e

Karimanzira (2013) sugerem o posicionamento dos magnetômetros em asas laterais do veículo, como pode ser visto na Figura 17.

Algumas vantagens da magnetometria são:

- Velocidade de inspeção;
- SLAM;
- Sistema simples;
- Detecção de material não visível e subterrâneo.

Algumas desvantagens são:

- Peso;
- Influência sobre outros sistemas do veículo;
- Consumo de energia;
- Precisão.

• MEDIÇÃO DE POTENCIAL ELETROQUÍMICO

A execução da medição de potencial eletroquímico de uma estrutura é tarefa necessária para verificar a atuação da proteção catódica (que é projetada para funcionar como um sistema capaz de criar um potencial elétrico que proteja a estrutura da ação corrosiva do meio ou diminua seu efeito). A medição deve ser capaz de identificar se a proteção está agindo de forma eficiente e, onde não está, pode determinar se a superfície da estrutura sofre com o processo de corrosão.

O resultado de tal inspeção oferece uma amostragem discreta do potencial de proteção da estrutura, com dados de tensão para cada semicélula pré-instalada.

A precisão dos dados depende diretamente da calibração da semicélula e de sua conexão à estrutura. A semicélula, no caso de estruturas aquáticas pode ser de prata-cloreto de prata ($\text{Ag}/\text{AgCl}_{\text{água do mar}}$) ou de Zinco (Zn). Os potenciais de referência são definidos na norma PETROBRÁS N-2838 (2014) e vão de -800 mV a -1150 mV para o eletrodo de prata-cloreto de prata e +250 mV e -100 mV para o eletrodo de Zinco. Tais eletrodos, no caso de inspeção automatizada, devem estar instalados ao longo da estrutura de maneira permanente, com medidores de potencial, capacidade de transferência de dados e fornecimento de energia. Como esse sistema está sujeito à deterioração do meio e do tempo, portanto a precisão da medição decai sistematicamente.

O alcance dos dados medidos depende do projeto e da resposta da estrutura ao sistema de proteção catódica. A corrente de proteção catódica é projetada para proteger uma área determinada, conseqüentemente o alcance da medição deve conter a mesma área. Defeitos de revestimento acarretam perda de corrente de proteção. Quanto maior o intervalo entre

os pontos de medição (ou maior a quantidade de defeitos entre esses pontos) pior o resultado medido. Com a degradação do equipamento, pode ser necessário aumentar o número de pontos de medição e diminuir a distância entre eles.

A transmissão dos dados medidos é feita a partir da aproximação do veículo ao ponto medido, para o qual o alcance é pequeno (poucos metros), pois capacidade de transmissão exige energia, algo que os pontos de medição não têm em grande quantidade. A antena de recepção de dados dos pontos de teste deve ser posicionada de modo a favorecer a conexão com o emissor.

O posicionamento conhecido dos pontos de medição serve de referência para a localização do veículo ao longo do percurso, aprimorando, dessa maneira, a técnica SLAM.

Exceto para uso do SLAM, não é necessário o processamento embarcado dos dados coletados.

Dados necessários para o pós-processamento são referentes à posição, algo que pode ser transmitido pelo próprio ponto de teste, desde que ele seja identificado pelo próprio ponto de medição.

Kros (2011) cita a versatilidade dessa técnica de inspeção como seu emprego em monitoramento de cruzamento de duto, identificação de depleção de anodo, monitoramento do revestimento do duto, arranhões e mossas no duto, monitoramento de vão livre e determinação de perfil de corrosão.

Dentre vantagens da medição de potencial eletroquímico estão:

- Coleta de dados relevantes para a integridade das estruturas, não coberta pelos métodos tradicionais de inspeção;
- SLAM;
- Baixo consumo de energia embarcada.

Dentre as desvantagens:

- Instalação prévia de equipamentos;
- Desgaste dos equipamentos instalados.

2.5 Revisão complementar de literatura

Alguns temas de grande impacto no uso ou projeto de veículos subaquáticos não tripulados serviram de estímulo para a publicação de trabalhos, além daqueles envolvidos diretamente na inspeção. Essas publicações tratam de trajetória (definição e controle), padrões, políticas

e conceitos de veículos não tripulados subaquáticos, testes, simuladores e aplicações específicas, conforme apresentados nesta subseção.

Galceran e Carreras (2013) propõem um método de planejamento de trajetórias para inspeção de estruturas naturais em três dimensões no solo do oceano descrito por mapas batimétricos em 2,5 dimensões, sendo uma tarefa integral dos robôs de inspeção submarina, tais como mapeamento de microbatimetria e montagem de mosaicos de imagens. Os autores consideraram um AUV com capacidade de criar imagens do solo do oceano, como por câmeras ou sonares. O comportamento padrão desse tipo de robô é de uma trajetória plana, em duas dimensões, para cobrir áreas planas, o que traz dois problemas quando o terreno não é plano: (1) a mudança brusca de profundidade requer grandes mudanças de posição do veículo, resultando em um custo de energia e de componentes a serem instalados para permitir esse movimento; (2) isso requer tempo para o ajuste, resultando em uma variação da distância de um alvo na superfície, o que traz a deterioração à qualidade média dos dados coletados. O método proposto no trabalho leva em conta esses fatos e gera padrões de cobertura diferentes de acordo com o relevo, resultando em uma cobertura mais adequada ao caminho para gerar imagens. Além disso, o método proposto seria rápido e fácil de se implementar, provendo uma ferramenta para planejamento de trajetória. O método foi testado em ambiente real próximo a Santorini, Grécia.

Jacobi e Rauschenbach (2010) identificam que o desenvolvimento de algoritmos e a parametrização de controladores para UUVs são tarefas que precisam de muitos testes, e com esse intuito os autores desenvolveram um ambiente e uma ferramenta para essas tarefas. A ferramenta, conhecida como ferramenta de cadeia, consiste de diferentes etapas para implementar algoritmos a partir do planejamento inicial para a missão. Esses passos incluem uma prototipagem rápida, simulação, testes em ambientes controlados e o teste de fabricação.

Sørensen e Refsnes (2009) apresentam o projeto de sistemas automáticos de controle para ser aplicado a UUV que conduzam qualquer serviço de intervenção e inspeção. A depender da operação a ser executada, características do veículo (tais como massa, largura, comprimento ou centro de gravidade) podem mudar consideravelmente devido à mudança de carga, que pode ser uma nova ferramenta ou pacotes de instrumentação. Essas mudanças causam variação com o tempo de modelos estruturais e paramétricos do veículo. Para o controle adequado de veículo com alto grau de autonomia e o projeto de um sistema supervisório automático, são essenciais a modularidade no projeto do

controlador e a habilidade de intercambiar entre os bancos de controladores adequados.

Hurni e Kiriakidis (2015) propõem um método para avaliar o caminho com melhor tempo, considerando correntes concorrentes. Uma ferramenta numérica é usada para definir o híbrido entre melhor tempo e caminho ótimo para dadas correntes. O primeiro objetivo dos autores é de definir o caminho de melhor tempo, o segundo é de avaliar a relação entre tempo para cumprir a missão e a precisão da medição ao se desviar de uma rota desejada. Um experimento foi conduzido onde o veículo AUV REMUS segue um caminho definido sob diferentes intensidades de correntes. Os melhores tempos são apresentados em uma tabela. Uma função é usada para avaliar o tempo para completar a missão e o erro de medição quanto ao desvio do caminho esperado. Os autores puderam simular o resultado de melhor tempo para o veículo em estudo, permitindo uma escolha de caminho e a previsão de tempo de chegada.

Nakhkoob, Chatraei e Shojaei (2014) apresentam uma discussão acerca do rastreamento de posição e orientação no plano horizontal de um AUV sujeito a correntes oceânicas. A eficiência do controlador adaptativo é comparada com o método de linearização e controle de ganho difuso. Algumas simulações foram executadas. O algoritmo de controle é analisado em termos de limites e convergência, assim como sua estabilidade semi-global, sob a teoria da estabilidade de Lyapunov e o enunciado de Barbalat.

Alguns trabalhos falam do ambiente de desenvolvimento das ferramentas subaquáticas como UUVs, como padronização, programas de pesquisa e financiamento, como seguem

O emprego de AUVs em tarefas de inspeção de oleodutos vem crescendo neste momento, portanto, quanto antes padrões forem adotados o desenvolvimento da ferramenta será mais rápida, ajudando a indústria a ultrapassar barreiras de segurança, ambientais, operacionais e benefícios econômicos, sobretudo em águas profundas. Um passo importante a ser vencido é também a aceitação de resultados dessa inspeção autônoma dentro de padrões regulatórios. Jacobson *et al.* (2013) descrevem o estado atual do desenvolvimento na indústria para desenvolvimento e emprego de AUV e a visão futura para seu uso em águas profundas, os benefícios e as futuras capacidades dessas ferramentas que precisam ser antecipadas e facilitadas usando padrões. Os autores também descrevem os objetivos

do projeto DeepStar⁹ 11304 (uma iniciativa supra corporativa para o desenvolvimento de tecnologias para serviço em águas profundas), que lançou as bases para conseguir uma padronização das interfaces e inspeções com o uso do AUV. As tarefas definidas no projeto são de criar padrões de interface AUV para campos de águas profundas (Tarefa 1), e criar padrões regulatórios para inspeções com AUV (Tarefa 2). Seus objetivos primários são: (1) identificar interfaces que possam ser padronizadas para AUVs, propor recomendações para os padrões e iniciar o processo de aprovação e publicação dos padrões; (2) identificar inspeções regulatórias que possam ser executadas por AUVs, desenvolver versões adequadas de normas e disponibilizar produtos que facilitem a avaliação e aprovação por de agências regulatórias.

Lane *et al.* (2015) utilizam como premissa a contrariedade de que veículos autônomos não são muito bons em trabalhos autônomos, ou seja, esses veículos enfrentam desafios que precisam ser superados para que sejam verdadeiramente autossuficientes. Operando em ambientes reais, eles facilmente terminam presos, necessitando de intervenção e geralmente têm sucesso somente em tarefas simples e em situações bem controladas. PANDORA (acrônimo do inglês *Persistent Autonomy through Learning, Adaptation, Observation and Re-planning*) é um projeto de 3 anos com objetivo de desenvolver e avaliar novos métodos computacionais para construir robôs subaquáticos persistentemente autônomos, reduzindo a frequência de intervenções. A chave para isso é a habilidade de reconhecer a falha e responder a ela, em qualquer nível de abstração e tempo. Sob a orientação da indústria, a validação de tarefas de inspeção, limpeza e operação de válvulas são testadas com AUVs de parceiros na Escócia e Espanha. Na Tabela 5, o objetivo denominado pelos autores como descrever o mundo é de entender a natureza daquela característica e agir ao redor dela, uma vez que não podem ser modificadas. Outro aspecto discutido chamado pelos autores como conduzir e adaptar intenções significa melhorar aquela característica ou modificá-la para uma condição adequada ao uso. Já atuar com robustez significa investir para que esses itens tenham ação forte na estratégia ou na execução, para que não sejam pontos fracos dos projetos dos veículos ou para diminuir sua influência negativa. O projeto previu a utilização de uma bancada de testes que permitiriam até 6 graus de liberdade para veículos autônomos, além do uso de um tanque de ensaios.

⁹ A iniciativa Deepstar possui sítio de internet www.deepstar.org para referência.

Tabela 5 - Relevância dos elementos da arquitetura computacional de PANDORA para os desafios

ID	Desafios	Descrevendo o Mundo	Conduzir e Adaptar Intenções	Atuar com robustez
1	Dinâmica acoplada			X
2	Sensores ruidosos	X		X
3	Correntes			X
4	Comunicação limitada	X	X	
5	Forças reativas			X
6	Movimento do objeto			X
7	Limitação de energia	X	X	
8	Ambientes parcialmente conhecidos	X	X	
9	Treinamento			X
10	Falhas	X	X	

Fonte: Lane *et al.*, 2015)

O trabalho de Lane *et al.* (2015) foi complementado pela publicação de Maurelli *et al.* (2016), onde são apresentados resultados colhidos pelo projeto PANDORA, em um período de dois anos e meio em que foram executados testes de campo com o AUV Nessie no Loch Linnhe, na Escócia, e com o IAUV Girona 500 em um porto próximo a Girona, Espanha. Tarefas como a inspeção e limpeza de corrente de monoboia foi executada pelo IAUV Girona 500 no âmbito do PANDORA, utilizando um sonar frontal para SLAM, assim como seu aprimoramento para execução de manobras de válvulas e utilização de sensores óticos e laser para reconhecimento de caminho e objetivo para execução de suas tarefas.

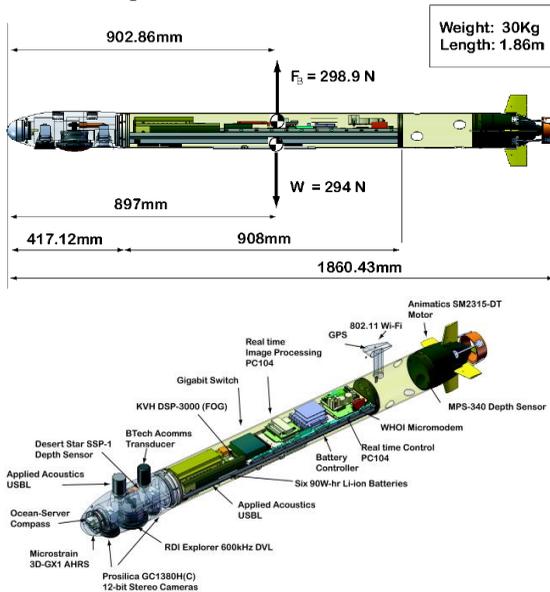
Iniciativas como o PANDORA (Lane *et al.* 2015) e o TRIDENT (SANZ *et al.*, 2013) têm sido usadas para o desenvolvimento de inovações na área da robótica submarina, sua implementação e emprego em campo e tem servido de elo de ligação entre centros de pesquisas e empresas na Europa.

Floriani (2013) apresenta uma investigação e caracterização de superfícies submersas rasas para planejamento da atividade humana. Precisão, custo e risco para trabalhadores são limitantes atuais. O autor desenvolve um projeto conceitual de um sistema de investigação para águas rasas economicamente viável que reduza riscos. Foi feito um

levantamento de metodologias de projeto que contribuiriam no processo de um estudo de problemáticas relacionadas à investigação subaquática. Como resultado, o autor propõe um conceito de veículo que possa executar a investigação subaquática.

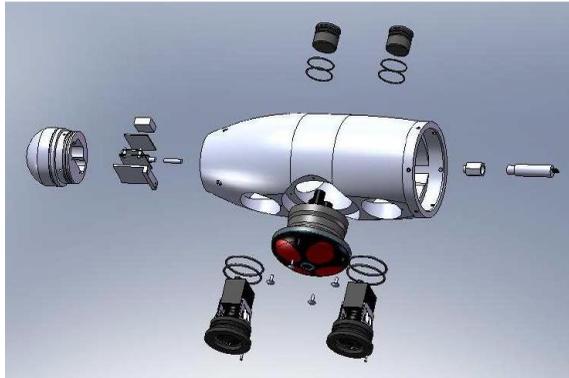
Brown, Kim e Eustice (2008) relatam a experiência da Universidade de Michigan ao modificar dois sistemas de SLAM para AUVs com o objetivo de adicionar novos sensores ao veículo, incluindo câmeras para orientação, sensores de velocidade e um modem de comunicação. O interior do AUV é apresentado com detalhes na Figura 29 e na Tabela 6, sendo que esta última ainda apresenta os equipamentos originais do AUV. Os autores ainda apresentam a nova ponteira do veículo (Figura 30), fabricada sob orientação dos próprios pesquisadores, para a instalação dos novos sensores.

Figura 29 - AUV e componentes internos.



Fonte: Brown, Kim e Eustice (2008).

Figura 30 - Ponteira desenvolvida para o AUV Iver2 pelo laboratório PeRL, da Universidade de Michigan.



Fonte: Brown, Kim e Eustice (2008).

Tabela 6 - Lista de instrumentos fornecidos com o AUV IVER2 e aqueles instalados na Universidade de Michigan.

Iver2 Instrumentos de fábrica	Variável	Taxa de atualização	Precisão	Cobertura	Desvio
OceanServer OS5000 Compass	Orientação	0,01-20Hz	1-3° (guinada), 2° (rolagem e arfagem)	360°	-
Sensor de pressão MSP-340	Profundidade	-	< 1% of FS	0-15000psi	-
Sonar de Varredura Lateral Imagenex com dupla frequência	-	330 ou 800Hz	-	15-120m	-
USGlobalSat EM-406a GPS	Posição XYZ	10Hz	5-10 m	-	-
Novos Instrumentos	Variável	Taxa de atualização	Precisão	Cobertura	Desvio
Câmera Prosilica GC1380H©	Imagem colorida	1-5 quadros por segundo	1360x1024	-	-
Teledyne RDI 600kHz Explorer DVL	Velocidade	7Hz	1,2-6 cm/s (@ 1m/s)	0,7-65m	-
KVH DSP-3000 (FOG)	Variação de guinada	100Hz	1 – 6°/hr	±375°/sec	-
Transdutor de Pressão Digital Desert Star SSP-1 300PSIG	Profundidade	0,0625-4Hz	0,2 % of FS	15-300 PSIA	-
USBL Applied Acoustics	Posição XYZ	1-10Hz	+/-0,1 m da Variação de Inclinação	100 m	-
One-Way-Travel-Time (Modem+PPS)	Variação de inclinação	-	18,75 cm (@ 1500m/s)	-	<1,5m em 14h
Micromodem WHOI	Comunicação	Varia	-	Varia	-
Relógio Seascan SISMTB v.4 PPS	Tempo	1Hz	1 µs	-	1ms/14hr
Microstain 3D-GX1 AHRS	Orientação, variações no veículo	1-100Hz	±0,5°	±180;180:90	-

Fonte: Brown, Kim e Eustice (2008).

Heermance *et al.* (2015) introduziram um conceito inovador no desenvolvimento de um AUV que é a sua produção através de impressão 3D. O resultado foi um AUV bastante compacto, com 11,5cm de comprimento por 4,5cm de diâmetro (Figura 31). Tal produto demonstra

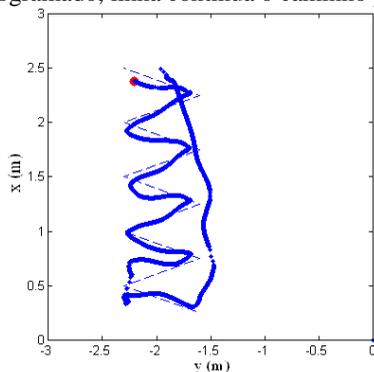
a versatilidade da ferramenta, que, apesar de sua pequena estabilidade hidrodinâmica, foi capaz de percorrer um caminho predefinido com boa precisão em testes em ambiente controlado (Figura 32).

Figura 31 - Micro AUV.



Fonte Heermance *et al.* (2015).

Figura 32 - Caminho percorrido pelo micro AUV em testes de laboratório (linha tracejada é o caminho programado, linha contínua o caminho percorrido).



Fonte Heermance *et al.* (2015).

O principal produto desenvolvido pelos autores Heermance *et al.* (2015) foi a elaboração de uma sequência de testes e sua posterior validação para o veículo desenvolvido. Os testes consistem em:

- Teste 1 – Validação da operação de todos os componentes e da fluuabilidade do veículo;
- Teste 2 – Programação parametrizada para controle remoto;
- Teste 3 – percurso em caminho fechado para validação do controle de trajetória;

- Teste 4 – Parâmetros do micro AUV em missão foram determinados com medição através de câmeras e marcos refletivos;
- Teste 5 – Determinar a funcionalidade em 6 graus de liberdade;
- Testes 6, 7 e 8 – Resposta do veículo a um campo de fluxo gerado no tanque de testes.

Bobkov *et al.* (2013) propõem um novo ambiente de simulação virtual, capaz de descrever o ambiente, simular sensores e a navegação de um AUV, assim como seu funcionamento e comportamento no ambiente. O sistema tem a possibilidade de descrever graficamente o ambiente, capaz de imitá-lo e onde o AUV e seus subsistemas podem atuar. Há a possibilidade de incluir o software embarcado do AUV para testar seu comportamento no ambiente, assim como a atuação dos sensores e a simulação da aquisição de dados, tais como visuais ou acústicos. Possibilita também o cálculo de trajetória e a ação dos controles com uma navegação com auxílio visual. A eficiência do sistema de simulação foi validada no seu uso para planejamento e modelagem da inspeção de um duto submarino.

Sørensen e Ludvigsen (2015) apresentam uma coletânea de dados relevantes levantados pelas pesquisas do Centro para Sistemas e Operações Marinhas (AMOS), da NTNU (Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia). Tais dados estão sendo reunidos dentro de um programa de 10 anos (2013 a 2022) que tem como escopo trabalhos relacionados a operações marinhas autônomas e sistemas aplicados. As pesquisas principais do AMOS são voltadas à ciência e tecnologia do espaço oceânico, o que inclui indústria de óleo e gás, marítima, pesca, aquicultura, energia renovável em alto mar, ciência marinha e mineração marinha. Operações integradas entre AUVs, ROVs e embarcações serviram como qualificação para tecnologia e desenvolvimento de metodologia em missões de cruzeiro biológicas (floresta de algas marinhas e corais), arqueológicas (embarcação naufragada durante a Segunda Guerra Mundial) e geológicas (falha de Tautra). Para o benefício do trabalho integrado, os dados eram processados o mais próximo do tempo real possível. O nível de autonomia nesses serviços foi modesto, pois ROV e embarcações eram controladas diretamente ou à distância. O AUV foi programado com algoritmos sequenciais de missão. O AMOS pretende, no futuro, abordar o campo de inteligência artificial e sistemas com auto-aprendizado.

Bingham *et al.* (2010) detalham as operações e discutem os resultados da pesquisa do antigo naufrágio Chios em 2005. Essa pesquisa foi conduzida por uma equipe internacional que envolveu engenheiros, arqueologistas e cientistas naturais da ilha de Chios, na Grécia, usando um AUV construído especificamente para inspeção em alta resolução e caracterização do sítio. Além disso, os autores identificaram os desafios de adaptar um AUV para arqueologia em águas profundas e descrevem como esses desafios foram superados. Com a identificação de ferramentas do estado da arte para robótica em arqueologia de águas profundas, são discutidas oportunidades nas quais novos desenvolvimentos e pesquisas devem ser positivas para a avaliação rápida de sítios em águas profundas.

2.6 Comentários sobre o capítulo

Neste capítulo pode-se conhecer a metodologia do PRODIP para desenvolvimento de projeto de produtos, que permite um desenvolvimento estruturado e favorece o processo criativo.

O conceito de SLAM, bastante difundido na exploração subaquática com veículos não tripulados e conjuga inspeção e localização, foi revisto, assim como o uso de GPS e transponders para o auxílio para a localização e mapeamento preciso. Essas tecnologias se mostram essenciais para o uso eficiente das ferramentas de investigação subaquáticas.

A introdução aos diversos meios de inspeção será utilizada posteriormente para subsidiar o projeto do veículo de inspeção. É necessário conhecer o que a tecnologia atual oferece, aquilo que já foi experimentado nesse campo e o que ainda precisa de evolução. Mesmo aquelas técnicas ou tecnologias que não se mostram produtoras para o emprego em uma ferramenta de tamanho reduzido podem, com a evolução dos veículos ou dos meios, ser empregadas em algum tempo futuro, ou mereçam de maiores investimentos para que sejam utilizáveis.

Conhecer as iniciativas já adotadas por outros pesquisadores, como o desenvolvimento de veículos ou a validação de ferramentas, além de encurtar e diminuir o caminho do desenvolvimento, alicerça a base para que a novos produtos sejam ainda mais evoluídos.

Dessa forma, o primeiro objetivo específico deste trabalho foi atingido, o de identificação de técnicas e ferramentas já existentes que são empregadas para serviços de inspeção subaquática e que possam ser aplicadas em veículos subaquáticos.

A continuação desse estudo exige que se conheçam as demandas do mercado que precisam ser atendidas e as rotinas que serão mantidas.

O produto a ser desenvolvido só será eficiente se for desenvolvido de acordo com os propósitos de emprego e desde que estejam adequados ao ambiente em que devem executar suas tarefas.

3 AMBIENTE DE TRABALHO DO AUV

Em continuidade à definição de produto necessária para o desenvolvimento do projeto, é necessário conhecer quais tarefas o AUV deverá executar. Para isso, faz-se necessário definir as condições de contorno, como o ambiente de trabalho subaquático, definição das estruturas e equipamentos a serem inspecionados e conhecer as rotinas de inspeção. Por fim, nesta seção é apresentado o trabalho dos mergulhadores que atendem atualmente a necessidade de inspeção.

3.1 A água

As condições da água definem tanto a capacidade de inspeção quanto serve como condicionante para a escolha de sensores. Alguns sensores são sensíveis a mudanças no ambiente, como os sonares, que dependem da densidade da água e, portanto, determinam a presença do termômetro, por exemplo.

Condições como a presença de correntes marítimas, variação de marés e ondulações também influenciam a manutenção de posição e manobras próximas à superfície ou ao solo subaquático. Portanto, é necessário conhecer o comportamento do veículo para expô-lo somente a condições em que consiga manter capacidade de controle e tanto sua entrada no meio aquático quanto sua posterior recuperação precisam ser asseguradas.

Condições visuais são as principais afetadas pelo estado da água, a ponto de impedir o emprego de tecnologias, como câmeras, em casos extremos. Sobretudo a iluminação é a principal influenciadora, então tanto condições atmosféricas (nebulosidade) quanto o momento no dia determinam tempo de trabalho (enquanto há luz), a sensibilidade dos sensores visuais, assim como o alcance da imagem a ser captada.

O ambiente aquático está em constante mutação, algo que não pode ser controlado. Agitado por correntes naturais, tempestades ou ação humana, as forças atuantes acabam por tornar o meio subaquático um ambiente imprevisível.

Há regiões em que a presença de matéria sólida, desde a menor às de grandes proporções, como lixo humano ou icebergs, apresentam grave ameaça a equipamentos subaquáticos. Até mesmo a navegação humana pode se colocar como risco, devido a atividades como pesca de arrasto, ancoragem de embarcações ou acidentes, como naufrágios ou descarga inadvertida de navios.

Além do desgaste natural dos materiais, essa exposição constante ao risco é uma das razões pelas quais equipamentos subaquáticos precisam receber monitoramento frequente.

Ainda hoje, principalmente por barreiras regulatórias (PETROBRÁS N-1487, 2011; ABNT NBR16244, 2013), o principal método de inspeção subaquática é o visual, utilizado em atividade de mergulho. Uma dificuldade inerente ao meio é a limitação para a utilização de recursos visuais, praticamente indispensáveis para o trabalho de mergulhadores. Mesmo em águas com baixa turbidez, a iluminação natural ou artificial sofre perdas com dispersão.

A visibilidade subaquática é diretamente impactada pela dissolução de matéria na água. Essa condição é usualmente monitorada tanto para apoio às atividades de mergulho, esportivo ou profissional, quanto à sua importância para condições ambientais.

Desconsiderando-se casos fortuitos, como vazamentos ou descarga inadvertida de material na água, a quantidade de massa diluída na água é usualmente função da presença de material disperso, causado por:

- Presença de vida aquática (que por sua vez pode se proliferar devido a mudança em condições climáticas como temperatura da água, correntes sazonais, radiação solar, marés);
- Dispersão de matéria suspensa inerte (orgânica ou não), também causada por forças da natureza, como tempestades, correntes, marés, ondas etc.

Características geográfica e geológica locais podem tornar a condição visual aquática permanente ou temporária.

A qualidade visual da água impacta diretamente o serviço de inspeção por técnica visual, que pressupõe sobretudo a incidência de luz, assim como a capacidade de recepção do sinal luminoso, pois águas com menos massa suspensa têm índices de refração e de reflexão menores (Tabela 7), ou seja, a luz natural é capaz de chegar a maiores profundidades. A incidência de radiação solar depende também de fatores como hora do dia, dia do ano e nebulosidade.

Tabela 7 - Gradiente de turbidez em relação à presença de argila suspensa na água

Argila (g)	Turbidez em FTU
0	0,2
12,5	1,1
25	2
50	3,6
75	5,1
100	6,9
125	8
150	9,5
200	13

Fonte: Albiez *et al.* (2015)

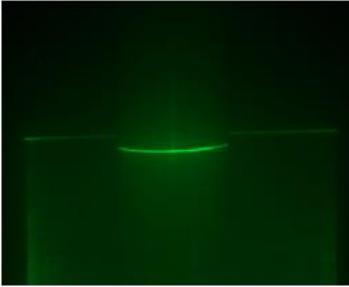
Mesmo o uso de iluminação artificial pode ficar impedido devido à condição visual da água, uma vez que águas com muita matéria suspensa causam difusão e a luz emitida acaba se perdendo no ambiente, o que pode até mesmo prejudicar o serviço, pois é a matéria suspensa que passa a receber a iluminação e não apenas o objeto de estudo.

Águas agitadas tendem a ter condição visual pior que águas calmas. Esse estado também é resultado do clima local ou da sua condição momentânea e é uma razão pela qual algumas regiões tendem a ter condições visuais piores.

Albiez *et al.* (2015) conduziram um trabalho que fez a avaliação da dispersão da luz no meio aquático em relação à quantidade de matéria suspensa. Parte dos resultados pode ser vista na Figura 33, onde é possível identificar o decaimento da visibilidade com o aumento da turbidez, medida em FTU¹⁰ e na Figura 34, na qual é mostrada a avaliação da perda de sinal laser, medido pelo brilho captado, em relação à distância e à turbidez da água, também medida em FTU.

¹⁰ *Formazine Turbidity Units.*

Figura 33 - Imagens da câmera durante ensaio de turbidez a uma distância de 1800mm



(a) 2 FTU.



(b) 3.6 FTU.



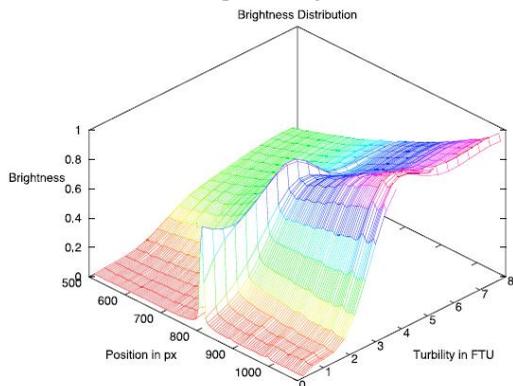
(c) 5.1 FTU.



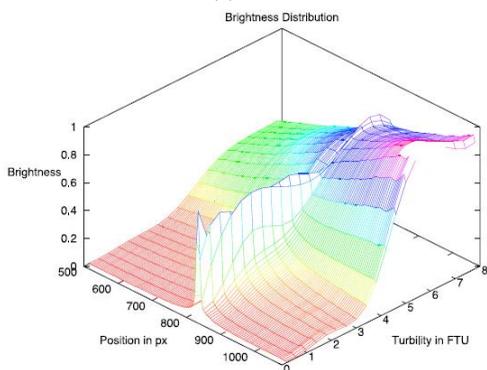
(d) 6.9 FTU.

Fonte: Albiez *et al.* (2015)

Figura 34 - Influência da turbidez no sinal do laser para diferentes posições a um raio de distância de 1800mm, para 2 objetos diferentes



(a) Parede



(b) Duto

Fonte: Albiez *et al.* (2015)

A condição visual da água influencia a necessidade de iluminação artificial e o processamento de imagens. Sun, Yu e Xu (2013) demonstram o ganho de qualidade possível com a remoção de ruído da imagem (Figura 35).

Figura 35 - Processamento de imagem.



Fonte Sun, Yu e Xu (2013).

3.2 Objeto de interesse para o estudo

O objetivo deste estudo é identificar o potencial de utilização do AUV como ferramenta de inspeção. O objeto de interesse inicial de pesquisa será uma estrutura submarina utilizada para transporte de petróleo, que opera a descarga de navios no litoral. Esse sistema consiste de dois dutos, com extensão de aproximadamente 8km, e a monoboia (com todos seus sistemas auxiliares, que incluem amarras, PLEM, dutos, etc.). A Figura 36 é uma representação teórica da batimetria do local da aplicação, onde se alinham dois dutos submarinos e é baseada em dados coletados no ano de 2012 por um serviço de batimetria do solo oceânico. Na Figura 36 é possível identificar o que seria a parte submarina do duto, que percorre ao todo 7,7km desde a costa, de onde sai a uma profundidade de aproximadamente 7m, chegando a mais de 24m nas regiões mais profundas e longe da costa.

Os dados foram levantados através do uso de uma embarcação. Os equipamentos utilizados foram:

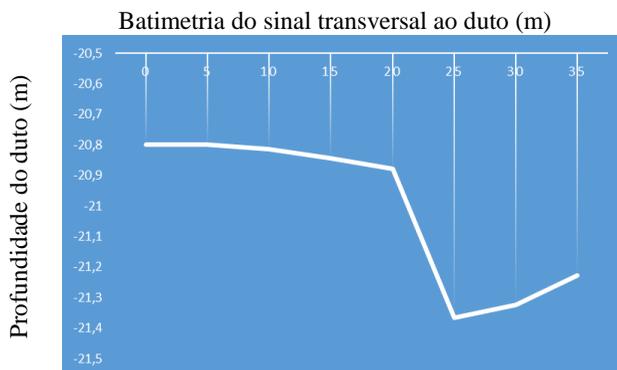
- Sistema DGPS CNav 2050 L_BAND;
- Ecobatímetro Multifeixe R2sonic Modelo 2022 – feixes de 1° x 1°;
- Marégrafo digital Valeport modelo 740;
- Sonar de varredura lateral GeoAcoustic Imagenex SportScan;
- Sub Bottom Profiler GeoPulse Model 5430.

Figura 36 - Representação teórica da batimetria longitudinal do solo sob os dutos a serem estudados.



Fonte: Sonaglio, Simoni e Weihmann (2016).

Figura 37 - Representação teórica da batimetria transversal do solo sob os dutos a serem estudados no ponto com maior diferença de profundidade.



Fonte: Sonaglio, Simoni e Weihmann (2016).

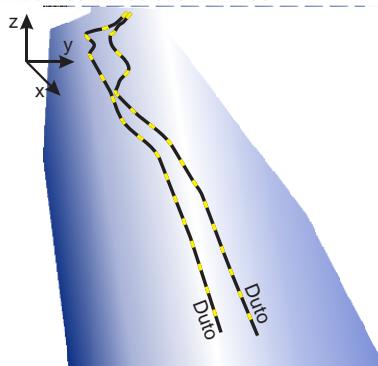
Os dutos saem, portanto, da costa, onde a cota é próxima à referência UTM¹¹, na Figura 36 esse valor é de 7m de profundidade. Os dutos seguem em direção à estrutura marinha conhecida como monoboia. Durante esse percurso o relevo varia consideravelmente e o dado mais relevante a ser observado é a variação de inclinação no sentido leste-oeste.

¹¹ Universal Transversa de Mercator.

Baseada na batimetria realizada em 2012, a Figura 37 também demonstra como o terreno pode variar transversalmente ao traçado teórico do duto (sentido norte-sul), com diferenças de cotas de até 0,5m em 25 metros.

A Figura 38 procura demonstrar o traçado teórico dos dutos submarinos. Nesse exemplo é possível discernir que o caminho seguido por essas estruturas não é uma linha reta, tanto longitudinalmente, quanto transversalmente. Ademais, esse desenho pode sofrer alterações devido às ações de marés, correntes oceânicas ou até acidentes, como choques com âncoras ou outros corpos.

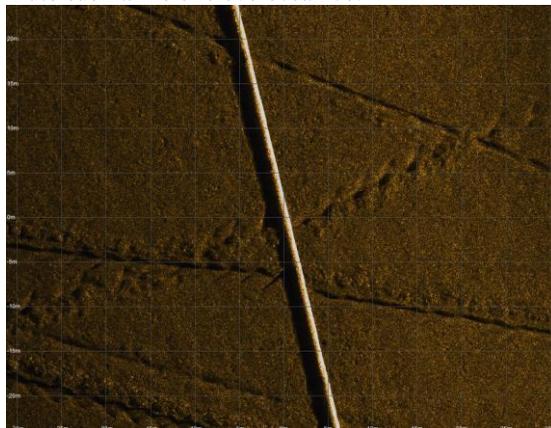
Figura 38 - Traçado teórico dos dutos submarinos



Fonte: Sonaglio, Simoni e Weihmann (2016).

A Figura 39 e a Figura 40 são exemplos práticos demonstrados por Hagen (2014) da aplicação em dutos. Na Figura 39 é possível identificar o relevo oceânico. Na Figura 40, além do duto, é possível identificar um corpo estranho que se chocou contra a estrutura, típico exemplo de obstáculo que um veículo autônomo deve evitar ao executar sua tarefa automática.

Figura 39 - Duto submarino e relevo oceânico.



Fonte: Hagen (2014).

Figura 40 - Duto submarino e obstáculo.



Fonte: Hagen (2014).

Ao fim do duto se encontram as estruturas de operação que atendem ao serviço de carga e descarga de navios com produtos, que são:

- Mangotes de superfície;
- Monoboia;
- Amarras;
- Mangote vertical;
- Coletor de extremidade de duto submarino (PLEM, abreviatura do inglês *PipeLine End Manifold*).

A monoboia, ilustrada na Figura 41, é uma estrutura flutuante ancorada em um ponto fixo do oceano e que serve às operações de carga e descarga de navios de petróleo e derivados. A monoboia está conectada aos dutos que se estendem desde a costa e serve como ponto de ligação destes com os navios, tendo também função de aumentar a segurança nessa tarefa.

Figura 41 - Monoboia (ou Single Pont Mooring) conectada a navio.



Fonte: Kantharia (2016).

3.3 Inspeção em estruturas subaquáticas

Durante a vida útil de estruturas submarinas de transporte de petróleo, tanto de dutos quanto de monoboias, uma série de serviços de inspeção se fazem necessários para assegurar sua continuidade operacional e garantir a segurança das pessoas, meio ambiente e equipamentos. Nesta seção são identificados alguns desses serviços.

Um serviço frequente é o de inspeção nas amarras da monoboia, que são correntes que ancoram a estrutura ao solo oceânico, garantindo assim sua posição. As correntes devem tanto estar em condições dentro dos padrões de operação quanto devem estar isentas de quaisquer restrições de movimento que não sejam previstas no projeto. Do ponto de ancoragem (no solo subaquático) até o ponto de conexão com a monoboia as correntes formam a catenária, que precisa ser verificada.

Serviços de inspeção visual que antecedam cada início de conexão de navio aos dutos, através da monoboia, demandam a presença de mergulhadores nas estruturas submersas logo abaixo da monoboia. Essa tarefa é de frequência semanal, ou diária, conforme necessidade.

Os dutos submarinos são construídos em aço, atendendo às normas de *American Petrol Institute* (API), sobretudo a 5L (2004), que trata de construção de dutos em aço. No ambiente aquático, devido à baixa densidade do duto em relação à água, visto que é uma estrutura oca, frequentemente preenchida com petróleo ou derivados que são menos densos que a água, a tendência do equipamento é manter-se flutuando. Esse comportamento seria extremamente desastroso, pois deixaria os dutos à mercê das intempéries e sob esforços muito severos e constantes. Para contornar esse problema, os dutos são recobertos com a chamada jaqueta de concreto (em alguns casos também são empregados outros meios). Portanto a garantia da integridade dessa jaqueta é essencial para a segurança do duto.

Na engenharia de petróleo são largamente empregados equipamentos de inspeção que operam internamente aos dutos ou linhas internas (PETROBRÁS N-1487, 2011). Esses equipamentos são conhecidos como PIGs¹², e os dutos ou linhas através dos quais é possível operar essa ferramenta são conhecidos como “pigáveis”. Os PIGs são de diversas naturezas e adotam diversas tecnologias. PIGs de limpeza também são usados para preparar dutos ou linhas para a atividade de PIGs de inspeção ou para manter esses em condições operacionais. PIGs de inspeção são capazes de medir as condições dos dutos ou linhas internamente ou externamente, sendo o limite de inspeção a espessura da parede do duto ou da linha. Através da interpretação dos dados coletados é possível inferir a existência de falhas na jaqueta de concreto externa ao duto. Esses PIGs são deslocados pelo fluido do próprio duto e são dotados de odômetro, além de serem capazes de identificar algumas mudanças de direção, tanto longitudinais quanto axiais. No entanto, o erro dessas medições é ainda bastante grande, o que torna árdua a tarefa de identificar a exata posição onde se encontram os defeitos apontados na inspeção. Alguns defeitos identificados por esses equipamentos necessitam de inspeção mais rigorosa posterior, e para tal se faz necessária a localização exata do ponto do defeito. Em terra, a tarefa é simplificada pela acessibilidade ao duto ou à linha, mas em ambientes aquáticos o problema aumenta, principalmente devido às seguintes características:

- Presença da jaqueta de concreto, que impede a visualização e acesso à parede do duto;

¹² Não há consenso sobre a origem do termo, mas PIG é frequentemente relacionado como acrônimo de *Pipeline Inspection Gauge*.

- Dificuldade da identificação do ponto exato do defeito, devido à ineficácia do GPS nesses ambientes, à dificuldade em se encontrar pontos de referência e à imprecisão do odômetro do próprio PIG;
- Dificuldade adicional se encontra em ambientes marinhos de baixa visibilidade, onde até mesmo o emprego de mergulhadores é limitado.

3.3.1 Inspeção Submarina

A norma PETROBRÁS N-1487 (2011) lista as tarefas de inspeção em dutos rígidos submarinos, dentre as quais estão identificadas as seguintes:

1. Inspeção Externa do Trecho Submerso
 - Inspeção Visual
 - Aspectos do Solo Marinho
 - Condições de Enterramento
 - Estado dos Revestimentos
 - Presença de Incrustações e Sucata
 - Amassamentos
 - Corrosão Externa
 - Existência de Vazamentos
 - Existência de Vãos Livres
 - Condição do Calçamento
 - Movimentação de Duto não Aquecido
2. Inspeção do Sistema de Proteção Catódica (SPC)
3. Inspeção Submarina nas Regiões 1 e “Shore-Approach”
4. Inspeção Geológica e Geotécnica (Regiões 1 e “Shore Approach”)
 - Inspeções Periódicas
 - Inspeções Geológica e Geotécnica - Específicas
 - Levantamento do Traçado
5. Inspeção por “PIG” Instrumentado
 - Planejamento e Habilitação das Inspeções com “PIG” Instrumentado
 - Relatório de Inspeção do “PIG” Instrumentado

Todos esses serviços previstos na PETROBRÁS N-1487 (2011) são hoje executados com o auxílio de mergulhadores profissionais, com formação em inspeção e experiência no trabalho, e com embarcações com equipamentos específicos para as tarefas, tais como ecobatímetros, GPS etc.

Por depender de experiência, mais do que instrução formal, a formação de mergulhadores com capacidade para executar inspeções limita a oferta desses profissionais no mercado de trabalho.

E por serem a única alternativa comercial e de acesso direto hoje no mercado, a contratação desse serviço acaba passando por um processo de escolha que leva em consideração:

- Custo do serviço e os ganhos com a inspeção;
- Viabilidade de execução, sobretudo em questão da segurança;
- Diminuição da demanda, com simplificação dos planos de inspeções a serem realizadas, como aumento dos intervalos ou dispensa de serviços.

O intervalo entre inspeções, idealmente, é determinado pela confiabilidade desejada dos equipamentos ou sistemas a serem inspecionados.

Inspeções podem ser feitas para acompanhar o grau de degradação do equipamento, permitindo a manutenção corretiva do mesmo, caso seja necessária. Inspeções preventivas são essenciais para manter a proteção dos equipamentos, na medida em que evitam seu desgaste e sua falha em operação. Inspeções preditivas procuram identificar as falhas antes que ocorram, permitindo a ação prévia.

Por escolha dos profissionais de integridade, pode haver a opção de somente se utilizar de inspeções preditivas. A manutenção corretiva pode também ser viável para algumas situações.

Por estarem presentes em um ambiente sensível, os dutos e equipamentos submersos precisam operar com alta confiabilidade e não podem falhar em operação. Mesmo assim, o intervalo entre inspeções deve obedecer a uma razão econômica. O intervalo não pode ser pequeno o suficiente para que não haja qualquer mudança no equipamento, nesse caso a inspeção seria desnecessária. Nem o intervalo pode ser muito longo a ponto de não permitir qualquer ação de manutenção antes da falha a tempo. Esse tempo ideal entre falhas é determinado de acordo com o histórico do equipamento ou de equipamentos similares expostos a situações equivalentes, e tal levantamento só é possível com o uso de inspeções frequentes.

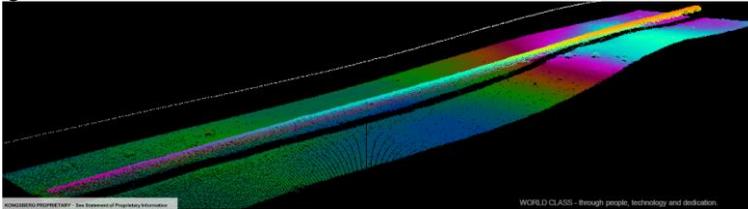
Serviços de batimetria normalmente ocorrem a intervalos de 5 anos, como determinado por norma, para os quais é solicitado relatório de levantamento geofísico e geológico do leito sob e vizinho aos dutos. Em áreas com conhecido tráfego de embarcações de grande porte ou de mudanças frequentes do terreno subaquático, o intervalo entre as

inspeções precisa ser menor, determinado por especialistas em integridade.

Os métodos utilizados são comerciais, como a batimetria multifeixe, sonar de varredura lateral e sísmica de reflexão monocanal de alta resolução, assim como coleta de amostras superficiais dos sedimentos do leito marinho.

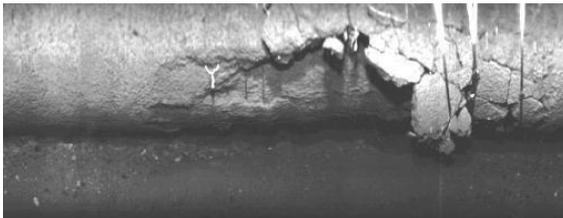
Situações de risco procuradas nessas inspeções são ocorrência de vãos livres ao longo do duto (como ilustrado na Figura 42) acúmulo de solo oceânico ao lado do duto ou o assoreamento do solo nas regiões vizinhas, incrustações sobre o duto, vazamentos, sucatas depositadas próximas aos dutos, identificação do tipo de leito sobre o quais as estruturas se encontram (solo arenoso, rochoso etc.). Vãos livres oferecem risco à instalação devido à combinação do momento gerado e esforço vertical, que submetem duto a uma carga que não fazia parte do projeto inicial. Visualmente, eles são facilmente detectados, porém no ambiente subaquático e em estruturas extensas essa tarefa não é simples.

Figura 42 - Vão livre em duto submarino.



Fonte: Hagen (2016).

Figura 43 - Exemplo de falha de revestimento de duto subaquático. Falha da jaqueta de concreto e do revestimento anticorrosivo.



Fonte: Norsk Elektro Optikk AS 2004 (2017).

Além de métodos mais tecnológicos, a observação direta é muito importante e nesse caso a presença de mergulhadores é, ainda, preponderante, se não insubstituível. Esse serviço recebe a ajuda de câmeras, que registram os trabalhos e permitem a criação de relatórios

descritivos. Em regiões onde os dutos são aparentes, ou seja, não estão enterrados ou cobertos por entulhos, as inspeções visuais permitem a identificação e dimensionamento de falhas de revestimento e até mesmo de defeitos visíveis a olho nu na superfície externa dos dutos, tais como perdas de massa por corrosão, mossas ou dobramentos.

3.3.2 Meios de proteção de dutos

É preciso assegurar que os meios de proteção das estruturas subaquáticas estejam em pleno funcionamento, dentro das condições esperadas, para garantia da integridade e continuidade operacional do sistema.

Os meios de proteção e as estruturas submersas são partes de um sistema integrado. Os meios normalmente usados na indústria do petróleo são sobre-espessura de corrosão, revestimento anticorrosivo, jaquetas de concreto (que aumentam a ancoragem subaquática), cobertura com solo e o sistema de proteção catódica.

Todo duto enterrado ou subaquático possui diversas barreiras de proteção de agentes externos que sejam nocivos à sua integridade. Os dutos terrestres modernos possuem, geralmente, as seguintes camadas:

- Sobre-espessura de corrosão, que é o excesso de material projetado para o próprio material de construção do duto, prevendo que haverá um desgaste do material com a corrosão e que isso não implicará na perda da resistência mecânica projetada para o equipamento
- Revestimento anticorrosivo, que visa impedir que agentes externos corrosivos, sobretudo solventes de qualquer natureza, tenham contato com a superfície metálica do duto e propiciem condições para um processo corrosivo (por ação físico-química). Atualmente são usados revestimentos conhecidos como de tripla camada (polietileno ou polipropileno, a depender do projeto), sendo a primeira camada, em epóxi, adjacente à superfície do duto e responsável pela proteção anticorrosiva em si. A segunda camada consiste em um meio de adesão para a terceira camada, que oferece proteção mecânica limitada contra qualquer tipo de choque que poderia danificar o revestimento na primeira camada. Devido a imperfeições próprias de qualquer material, além de defeitos causados pela aplicação do revestimento ou durante o lançamento

do duto ou sua operação, essa proteção não é completa e apresenta diversos pontos de ineficácia.

- Jaqueta de concreto, estrutura externa com armação metálica, aplicada sobre o revestimento do duto e que tem função de aumentar a resistência mecânica do duto, tanto contra choques como contra cargas externas ao duto, tais como provenientes de tráfego de veículos, além de servir de lastro para que o duto permaneça no fundo do corpo d'água (uma vez que o duto é oco e o fluido interno, petróleo ou derivado, é menos denso que a água, sem a jaqueta de concreto o duto tenderia a flutuar).
- Cobertura com solo, ou seja, os dutos são enterrados o que, portanto, torna mais difícil o acesso de qualquer elemento danoso ao próprio duto. Mesmo em ambientes aquáticos, é preferível que o duto esteja enterrado sob o solo do corpo d'água, pois isso o protege da ação direta de agentes externos, além de evitar o vão livre em trechos do duto, que podem gerar momentos que viriam a danificá-lo.
- Sistema de proteção catódica, que é um meio de compensar as imperfeições ou falhas no revestimento anticorrosivo onde ele não protege a parede do duto em dutos enterrados ou subaquáticos. A proteção catódica de um duto é atingida através do fornecimento de uma corrente contínua suficiente para a superfície externa do tubo, de modo que o potencial tubo-eletrólito é diminuído a valores em que a corrosão externa é reduzida a taxas insignificantes (ABNT NBR ISO 15589, 2016). Proteção catódica é normalmente utilizada em conjunto com um sistema de revestimento protetor adequado a proteger a superfície externa de dutos de aço da corrosão (ABNT NBR ISO 15589, 2016). Esse sistema atua no princípio de controle do fluxo elétrico e de íons onde há formação de pilha corrosiva. O sistema ativo utiliza-se da injeção de corrente contínua elétrica na estrutura e a presença de anodos de sacrifício para proteger o metal de construção do duto. O sistema passivo conta tão somente com anodos de sacrifício, mas utiliza-se do mesmo princípio de proteção. Em ambos os casos, os anodos de sacrifício se deterioram com o tempo mantendo, assim, a superfície da

estrutura protegida. Tanto o potencial eletrolítico, a corrente que circula no sistema e o tamanho dos anodos precisam ser inspecionados regularmente para verificação de sua eficácia.

Outras estruturas (que não são dutos, tais como monoboias, PLEM, amarras etc.) também adotam proteções similares, tais como revestimentos anticorrosivos e proteção catódica.

A manutenção da integridade ou do correto funcionamento dessas proteções visa assegurar as estruturas e equipamentos que elas protegem. Portanto, inspeções e manutenções são previstas para as proteções.

A sobre-espessura de corrosão é monitorada através da medição de espessura da parede do duto, que normalmente é realizada internamente ao duto através de PIG instrumentado por ultrassom, e medições localizadas podem ser executadas com medidores de espessura por ultrassom.

Revestimento anticorrosivo e jaqueta de concreto são inspecionados visualmente, onde é possível, e através de tato, onde há pouco visibilidade, sempre com uso de mergulhadores. No caso de dutos enterrados, tal medição fica impossibilitada, pois necessita do acesso direto ao equipamento.

Inspeções do sistema de proteção catódica, sobretudo os de corrente impressa, podem detectar falhas de revestimento devido ao comportamento da corrente no local onde há a falha (a corrente tende a atuar sobre a região com falha, portanto ela será maior naquela vizinhança). Essas inspeções exigem mão-de-obra treinada e equipamentos específicos, como exposto no item a seguir.

Os pontos de falha de revestimento anticorrosivo são concentradores de tensão, onde o duto tem maior potencial de corrosão. No entanto, devido à presença da proteção catódica, essas falhas podem ser contornadas até certo grau.

As falhas na jaqueta de concreto, além de expor de maneira não prevista o revestimento corrosivo, expõem o duto a choques com elementos que se deslocam pelo leito marinho, como lastros de linha de pesca, âncoras, materiais lançados ao mar etc.

3.3.3 Inspeções no sistema de proteção catódica

A norma ABNT NBR ISO 15589 (2016) define parâmetros para o sistema de proteção catódica para dutos da indústria de petróleo e gás, incluindo dutos submarinos.

Um descritivo básico do sistema de proteção catódica para um duto submarino de até 8km de comprimento, sem correntes de interferência (tais como linhas férreas, aterramentos etc.) consiste do seguinte

- Retificador, geralmente localizado em terra;
- Anodos de sacrifício, também disposto em terra;
- Pontos de teste ao longo do duto;
- Juntas isolantes (isolam as regiões a receberem proteção daquelas que não necessitam);
- Dispositivo de Proteção de Junta Isolante, para proteção contra descargas atmosféricas.

Esses elementos são dimensionados de acordo com as características dos equipamentos que protegem, mas podem precisar ser melhorados com o tempo, devido à deterioração dos próprios elementos ou do equipamento, como também da alteração do ambiente em que estão instalados.

Para verificar a eficácia da proteção catódica, cada elemento é submetido a inspeções periódicas que visam verificar grandezas de controle que indiquem o estado da proteção. Visando tão somente o trabalho subaquático, a única inspeção a ser feita é a de medição de potencial ao longo do duto, feita a partir de pontos de teste, em um caso ideal, ou a partir de qualquer ponto de contato com a superfície do duto, tal como aberturas no revestimento.

Para isso é utilizada uma semicélula eletrolítica, um eletrodo referência¹³ que, para ambientes marinhos, é formada por prata, cloreto de prata e água marinha (Ag/AgCl+Água marinha). Esse eletrodo precisa ser levado próximo ao duto e água precisa fluir através dele.

Um conector positivo é ligado entre a célula e um voltímetro para corrente contínua, com as seguintes características:

- “Voltímetro de corrente contínua para inspeção de sistemas de Proteção Catódica devem ter precisão de $\pm 5\text{mV}$ na faixa de 0V a 10V (para medições de potencial) e uma precisão de $\pm 0,5\text{mV}$ na faixa de 0V a 1V (para

¹³ “Eletrodo de referência de prata/cloreto de prata saturado usado em água do mar de 25 Ωcm ” (Fonte: ABNT NBR ISO 15589).

medições de gradiente), além de uma impedância de entrada mínima de $10M\Omega$ ” (ABNT NBR ISO 15589, 2016).

Outro conector, negativo, é ligado entre o voltímetro e o duto. Dessa forma é medido o potencial.

A leitura para o qual o potencial de proteção é $-800mV$ (ABNT NBR ISO 15589, 2016), medição instantânea quando o retificador é desligado (medição OFF). A medição com o retificar ligado (ON) também é uma grandeza importante, pois pode medir tanto a eficiência dos anodos, a falha de revestimento, dentre outras possibilidades. Para isso, o retificador tem a capacidade de gerar uma corrente alternada específica para medição.

A norma PETROBRÁS N-1487 (2011) já prevê o uso de ROV para medição de potencial em trechos horizontais de dutos (identificados como Região 1¹⁴):

“7.4.2.1 O potencial eletroquímico do duto pode ser medido segundo as técnicas a seguir:

a) técnica de medição por contato - semi-célula em contato metálico com o duto: esta técnica permite registrar o potencial do duto durante a inspeção;

b) técnica do eletrodo remoto: nesta técnica o perfil de potencial é levantado sem o contato metálico com o duto, mas através da medição da diferença de potencial entre duas semi-células de Ag/AgCl água do mar, onde uma é instalada remotamente e a outra junto ao duto.

7.4.2.2 Inspeção do SPC na Região 1

7.4.2.2.1 Deve ser feita a medição de potencial eletroquímico remoto com ROV. A semi-célula remota deve ser posicionada a, no mínimo, 3 m das outras semi-células.

7.4.2.2.2 Deve ser medido o potencial eletroquímico por contato com ROV, no mínimo, nos três primeiros anodos, nos três últimos, e a cada 1 000 m de modo a calibrar o sistema de medição de potencial eletroquímico remoto.

NOTA Quando a inspeção não for realizada por ROV o potencial pode ser medido pontualmente por contato metálico. O número de pontos a serem

¹⁴ Região 1: Trecho do Duto Rígido estático, posicionado sobre o leito marinho.

medidos deverá possibilitar a avaliação do SPC ao longo do duto.

7.4.2.2.3 Deve ser medido o potencial eletroquímico por contato, onde houver danos no revestimento com exposição da superfície metálica, em válvulas, em extremidades do duto (flange de interligação) e em acessórios.

7.4.2.2.4 O gradiente de campo elétrico deve ser medido ao longo do duto quando a inspeção for realizada com ROV utilizando a técnica remota.

NOTA Esta técnica consiste no levantamento do gradiente de campo elétrico ao longo do duto, através da medição da diferença de potencial entre duas semi-células de Ag/AgCl água do mar fixadas a uma distância constante e conhecida, mantendo o conjunto perpendicular ao duto. O objetivo desta técnica é obter informações sobre a saída de corrente do anodo, vida remanescente do anodo, passivação dos anodos, regiões subprotegidas e indicação de falhas no revestimento ou revestimento de boa qualidade.” (PETROBRÁS N-1487, 2011).

3.4 Inspeção e manutenção com mergulhadores

Estruturas e equipamentos submarinos demandam uma gama de serviços de inspeção e manutenção muito similar aos prestados em terra, que podem ser ainda mais numerosos devido tanto à taxa maior de deterioração causada pelo ambiente hostil da água marinha quanto à sensibilidade do meio a eventuais danos causados por acidentes.

A necessidade de serviços em equipamentos subaquáticos hoje é atendida por profissionais de mergulho, que são capazes tanto de inspecionar quanto de interagir com os equipamentos.

Considerando os equipamentos para os quais são direcionadas as soluções almejadas neste trabalho, há uma rotina esperada de serviços que são regularmente executados, além daqueles esporádicos ou emergenciais.

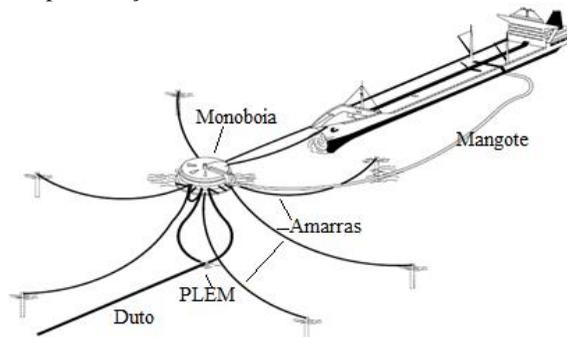
Grande parte desses serviços são na realidade inspeções, com periodicidades e finalidades diferentes.

Os equipamentos a que se referem tais serviços são:

- Mangotes de superfície (tubo flexível);
- Monoboia (sistema flutuante de descarga de navios);
- Amarras;

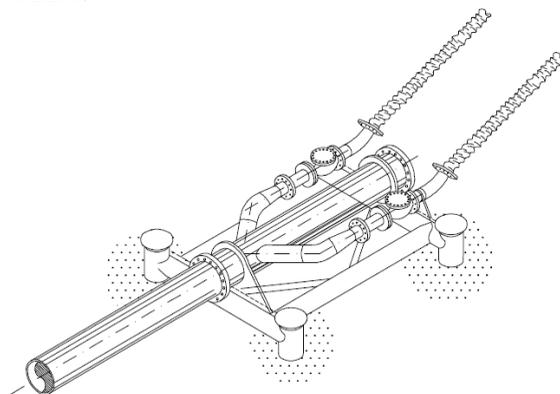
- Mangote vertical (tubo flexível);
- Coletor de extremidade de duto submarino (PLEM, abreviatura do inglês *PipeLine End Manifold*);
- Dutos.

Figura 44 - Representação de duto, monoboia, PLEM, amarras e mangote.



Fonte: norma PETROBRÁS N-1812 (2006).

Figura 45 - PLEM.



Fonte: norma PETROBRÁS N-1812.

Entre a monoboia e os navios ocorre a amarração e a conexão dos mangotes de descarga do navio em intervalos não definidos, cerca de 14 vezes por mês. Essa atividade é considerada delicada, por isso são empregados mergulhadores para uma inspeção prévia à amarração do navio. Como a chegada do navio pode ser prevista com alguns dias de antecedência, a mobilização dos mergulhadores é feita de acordo com essa previsão, o que pode ocorrer inclusive nos finais de semana. Durante

essa inspeção, cabe aos mergulhadores verificar o ponto de toque com o fundo do oceano das correntes de amarração da monoboia, as condições físicas e visuais do PLEM, do duto vertical, da monoboia, e dos mangotes. Durante as primeiras horas da descarga do navio, os mergulhadores ficarão mobilizados no barco. Normalmente, a tarefa no mar dura de 40 minutos a uma hora, com o emprego de dois mergulhadores.

Dois normas procuram delimitar as condições necessárias para o mergulho profissional no Brasil, sendo a NORMAM¹⁵ 15 (2016) e a Norma Regulamentadora 15 (NR-15, 2015), algumas das características principais serão apresentadas em seguida.

Um grande risco a que os mergulhadores se expõem são as doenças descompressivas.

Todo mergulho realizado até a profundidade de cinquenta metros e que utiliza ar comprimido como mistura respiratória é considerado um mergulho raso (NORMAM 15, 2016), que compreende o objeto em estudo está a 23 metros de profundidade.

Na NORMAM 15 (2016), há uma importante divisão nas tarefas de mergulho que é:

- Mergulho com descompressão¹⁶, no qual o mergulhador, após o mergulho com certas condições, precisa passar por um processo de descompressão em ambiente controlado para evitar doenças descompressivas, potencialmente fatais. A vantagem desse tipo de mergulho é permitir o atingimento de maiores profundidades e um tempo de mergulho mais longo (intervalo entre o momento que o mergulhador atinge a profundidade desejada e o momento em que ele retorna à superfície, em ascensão controlada);
- Mergulho sem descompressão, que limita a profundidade e o tempo que o mergulhador pode permanecer embaixo d'água (incluindo a ascensão controlada) a valores necessários para evitar doenças descompressivas.

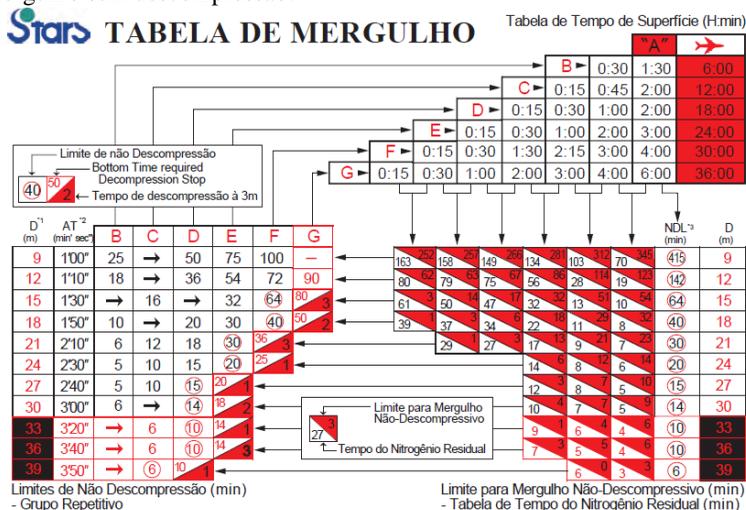
As atividades atendidas nos serviços aqui citados são todas em mergulho autônomo (com o uso de cilindros com ar comprimido e respiradores), raso e sem descompressão. A profundidade aproximada na

¹⁵ NORMAM: Normas da Autoridade Marítima

¹⁶ Descompressão: Procedimento por meio do qual um mergulhador elimina do seu organismo o gás inerte absorvido durante exposição a condições hiperbáricas, sendo absolutamente necessário antes do seu retorno à pressão atmosférica, objetivando a preservação da sua integridade física (Fonte: NORMAM 15, 2016).

região da monoboia é de 23 metros, considerada como sendo a máxima em toda a extensão dos equipamentos. Considerando a Figura 46, o tempo máximo de mergulho sem descompressão é de 20 minutos para a profundidade definida como máxima.

Figura 46 - Tabela de Mergulho para mergulho com descompressão e mergulho sem descompressão.



Fonte: Stars Net-Diver School (2006).

Por exigência presente na NR-15 (2015), a equipe mobilizada para o mergulho, considerando os dois mergulhadores normalmente empregados na tarefa para torná-la mais ágil, seria de 6 pessoas. Para esse serviço é necessária que haja uma câmara hiperbárica até 1 hora de deslocamento do local de mergulho (NORMAM 15, 2016). Portanto, a câmara geralmente encontra-se na própria embarcação. A NORMAM 15 (2016) define câmara hiperbárica como um vaso de pressão especialmente projetado para a ocupação humana, no qual os ocupantes podem ser submetidos a condições hiperbáricas, sendo utilizada tanto para descompressão dos mergulhadores, como para tratamento de acidentes hiperbáricos.

Outras inspeções que são executadas pelos mergulhadores são as semestrais, mais detalhadas que as de amarração, nos mesmos equipamentos. Enquanto que na inspeção de amarração os mergulhadores estão mais focados na segurança da operação, na semestral a inspeção é

mais detalhada, com preocupação maior no registro e comparativo de evolução do estado dos equipamentos.

Semestralmente é feito o levantamento de proteção catódica somente da monoboia e dutos na região próxima à monoboia.

A cada cinco anos embarcações e mergulhadores são empregados para uma inspeção completa nos dutos, inclusive externamente, quando mergulhadores podem observar alguns trechos previamente selecionados, assim como materiais próximos que possam vir a ser prejudiciais à integridade dos equipamentos. Previamente à inspeção com mergulhadores, é executada a batimetria, que fornece dados de condições externas ao duto. Isso permite um planejamento para o emprego posterior de mergulhadores, pois são identificadas as regiões mais preocupantes, como os pontos dos dutos que estão em balanço e as falhas de revestimento de concreto.

Também a cada cinco anos, aproximadamente, é feita a inspeção interna dos dutos, com o uso de PIGs instrumentados que utilizam diferentes princípios para executar a varredura da parede dos dutos assim como determinar a localização aproximada de defeitos. Devido a erros inerentes ao método de inspeção, alguns defeitos precisam ser verificados com meios mais precisos diretamente no ponto identificado, estabelecendo a correlação entre as leituras. Geralmente, os defeitos considerados mais críticos são os escolhidos para serem verificados por correlação. A localização precisa dos defeitos é difícil, pois os dados do PIG não são precisos o suficiente e a identificação externa do ponto procurado é muito difícil, sendo facilitada por juntas de campo ou marcos localizadores. Onde o revestimento externo ou a superfície do duto é exposto, é possível utilizar as soldas circunferenciais dos dutos como referência, pois o próprio PIG consegue detectá-las. Nos outros casos, quando é mais difícil a identificação, a localização é mais dispendiosa pois necessita ou a remoção da jaqueta de concreto ou de outros meios de tecnologia mais desenvolvida. Como alternativa, é possível utilizar marcos magnéticos externos que são detectados pelo PIG internamente e visualmente externamente.

A localização precisa com o uso do GPS, por exemplo, sofre com grandes erros, pois o alcance dessa tecnologia fica restrito à superfície da água. Para o ambiente subaquático, o único meio de emprego do GPS seria por cálculo da posição relativa ao sensor de superfície.

Um método comumente utilizado por mergulhadores é o de queda vertical de um objeto de controle, unicamente contando com a gravidade para garantir a perpendicularidade. Esse método, no entanto, sofre com a interferência das correntes marinhas ou ondas, além da própria

hidrodinâmica do objeto. Apesar de não tão precisas, tais técnicas adotadas por profissionais do mergulho acabam gerando bons resultados, pois norteiam a busca e diminuem o erro ao estreitarem a área de busca.

A Tabela 8 resume as inspeções planejadas regulares a serem executadas por mergulhadores nos equipamentos subaquáticos.

Tabela 8 - Tabela resumo de inspeções em equipamentos e intervalos.

Inspeção necessária	Equipamento	Intervalo
Pré-amarração	Amarras	A cada evento (aprox. 1 dia)
	PLEM	
	Monoboia	
	Mangotes	
Preventiva	Amarras	Mensal
	PLEM	
	Monoboia	
	Mangotes	
Sistema de proteção catódica	Monoboia	Semestral
	PLEM	Semestral
	Dutos	Semestral
Inspeção externa	Dutos	5 anos
Correlação de inspeções internas	Dutos	5 anos

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para executar qualquer uma das tarefas descritas, os mergulhadores contam sobretudo meios visuais e com o auxílio de câmeras ou o tato, quando não há condições visuais, mais raramente são utilizados outros meios de medição, como trenas e medidores de espessura ultrassônicos para pontos localizados. Normalmente um alcance visual de 0,5m até 3m permite o uso das ferramentas visuais. No entanto, há áreas costeiras onde o horizonte visual é nulo, e o trabalho conta tão somente com a destreza do mergulhador em sua habilidade táctil.

Outras condições necessárias para o trabalho dos mergulhadores são relativas ao clima e à água. Existem canais na internet com dados precisos e confiáveis para consulta pública (como o Windguru¹⁷) das

¹⁷ www.windguru.com

condições de mar e de clima para os momentos de mergulho. É muito importante para a navegação e para o mergulho o conhecimento da ocorrência de ventos, que sobretudo influenciam a navegabilidade e, em certa parte, a visibilidade dentro d'água. Também condições de correntes oceânicas, das ondas e das marés são capazes de impedir o trabalho de mergulhadores, principalmente devido à dificuldade de navegação.

3.5 Comentários sobre o capítulo

A descrição de um cenário modelado como reflexo da realidade permite a criação de modelos e testes que coloquem à prova a ferramenta que será proposta. Iniciativas de pesquisa puderam criar ambientes de teste a partir do conhecimento da realidade de campo. Os traçados e perfis apresentados são modelos que demonstram o relevo e o desenho do equipamento a ser inspecionado e orientam o desenvolvimento do projeto do produto e da trajetória.

O mar é um meio instável e que impõe diversas dificuldades que precisam ser previstas, além de determinar condições sinóticas como físicas (temperatura e densidade). A turbidez é fator determinante para a escolha do método de inspeção, pois pode coibir o uso de técnicas que envolvam a luz visível. A medição de turbidez é executada em corridas preliminares, conjuntamente a outros sensores como CTD e pressão.

As rotinas de inspeção, atualmente, consomem muitas horas de mergulho. Por ser um ambiente de ecologia sensível e extremamente nocivo aos equipamentos industriais, a necessidade de inspeção é constante. Tais equipamentos exigem um alto nível de confiabilidade, mantendo-se, em consequência um alto grau de integridade.

As necessidades de inspeção são apresentadas para subsídio à escolha dos sensores necessários para o veículo a ser proposto. Ainda hoje essa tarefa é executada quase que exclusivamente por mergulhadores, que atuam mesmo em situações de risco aumentado, como em baixa visibilidade, agitação do mar, com presença de embarcações próximas ou situações de emergência. A possibilidade de substituição desses trabalhadores por outras técnicas que não envolvam a presença humana é um dos motivadores centrais deste estudo.

4 PROJETO DE PRODUTO: AUV PARA INSPEÇÃO EM ÁGUAS RASAS

Conforme foi definido no item 1.8.2, um dos objetivos específicos deste trabalho é de ajudar a desenvolver uma plataforma para um veículo subaquático não tripulado que seja capaz de executar tarefas de inspeção, desde simples inspeções visuais, através de câmeras, até diagnósticos mais precisos com uso de instrumentos mais sofisticados e uso de análise ou tratamento posterior que exijam algum poder e tempo computacional.

Parte das informações para a fase de Planejamento (prevista no PRODIP) foi apresentada no capítulo 1, no qual foram expostos critérios para a seleção do AUV como UUV adequado. Argumentos que corroboram a avaliação qualitativa apresentada na Tabela 3 (página 14) foram apresentados nos capítulos 2 (uso de sensores e características de serviço) e 3 (tipos de inspeção e ambiente).

Neste capítulo serão apresentados requisitos de projeto com base nas características dos sensores (capítulo 2) capazes de atender às condições de serviço (capítulo 3).

A proposta do veículo será construída com o auxílio da metodologia de Back *et al.* (2008), e será apresentada no final deste capítulo. Arranjos de sensores e a configuração adaptável às condições que atendam ao cliente também são propostas, baseadas no aprendizado agregado a partir da pesquisa de literatura e da consulta do ambiente de serviço e dos profissionais envolvidos.

O projeto informacional define as especificações de projeto de produto. As entradas relevantes são fornecidas pelos clientes, e relações com produtos de referência do mercado e os objetivos definidos pelo projeto definem características do produto a ser projetado. A Casa da Qualidade é uma ferramenta bastante difundida e que sintetiza a análise.

As funções elementares são escolhidas no projeto conceitual, que determinam as tecnologias próprias para as funções e é gerada uma concepção do projeto do produto.

A continuidade do desenvolvimento do projeto do produto, com projeto preliminar, protótipo, projeto detalhado e produção não fazem parte do escopo deste trabalho. A razão para essa limitação é que haveria a necessidade de se estender a pesquisa a produtos comerciais, incluindo fornecedores e custos, projeto eletrônico, montagem e testes, que precisam de recursos definidos e da aprovação do cliente para implementação.

Para o AUV, as limitações do sensoriamento não são tão relevantes quanto o desafio de autonomia, pois tecnologias para sensores já são amplamente desenvolvidas pelo mercado e estão perenemente em evolução. O maior desafio é integrar a tecnologia existente a uma ferramenta que execute suas funções com autonomia, sobretudo em ambientes não controlados (como o marinho). Esse veículo precisa coletar e processar dados em tempo suficiente para que ele mesmo possa reagir, caso seja necessário.

Na seção 2 foram listadas diversas tecnologias utilizadas hoje pelo mercado para investigação submarina. Não é a limitação tecnológica uma barreira para a implementação de um veículo autônomo para a execução de tarefas subaquáticas, pois as diversas técnicas e ferramentas atuais cobrem um amplo espectro de necessidades e possibilidades de inspeção. Existe hoje, portanto, a oportunidade de se identificar no ambiente subaquático muitos dos traços e aspectos buscados para um diagnóstico, quer seja do ambiente sob a superfície aquática, quanto de equipamentos e estruturas.

Diversas iniciativas já estão em uso pelo mercado ou por centros de pesquisa, alguns já listados por Sørensen e Ludvigsen (2015), Hagen (2016), Copros e Scourzic (2011) e Tipsuwan e Hoonsuwan (2015). A aplicação de cada uma dessas ferramentas tem objetivos diversos. Enquanto os primeiros são I-AUV, com diferenças mesmo entre eles como aplicação e características relevantes, tais como tamanho e capacidade de serviço e carga; para os outros, equipamentos deveras robustos e capazes de trabalhar em tarefas desafiadoras, como em grandes profundidades e de longo alcance. Tipsuwan e Hoonsuwan (2015) apresenta um AUV em desenvolvimento com similaridades com ROVs, o que lhe permite uma maior habilidade de manobra, comprometendo, no entanto, sua velocidade e alcance.

Tais experiências demonstram que uma ferramenta com algum grau de autonomia tem potencial de executar tarefas como de inspeção no ambiente aquático com resultados satisfatórios de tal modo que essa demanda já é explorada como atividade econômica por algumas companhias.

Autonomia avançada pode ser alcançada se os dados de sensores de carga forem processados embarcados o mais próximo do tempo real possível. Se dados coletados não estiverem de acordo com os dados requeridos, a aquisição de novos dados pode ser efetuada, de acordo com Sørensen e Ludvigsen (2015) A resposta pode ser usada para o

controlador ajustar a área de amostra, ou a frequência de trabalho ou alcance. Essa estratégia é seguida com o seguinte escopo, de modo a aprimorar o nível de autonomia:

- Modelamento matemático através da integração de conhecimentos de diferentes domínios, usados em todas as tarefas: projeto, simulação, monitoramento em tempo real, decisão e controle. Estado e parâmetros serão estimados com o uso de dados coletados em tempo real, atualizando os modelos para detectar mudanças esperadas ou não;
- Fusão de sensores avançados para percepção do ambiente e de qualquer objeto de interesse, incluindo integração de sensores de imagens óticas, acústicas e de radares com dados inerciais e de navegação, melhorando a precisão e a localização dos objetos de estudo;
- Otimização não linear baseada em modelo e controle híbrido, com controle coordenado e rede de comunicação robusta, em ambientes complexos com operações simultâneas, robótica e rede sensores móveis;
- Orientação e planejamento de trajetória integrados com planejamento de missão em alto nível a ser alcançado usando otimização numérica onde dados, decisões, regras e modelos são representados como restrições, assim como algoritmos de busca discreta e inteligência computacional.

Controle reconfigurável e replanejamento de trajetória e de missão são objetivos a serem buscados, tendo como base comando com controle inteligente e execução de tarefa com detecção de obstáculos, falhas e diagnóstico.

Apesar do avanço tecnológico atingido, do potencial de economia na área, do aumento da segurança na execução do serviço subaquático que pode ser conseguido e do ganho de integridade e velocidade que uma ferramenta como um UUV pode oferecer, a própria indústria ainda tem resistência para adotar essa solução. Esse comportamento deve-se, em parte, à falta de intimidade dos profissionais com essa tecnologia, de outra parte existem diversas barreiras ainda a serem transpostas, como comunicação, navegação precisa para alcance curto (necessidade de aproximação à estrutura) e automação da própria intervenção (SØRENSEN e LUDVIGSEN, 2015).

A introdução de uma ferramenta acessível pode servir para popularizar o uso de UUVs. A modernização dos padrões de operação e normas de inspeção daria legitimidade ao emprego dessas ferramentas. Com esse intuito, veículos autônomos oferecem a vantagem de dispensar a mobilização de uma equipe de apoio em tempo integral e de não necessitar de um operador treinado.

O nível de interação humana necessário para a execução da missão definida, das complexidades previstas e do ambiente definem o nível de autonomia esperado para o veículo. A depender do estado entre comando manual ou remoto, teleoperação, semiautonomia a veículos totalmente autônomos, que, por sua vez, há diferentes definições para níveis de autonomia, como proposto por Sørensen e Ludvigsen (2015).

Trabalhos como os realizados na Universidade de Girona, descrito por Hurtós *et al.* (2014), onde foi desenvolvida e testada uma plataforma de docagem subaquática para IAUVs. O uso desse tipo de plataforma torna o veículo bastante acessível para uso no momento adequado (base de lançamento), inclusive diminuindo o tempo hábil necessário para essa tarefa, facilita sua integração às tarefas de manutenção e inspeção além de proporcionar uma estação para carregamento de energia e transferência de dados, o que aumenta a autonomia do veículo. Também permite a operação em ambientes mais hostis, que impeçam o resgate e lançamento contínuo do veículo (SØRENSEN e LUDVIGSEN, 2015).

4.1 Sensoriamento

Um veículo autônomo deve ser capaz de reconhecer o meio a que está inserido, detectar elementos e diferenciá-los, reconhecer limites e pontos de controle e manter trajetória. O emprego de SLAM é essencial pois além da necessidade de se localizar no ambiente, o veículo precisa identificar os pontos de interesse à medida em que se desloca e executa a coleta de dados. O SLAM exige, por conseguinte, o processamento em tempo real dos dados recebidos e seu registro em consonância ao dado coletado.

Sørensen e Ludvigsen (2015) propõem uma abordagem em direção à autonomia conhecida pelo termo *bottom-up*, que significa que se inicia pelo controle mais simples até atingir o mais elaborado, com três níveis de controle definidos:

- Planejamento de missão: define o objetivo da missão e seu planejamento, onde são previstos adaptabilidade a contingências. Sensores de serviço, análises de dados e outras entradas necessárias podem modificar a missão. É

- o primeiro nível e mais simples, leva em consideração apenas as condições pré-existentes e de contorno;
- Diretriz e otimização: trata de pontos de controle e comandos de referência para o controlador. Passa a agir sobre a programação do veículo.
 - Execução do controle: controles de planta (estrutura sob inspeção) e de atuadores entram em ação. Concerne a adaptação do objeto sob inspeção, algo que nem sempre é pertinente.

Levando em consideração que o uso de inteligência artificial exige uma capacidade de processamento que normalmente não condiz com os processadores instalados em UUVs e consome energia adicional, uma abordagem mais simples pode trazer resultados compatíveis com os esperados, que é o uso de mapas e padrões de reconhecimento. Isso exige um mapeamento prévio da área da missão e a programação dos padrões para o reconhecimento pelo veículo. Esses são subsídios para o planejamento da missão, que precisa ser executada com cuidado, por isso os dados disponíveis devem ter a precisão adequada.

O mapeamento pode ser executado com ferramentas de inspeção instalados no veículo em corridas prévias. Algumas dessas ferramentas podem ser consideradas primárias, pois têm maior alcance e capacidade de detecção de estruturas, mesmo tendo menor precisão dimensional.

A Tabela 9, proposta por Kros (2011), sintetiza subsídios para a aplicação de técnicas de inspeção em modos de falha comuns em dutos. Outro dado importante da tabela é a velocidade do veículo para aquisição de dados. É interessante observar a velocidade superior que o SVL utiliza para executar a aquisição de dados, algo muito relevante em diversas situações, como em emergências. Às regiões de sombras geradas é possível que o autor tenha atribuído a baixa adaptação do SVL aos serviços (como o de monitoramento de vão livre).

Tabela 9 - Requerimentos de inspeção por técnica de inspeção

	Velocidade de aquisição	Monitoramento de cruzamento de duto	Identificação de depleção de anodo	Monitoramento do revestimento do duto	Arranhões e mossas no duto	Monitoramento de vão livre	Determinação de perfil de corrosão
SVL	5 nós						
Vídeo Inspeção com multicâmera	1,5 nó	X	X	X	X	X	
Vídeo e Ecobatimetria Multifeixe	1,5 nó	X	X	X	X	X	
Vídeo, Ecobatimetria Multifeixe e Monitoramento Contínuo de Proteção Catódica	1 a 1,5 nó	X	X	X	X	X	X

Fonte: Kros (2011)

O magnetômetro tem a capacidade de mapear por completo estruturas ferromagnéticas discretas ou extensas, com a vantagem de evitar descontinuidade de medição quando a estrutura não estiver acessível diretamente, como, por exemplo, enterrada. Pode ser adaptada adequadamente para o mapeamento prévio, que seria utilizado posteriormente no SLAM, e para levantamento do traçado de estruturas contínuas. Considerando um veículo modular, com menor capacidade de processamento, menor massa e, por conseguinte, menor exigência de fornecimento de energia, a magnetometria seria introduzida como um módulo de uma primeira corrida do veículo, os dados adquiridos seriam integrados ao sistema de localização e traçado e os resultados forneceriam subsídios para a criação de um mapa do traçado que seria usado para corridas posteriores.

A medição das condições da água é indispensável para se poder utilizar qualquer metrologia que envolva acústica. Devido à variação da densidade com a temperatura, esta última grandeza deve ser monitorada, já que a velocidade do som é função da densidade da água¹⁸.

¹⁸ A velocidade do som é função da densidade do fluido (NDT RESOURCE CENTER, 2017): $V = \sqrt{\delta P / \delta \rho}$, onde V é a velocidade do

Métodos de localização subaquática, como o DVL, LBL, SBL e USBL, todos precisam ter conhecida a velocidade do som no meio. Esses, no entanto, estariam incluídos em um módulo de localização.

Portanto, as presenças de sensores CTD e pressão devem ser previstas para cada corrida com sensores acústicos.

Adicionalmente, a medição da profundidade tem diversas motivações:

- Uma vez que qualquer medição de distância entre o veículo e qualquer outro ponto será relativa, ou seja, será o resultado da diferença de posição entre o veículo e o ponto, é necessário conhecer a profundidade na qual se encontra;
- A profundidade também é dado importante para localização global do veículo, sendo utilizado para o cálculo do sistema de navegação inercial ou de ponto isolado;
- A necessidade em se manter a posição em deslocamentos a uma distância prevista entre o veículo (em movimento) e as estruturas ou solo (em repouso) impõe o controle da profundidade, e, para que isso seja possível, esta precisa ser conhecida.

Em conjunto com os sensores do estado da água, os sensores acústicos assumem o papel de inspecionar o ambiente subaquático.

A depender do objetivo da inspeção, será utilizada a ferramenta mais adequada para compor um módulo acústico. Definir como utilizar o módulo acústico será, portanto, função do resultado esperado, como exemplo, levantamento do solo oceânico, identificação de traçado, reconhecimento de defeitos etc. Ferramentas acústicas são bastante eficientes em ambientes onde inspeções visuais são difíceis, como águas com alta turbidez.

som; δP é a diferença de pressão entre uma molécula afetada pela vibração (causada pelo som) e a seguinte, ainda em repouso; e $\delta \rho$ representa a diferença de densidade entre a molécula que vibra e a molécula vizinha em repouso. A propagação do som em um meio se explica pelo Princípio Huygens-Fresnel: cada molécula de fluido, ao vibrar, transmite para a vizinha a sua oscilação, se comportando como uma nova fonte sonora.

A ecobatimetria é muito útil para um levantamento do leito subaquático com alto grau de precisão e boa cobertura. Os dados coletados também podem servir para aprimorar o mapa gerado com os dados da magnetometria. Na seção 3.3 foi apresentado o plano de inspeção semestral para ambientes subaquáticos, sobretudo para aqueles onde há grande fluxo de embarcações, e, como apresentado por Floriani (2013), o uso de AUVs para o levantamento batimétrico é promissor. Essa solução tem potencial de redução de custos, diminuição de prazos, diminuição de intervalo entre inspeções e aumento de cobertura para o serviço em questão.

Outro método de investigação acústica, o Sonar de Varredura Lateral (ou *Side Scan Sonar*), seria complementar e a ser utilizado em serviços sob demanda, quando há o interesse em um monitoramento específico que exijam boa resolução, como identificar objetos de interesse, defeitos ou situações de risco, como falta de apoio das estruturas ou dutos em balanço. Trabalhos como os descritos por Hagen (2014) são excelentes exemplos dessa aplicação. O SVL tem a desvantagem de gerar uma área de sombra atrás do objeto inspecionado o que, em alguns casos, pode atrapalhar o resultado (a sombra pode tornar difícil diferenciar os contornos de objetos).

O SBP¹⁹ é um serviço que pode ser utilizado para aprimorar os resultados atingidos pelo magnetômetro, tendo em vista que o primeiro possui melhor precisão que este último. Outra vantagem é captar sinais de resposta que sejam de objetos não metálicos, muito útil em investigações arqueológicas. Além disso podem ajudar a caracterizar o solo oceânico em suas camadas subsuperficiais, e entender essas camadas pode influenciar o estudo da evolução do solo (por exemplo, solos pouco compactados são mais suscetíveis a mudanças, sobretudo, pela ação direta das correntes aquáticas).

O uso de SAS²⁰, como o apresentado por Hagen (2014), oferece uma busca com resolução melhorada para técnicas acústicas. Os resultados são muito úteis devido aos detalhes conseguidos, por isso é empregado para investigações arqueológicas. Suas vantagens sobre o ²¹SVL ainda incluem uma melhor área de cobertura e identificação de contornos.

¹⁹ *Sub Bottom Profiler*

²⁰ *Synthetic Aperture Sonar*

²¹ Sonar de Varredura Lateral

O uso de câmeras para equipar um dos módulos do veículo é uma forma de aprimorar a inspeção para uma corrida posterior.

As primeiras corridas contariam, portanto, com tecnologias de menor resolução que, em contrapartida, fornecem dados que servem para criar mapas cada vez mais nítidos. Tais mapas permitem que inspeções consequentes possam ser executadas com maior proximidade com o objeto (pois o risco de colisão é menor), melhorando a qualidade dos dados a serem obtidos. No entanto, tal aproximação prejudica a cobertura e o alcance em detrimento da resolução.

Módulos com equipamentos visuais precisam contar com boa iluminação para que consigam aquisições de imagens satisfatórias. Se a turbidez da água for muito alta, equipamentos visuais são pouco efetivos. Da mesma forma, se o índice de refração do meio aquoso for alto ou os níveis de radiação da luz natural forem baixos, a iluminação pode não ser suficiente para aquisição de imagens com pouco ruído. Luzes artificiais podem compensar essa falta de radiação visível natural, no entanto podem ser prejudicadas pela presença de matéria suspensa na água em nível elevado, o que faria a difusão da luz ser relevante e pode, inclusive, prejudicar o foco das lentes.

Para missões curtas, nas quais a economia de energia pode ser preterida, as câmeras podem executar aquisição de imagens sequenciais desde taxas compatíveis com a visão humana (cerca de 24 quadros por segundo) até taxas que permitam uma cobertura de área completa (ou seja, imagens seriam adquiridas à medida do deslocamento do veículo onde cada quadro cobriria áreas sequenciais).

Para missões longas ou pequenas capacidades de armazenamento de energia, a estratégia pode ser de adquirir imagens em amostras, visando principalmente pontos de interesse. Essa estratégia depende muito da navegação por ponto isolado e cálculo inercial de posição devido aos períodos em que não há navegação por imagens.

O reconhecimento de padrões em imagens pode ser utilizado para SLAM pois podem servir para encontrar pontos de referência, experiência compartilhada por alguns autores, como Hagen (2014), Ridao *et al.* (2015), Hurtós *et al.* (2013) e Sun, Yu e Xu (2013). Esse reconhecimento é também útil para a programação de inspeções em pontos específicos a serem identificados a partir dos pontos de referência.

É importante frisar que essa técnica também contribui para a melhoria dos mapas dos ambientes subaquáticos, com grande possibilidade de reconhecimento de objetos de qualquer natureza, incluindo flora e fauna, com definição de contornos.

Conforme apresentado na seção 2, a precisão da inspeção visual permite a identificação de defeitos superficiais até a precisão de centímetros, permitindo identificar falhas de revestimentos e deformações superficiais, ou falhas maiores, como estruturas em balanço, e identificar seus limites. Mesmo com a ocorrência de sombras, similares às geradas em inspeções com o SVL, câmeras podem identificar contornos a partir da diferença de textura ou de cor.

Sensores que usem laser para inspeção têm vantagem sobre sensores visuais devido ao seu alcance e precisão. Também exigem menor capacidade de processamento, à medida em que o próprio sensor pode reconhecer um sinal de medição, sem a necessidade de tratamento e reconhecimento através de padrões, algoritmos ou inteligência artificial. Suas principais fraquezas são o uso maior de energia e sua dependência da baixa turbidez da água.

A geração de imagens holográficas, com uso de tanto dados visuais quanto acústicos, também pode ser promissor devido à integração de dados e a consequente melhoria de precisão.

O levantamento de potencial de proteção catódica é hoje uma demanda reprimida de serviço, visto que para isso só é possível se contar com mergulhadores para que seja executado. Apesar de demandar a instalação de uma estrutura que conte com leitores fixos que permitem a transferência de dados para um AUV, ganhos nesse serviço são possíveis, como o aumento no número de inspeções em um mesmo período, a prevenção contra a corrosão, detecção de falhas de revestimento, diminuição do gasto com energia elétrica excedente com corrente impressa e manutenção preventiva de anodos.

Autonomia energética é essencial (SØRENSEN e LUDVIGSEN, 2015), pois dela dependem todos os sistemas do veículo. Nesse quesito, veículos grandes tendem a levar vantagem sobre os pequenos, devido à sua capacidade de armazenamento. Hoje, baterias são largamente utilizadas, porém células de combustível têm maior densidade de energia por espaço ocupado. Sistemas podem também adotar recarga como alternativa, através do uso de energia solar, por exemplo. O uso de baterias de lítio é bastante viável, pois são muito comuns em materiais eletrônicos como computadores e celulares, acabam por ter grande capacidade de carga e são modulares, podendo ser dimensionadas à medida da necessidade, além de serem compactas e de boa relação peso *versus* carga.

Na navegação, as limitações da comunicação de linha base acústica e navegação de ponto isolado ainda enfrentam o desafio de atingir um alto nível de autonomia. Tecnologias como o SAS e o ADCP oferecem alternativas com maior precisão e que podem ser implementadas (SØRENSEN e LUDVIGSEN, 2015). SLAM e a fusão de sensores (como visual e acústico) também aumentam a precisão da navegação.

O uso de meios de localização (como GPS, transponde, DVL, LBL, SBL e USBL) é motivado pela necessidade de se chegar a um ponto requerido, como aquele apontado por alguma falha encontrada pela inspeção por PIG. Outra exigência é devida à demanda de correta localização de um ponto para futura referência. Mesmo hoje, essa tarefa é realizada com baixa precisão, pois os mergulhadores normalmente se utilizam de GPS em embarcações superficiais e uma orientação física vertical para a referência entre barco e mergulhador, algo como a liberação de uma carga a partir da embarcação. No AUV, o uso do GPS pode influenciar no planejamento de trajetória de modo a que seja previsto a emersão do veículo para aquisição de sinal eletromagnético em pontos determinados. Técnicas complementares acústicas, como o uso de transponder, DVL, LBL, SBL e USBL são usadas para orientação embaixo d'água e precisam de estrutura de apoio, como embarcações ou instalação prévia de emissores de sinal.

Equipamentos como a monoboia, na superfície, e o PLEM, sob a água, são estruturas fixas em situação ideal para servirem como pontos de referência e podem receber transponderes permanentes. Embarcações de apoio equipadas com GPS podem ser utilizadas para oferecer pontos de referência adicionais e de localização com USBL, por exemplo.

• CRITÉRIOS DE ESCOLHA DOS SENSORES

O escopo do produto será definido por tarefas que demandam atualmente o emprego de mergulhadores ou de embarcações de superfície (PETROBRÁS N-1487, 2011), com sensores na sua maioria versáteis e que demandam pouca adaptação ao veículo, ou ainda tarefas que tenham pequena necessidade de desenvolvimento e que representem uma demanda reprimida. Baseando-se na revisão apresentada no capítulo 3, as tarefas definidas para o AUV de inspeção para águas rasas são:

- Levantamento de traçado de dutos;
- Perfil da subsuperfície subaquática;

- Batimetria;
- Identificação de vão livre no duto;
- Mosaico do ambiente subaquático e mapeamento;
- Geração de mosaicos 3D;
- Monitoramento de proteção catódica;
- Inspeção visual pré-amarração.

Adicionalmente, como funções essenciais para o funcionamento do veículo e dos sensores, o fornecimento de energia e a transferência de dados serão incluídos como itens de serviço a serem analisados. A relação é apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 - Relação entre serviços de inspeção e tecnologias que os atendam

Serviço	Tecnologias capazes de executar o serviço			
	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4
Levantamento de traçado de dutos	SBP	Magnetômetro	Sensores óticos	Sensores acústicos
Perfil da subsuperfície subaquática	SBP	Magnetômetro		
Batimetria	Câmeras estereocópicas	Ecobatímetro	Sonar	Laser
Identificação de vão livre no duto	Sensores visuais	SVL	Sonar	Laser
Mosaico do ambiente subaquático e mapeamento	Sensores óticos	Sensores acústicos		
Geração de mosaicos 3D	Sensores óticos estéreos	Sensores acústicos	Laser	
Monitoramento de proteção catódica	Receptores de sinais			
Correlação de inspeções internas	Sensores óticos estéreos	Sensores acústicos	Laser	Sensores óticos monoculares
Inspeção visual pré-amarração	Sensores óticos	Sensores acústicos		
Carga de energia	Baterias de troca rápida	Plataforma de docagem	Cabo	Painéis solares
Transferência dados	WiFi	Rádio	Cabo	Memória removível

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A matriz de Pugh, apresentada na Tabela 11, demonstra a comparação entre as tecnologias apresentadas na Tabela 10 para o mesmo serviço. Considerando que todos os serviços são essenciais, todos receberam o mesmo peso. Cada “Solução 1” foi tomada como referência, e valores +1 atribuídos às soluções com características superiores à referência, -1 para aquelas com características inferiores e 0 para aquelas com a mesma avaliação que a referência.

Tabela 11 - Matriz de Pugh para seleção das tecnologias para os serviços

SERVIÇOS		PESO	SOLUÇÕES			
			1	2	3	4
1	Levantamento de traçado de dutos	1	REFERÊNCIA	+1	-1	-1
2	Perfil da subsuperfície subaquática	1		0		
3	Batimetria	1		+1	0	0
4	Identificação de vão livre no duto	1		+1	+1	0
5	Mosaico do ambiente subaquático e mapeamento	1		0		
6	Geração de mosaicos 3D	1		-1	0	
7	Monitoramento de proteção catódica	1				
8	Correlação de inspeções internas	1		-1	+1	-1
9	Inspeção visual pré-amarração	1		0		
10	Carga de energia	1		+1	-1	+1
11	Transferência dados	1		0	-1	0

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A avaliação apresentada na Tabela 11 orienta a escolha da solução. Em vários casos, os valores não diferenciam qual a melhor opção, como para o traçado de perfil da subsuperfície subaquática.

A definição das tecnologias é apresentada na Tabela 12. Mesmo tendo características positivas em relação à referência, a opção por uma solução de menor avaliação pode ser estratégica, como, por exemplo, a escolha de carga de energia por baterias removíveis e solar. Nesse caso,

isso se deve ao tempo longo que seria necessário para uma recarga por coletores solares.

Tabela 12 - Solução tecnológica para os serviços relacionados

Serviço	Solução
Levantamento de traçado de dutos	Magnetômetro
Perfil da subsuperfície subaquática	SBP
Batimetria	Ecobatímetro
Identificação de vão livre no duto	SVL
Mosaico do ambiente subaquático e mapeamento	Sensores ópticos
Geração de mosaicos 3D	Sensores ópticos estéreos
Monitoramento de proteção catódica	Receptores de sinais
Correlação de inspeções internas	Laser
Inspeção visual pré-amarração	Sensores ópticos ou acústicos
Carga de energia	Painéis solares ou troca rápida de baterias
Transferência dados	WiFi e Memória removível

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A escolha dos melhores sensores para a execução de uma tarefa não é a única preocupação do projetista. É preciso que sejam previstas tarefas auxiliares, como localização e navegação, levantamento de dados complementares, como temperatura da água e turbidez, etc.

A Tabela 13 apresenta os sensores complementares necessários selecionados para auxiliar na localização e navegação do veículo enquanto executa a sua tarefa principal de inspeção.

Cada demanda de inspeção é programada individualmente, por isso cada conjunto de sensores tem a opção de ser instalado somente quando seu serviço em particular for programado. Essa característica modular confere menor consumo energético para cada corrida e diminui a interferência entre os sensores.

Tabela 13 - Resumo da proposta de sensoriamento para execução por serviço

Serviço	Módulo de serviço		
	Sensor de navegação	Sensor de carga	Ferramentas adicionais
Levantamento de traçado de dutos	Sensores inerciais	Magnetômetro	CTD, Sensores ópticos, Turbidez, Pressão
Perfil da subsuperfície subaquática	Sensores Inerciais, CTD	SBP	Sensores ópticos, Turbidez, SLAM, GPS
Batimetria	Sensores Inerciais, CTD	Ecobatímetro	SLAM, GPS
Identificação de vão livre no duto	Sensores Inerciais, CTD	SVL	SLAM, GPS
Mosaico do ambiente subaquático e mapeamento	Sensores Inerciais, CTD	Sensores ópticos	SLAM, GPS, Turbidez
Geração de mosaicos 3D	Sensores Inerciais, CTD	Sensores ópticos estéreos	SLAM, GPS, Turbidez
Monitoramento de proteção catódica	Sensores inerciais	Receptores de sinais	SLAM, GPS, eletrodos de referência fixos com transmissores de dados
Correlação de inspeções internas	Sensores Inerciais, CTD	Laser	GPS, Turbidez
Inspeção visual ou de pré-amarração	Sensores Inerciais, CTD	Sensores ópticos ou acústicos	SLAM, Turbidez
Carga de energia			Painéis solares ou baterias de troca rápida
Transferência de dados			WiFi e memória removível

Fonte: Elaborado pelo Autor.

• RESUMO DA PROPOSTA

Para tarefas de inspeção de estruturas em águas rasas uma proposta foi construída a partir das informações apresentadas neste trabalho.

A proposta se sintetiza em um veículo submarino autônomo conhecido comercialmente como AUV, com construção modular.

A integração de um sistema recarga de energia por células fotovoltaicas oferece um ganho na segurança da operação uma vez que, mesmo em meio à missão, se houver falta de energia, o veículo pode emergir e recarregar suas baterias. A troca de bateria com encaixes rápidos é uma solução bastante célere para a recarga de energia, por isso é posta como alternativa.

Sensores básicos de medição das condições da água (condutividade, temperatura, profundidade, pressão e turbidez) precisam ser previstos para a utilização de sensores acústicos e visuais, como parte de seus módulos.

Um módulo para inspeção prévia e mapeamento seria composto por sensor de magnetometria, capaz de detectar estruturas ferromagnéticas aparentes ou enterradas e de manter trajetória.

Ferramentas acústicas comporiam, junto com os sensores básicos, uma série de módulos de acordo com sua aplicação: SBP para mapeamento e identificação de solo e estruturas enterradas; SVL para identificação de elementos e vãos livres e inspeção geral em águas com alta turbidez; SAS para inspeções mais detalhadas que o SVL. Técnicas como DVL, LBL, SBL e USBL também podem integrar um módulo acústico.

O módulo visual, além de conter medidor de turbidez, pode ter diferentes configurações, similarmente ao módulo acústico. Câmeras para aquisição imagens, sejam filmes ou fotos, comporiam um módulo que precisaria contar com iluminação auxiliar. Módulos laser seriam utilizados em condições em que a transparência da água permita seu emprego.

A adaptação do veículo e dos equipamentos para a execução de monitoramento de proteção catódica por AUV demandaria toda uma estrutura própria.

Interferometria, acústica ou visual, estaria integrada a um módulo próprio.

Cada módulo deve contar com capacidade de alimentação de energia condizente com os equipamentos e com a missão.

O módulo de localização seria comum a todos os empregos devido à necessidade de se referenciar a inspeção e para correta localização do veículo.

Finalmente, as tarefas de inspeção precisam ser limitadas para que o projeto do produto tenha um escopo definido. As soluções são apresentadas na Tabela 13, que sintetiza todas as propostas de módulos de serviço para um AUV de inspeção modular projetado com base nas escolhas apresentadas nesta seção.

4.2 Projeto de produto

Este capítulo propõe uma metodologia para desenvolvimento de projeto de produto, adotada por autores que desenvolveram projetos de robôs ou veículos não tripulados, tais como Simoni (2008) e Floriani (2013). O ganho dessa abordagem é que ela torna possível estruturar o desenvolvimento do produto para atingir um resultado esperado ou adequar o produto a premissas e restrições de projeto.

Para o desenvolvimento de projeto de produto é possível tirar proveito das experiências de alguns autores como Pasawang, Chatchanayuenyong e Sa-Ngiamvibool (2015), Moreno (2011) e Arruda (2016).

Anderson e Crowell (2005) traçou um roteiro para o desenvolvimento de um veículo subaquático baseado na plataforma de um veículo comercial, o Iver2. Como objetivos ou características de projeto definiu:

- Portátil: movido por apenas uma pessoa e pode ser embarcado em uma embarcação pequena;
- Massa: abaixo de 22,67kg de massa;
- Baterias: recarregáveis e de alta performance;
- Duração da missão: acima de 8 horas;
- Velocidade: 3 a 4 nós;
- Navegação simples: GPS, bússola, navegação às escuras e transponder;
- Controle do veículo: controle de baixa velocidade, sem leme;
- Profundidade de operação: 30 a 60m;
- Custo de aquisição: abaixo de USD50.000,00;

- Custo de operação: baixo custo de operação, competitivo para encorajar seu emprego em conjunto com outros veículos;
- Sensoriamento: bússola, sonar de varredura lateral, ecobatímetro, transdutor de pressão, câmeras de alta sensibilidade, telemetria local com rede Ethernet sem fio.³

As características de projeto, foram seccionadas da seguinte forma:

Eletrônica: CPU de baixa potência. Câmeras, radiocomunicadores, sonares e outros dispositivos já são otimizados para baixo consumo de energia. Módulos de gerenciamento de potência e baterias são oferecidos pelo fabricante do veículo;

Configuração do casco: cilíndrico com 15cm de diâmetro, com espaço para eletrônica. O comprimento deve ser ajustado de acordo com a quantidade de baterias, mas é esperado que seja em torno de 1,20m. Peso total de 20kg.

Os sensores de carga são os listados:

- Sonar de varredura lateral;
- Ecobatímetro;
- Transdutor de pressão;
- Câmeras de infravermelho, a cores ou vídeo;
- DGPS;
- Bússola.

Hildebrandt e Hilljegerdes (2010) relata um processo similar. Seus critérios de projeto foram:

- Premissas mecânicas: máximo de 60kg, profundidade de até 150m, liberdade para definição da velocidade, alta manobrabilidade, conexão por fibra ótica, bateria de carga longa, alta velocidade, baixo arrasto hidrodinâmico.
- Premissas de instrumentação e sensoriamento: LBL, USBL, DVL, inerciais, câmeras de alta resolução com amplo campo de visão com taxas de 25Hz e iluminação.

O AUV utilizado é o AVALON, fornecido pela DFKI. Sensores esperados:

- LBL e USBL;
- DVL;
- IMU;
- FOG;
- Pressão;

- Câmera esteoscópica HD;
- Comunicação por cabo de fibra ótica e modem WiFi.

A Tabela 14 resume a escolha dos instrumentos utilizados no veículo.

Tabela 14 - Sensoriamento presente no AUV Avalon desenvolvido por Hildebrandt e Hilljegerdes (2010)

Instrument	Measured Property	Update Rate	Precision	Range
XSens MTi AHRS	Attitude	120 Hz	1° (Hdg) 0.5° (Roll/Pitch)	360°
KVH DSP-3000 single axis FOG	Yaw rate	100 Hz	1-6 °/h	±375 °/s
Desert-Star SSP-1 Pressure Sensor	Depth	0.25-16 Hz	0.1% RMS	0-344 m
Desert-Star SAM-1 Acoustic Modem	Telemetry	23 bits/sec	-	250-1000 m
Desert-Star VLT-3 LBL Transponder	XYZ position	0.2-2 Hz	±0.15 m	2000 m
Teledyne RDI Explorer DVL EXP600	speed over ground	12 Hz	±0.007-0.03 m/s	0.3-80 m
Micron DST Scanning Sonar	Distance	0.5 Hz ^a	-	2-75 m
Micron NAV USBL Transponder	Range/Bearing ^b	0.1-2 Hz	±0.2 m range, ±3° bearing	150-500 m
4 Bowtech LED800/1600 Underwater	Illumination	22 kHz PWM	255 steps dimmable	-
2 Prosilica GE1900C GigE-Cameras	Image	0-30 FPS	Full-HD (1920x1080)	-

Fonte: Hildebrandt e Hilljegerdes (2010)

Crowell (2013) avalia as potencialidades do AUV Iver3, da OceanServer, e as melhorias em relação ao modelo anterior. Tal trabalho fornece uma análise da evolução do produto, a partir da versão Iver2.

O novo veículo possuirá uma configuração de pacotes modulares, com as seguintes características:

- Eletrônica sensível, como bússolas e giroscópios, serão montados à frente do veículo;
- Sonares e outros eletrônicos serão direcionados à frente e perto dos seus transdutores, com cabeamento direto entre eles;
- Dispositivos eletromagnéticos serão instalados à traseira do veículo, baterias inclusas;
- Veículo deve ser particionado em 2 partes para que caiba em duas caixas, com 22,6kg cada;
- Os discos rígidos, com 256Gb de capacidade, poderão ser removidos em campo;
- As baterias terão densidade de energia 50% superior, com controladores dedicados;
- Capacidade de processamentos duplicado;
- Suporte para Ethernet e USB 3.0;
- Opções de motores de 50W a 250W;
- Detector de vazamentos;
- Reduzido arrasto e selagem melhorada.

Cinco módulos são propostos:

- Ponteira cônica, bússola, giroscópio e sensores inerciais;
- Seção frontal – transdutores sonares em seção tubular à frente do veículo, para evitar captação de ruídos;
- Seção mediana – antenas, portas de acesso aos discos rígidos, ao carregamento de energia, ao teclado e ao monitor;
- Seção das baterias – baterias e controlador dos motores;
- Seção traseira – motor de propulsão, manches e selos.

Moreno (2011) apresentou um diagrama da Casa da Qualidade para o desenvolvimento de um robô subaquático modular (Figura 47 e Figura 48).

A casa da qualidade é usada para estabelecer a importância relativa entre vários critérios de projeto, e é usada para projetos de produtos desde os mais simples até mais sofisticados. Essa ferramenta ganha importância na discussão com clientes pois ajuda a priorizar aspectos que são importantes no produto, conduzindo os desenvolvedores em sua tarefa.

Uma característica importante da casa da qualidade é que as avaliações são subjetivas, portanto, o resultado é diretamente influenciado pela fonte dos dados e pela percepção dos critérios pelos projetistas e desenvolvedores.

Da casa da qualidade apresentada por Moreno (2011) (Figura 48), pode-se apreciar que os três critérios mais importantes para o veículo são:

1. Pequeno tamanho;
2. Simples;
3. Reutilizável.

No teto da casa da qualidade (Figura 47), são avaliadas as influências dos critérios entre si, e pode-se perceber que os três critérios mais importantes têm relação positiva (Simples comparado a Pequeno tamanho), nenhuma (Simples comparado a Reutilizável) e fortemente positiva (Reutilizável comparado com Pequeno tamanho).

E, dessa forma, os dados coletados ou construídos com a tabela dão subsídios para o desenvolvimento do produto, conduzido pelos projetistas e desenvolvedores.

O produto modular é capaz de ser adaptado para executar diferentes tarefas separadamente ou até mais de uma ao mesmo tempo. Como ponto forte, essa abordagem pode resultar em um produto mais simples e objetivo.

O veículo será considerado uma plataforma, sobre a qual serão instalados sensores, sendo que cada sensor ou conjunto de sensores formarão módulos que poderão ser instalados e removidos da plataforma. O mesmo veículo teria os sensores trocados a cada etapa, e, assim, poderia realizar diferentes tarefas em momentos diferentes.

O desenvolvimento do projeto do produto UUV proposto produziria diferentes produtos finais. Por exemplo, o veículo que faria o mapeamento inicial, com coleta de dados da condição da água, seria diferente do veículo que executaria o mapeamento da área a ser inspecionada. As diversas inspeções a serem realizadas, com diferentes técnicas e sensores, seriam todas executadas com o mesmo equipamento com configurações diferentes, ou seja, o UUV quando executar o mapeamento visual não terá os mesmos sensores do equipamento quando efetuar o monitoramento por ondas magnéticas.

Essa abordagem já foi relatada na literatura por Collins (1993), um AUV modular foi proposto com uso de células de combustível para alimentação, uso de USBL para localização, magnetômetro e sensores inerciais. Moreno (2011) propôs o emprego de veículos modulares para trabalhos simultâneos, um conceito diverso do proposto nesta seção (nesse caso o autor trata de UUVs com propósito único definido), mas que ainda mantém a ideia central de veículos simples, com tarefas definidas individualmente, o que mantém similaridade no desenvolvimento de projeto. Crowell (2013) desenvolveu um trabalho

sobre desafios de projeto para pequenos AUVs, no qual propõe o uso de um AUV comercial, o Iver3, junto a sensoriamento modular.

4.3 Projeto informacional

Para dar início à análise, os dados de entrada são fornecidos pelo cliente. O capítulo 3 fornece subsídios para que o perfil do cliente seja traçado, fornecendo informações para uma análise de mercado. O produto pretendido terá propósito único e não terá produção, tendo características de protótipo.

Arruda (2016) usou o modelo PRODIP para propor um projeto de produto para veículo subaquático para uso em pesquisas científicas. A abordagem do autor foi de utilizar um método conciso pois o produto teria o escopo simples. As similaridades de propósitos com o presente estudo permitem usar a mesma estratégia, com suas devidas adaptações.

As tarefas a serem realizadas já foram previamente definidas, apresentadas na Tabela 13, e, como parte do contexto apresentado nos capítulos 1, 2 e 3, faz parte da etapa de planejamento do projeto.

Os requisitos do cliente para o produto foram coletados a partir das experiências de Pasawang, Chatchanayuenyong e Sa-Ngiamvibool (2015), Moreno (2011), Anderson e Crowell (2005), Hildebrandt e Hilljegerdes (2010), Crowell (2013) e Brown, Kim e Eustice (2008):

- Baixo custo;
- Portátil;
- Manobrabilidade na água;
- Confiabilidade e manutenibilidade;
- Baixa interferência entre sensores;
- Transmissão de dados simplificada;
- Eficiente energeticamente;
- Modular;
- 6 graus de liberdade;
- Estável na água;
- Facilidade de programação;
- Segurança do equipamento e recuperação;
- Versatilidade de sensores;
- SLAM;
- GPS.

Os requisitos de usuários são diferentes a depender das etapas do ciclo de vida do produto, que são relacionados na

Tabela 15 - Requisitos e Ciclo de Vida do Produto

		Etapas do ciclo de vida					
		Produção	Armazenamento	Transporte	Uso	Manutenção	Descarte
Requisitos dos usuários	Baixo custo	X			X	X	X
	Portátil	X	X	X	X	X	X
	Manobrabilidade na água				X		
	Confiabilidade e manutenibilidade				X	X	
	Baixa interferência entre sensores				X	X	
	Transmissão de dados simplificada				X	X	
	Eficiente energeticamente	X	X	X	X	X	X
	Modular	X	X	X	X	X	X
	6 graus de liberdade	X			X	X	
	Estável na água	X			X	X	
	Facilidade de programação	X			X	X	
	Segurança do equipamento e recuperação	X		X	X	X	
	Versatilidade de sensores	X	X		X	X	
	SLAM	X			X	X	
GPS	X			X	X		

Fonte: Elaborado pelo Autor.

De modo análogo a Moreno (2011) e Arruda (2016), para o desenvolvimento do projeto de AUV para inspeção em águas rasas foi elaborado o diagrama da Casa da Qualidade, reproduzido na Figura 42 e na Figura 43.

Figura 49 - Casa da qualidade para projeto de AUV para inspeção em águas rasas

CASA DA QUALIDADE		Direcionador de melhoria		
		0	1	-1
Custo	→	↑	↓	↑
Precisão de localização	→	↑	↓	↑
Tamanho	→	↑	↓	↑
Tempo necessário para trocar sensores	→	↑	↓	↑
Capacidade de carga	→	↑	↓	↑
Compartimento estanque	→	↑	↓	↑
Alcance	→	↑	↓	↑
Sensores concomitantes	→	↑	↓	↑
Tempo para mobilização	→	↑	↓	↑
Leito com água	→	↑	↓	↑
Armazenamento de energia	→	↑	↓	↑
Processador extra	→	↑	↓	↑
Velocidade	→	↑	↓	↑
Alcance de comunicação	→	↑	↓	↑
Tempo para manutenção entre corridas	→	↑	↓	↑
DIRECIONADOR DE MELHORIA >>>				
UNIDADE >>>	→	↑	↓	↑
Custo	USD	→	↑	↓
Precisão de localização	cm	→	↑	↓
Tamanho	m³	→	↑	↓
Tempo necessário para trocar sensores	h	→	↑	↓
Capacidade de carga	kg	→	↑	↓
Compartimento estanque	m³	→	↑	↓
Alcance	km	→	↑	↓
Sensores concomitantes	Nº	→	↑	↓
Tempo para mobilização	min.	→	↑	↓
Lastro com água	Nº	→	↑	↓
Armazenamento de energia	Wh	→	↑	↓
Processador extra	Nº	→	↑	↓
Velocidade	nós	→	↑	↓
Alcance de comunicação	m	→	↑	↓
Tempo para manutenção entre corridas	h	→	↑	↓
Requisitos de engenharia				
Baixo custo	●	●	●	●
Portátil	●	●	●	●
Manobrabilidade na água	●	●	●	●
Confiabilidade e manutibilidade	●	●	●	●
Baixa interferência entre sensores	●	●	●	●
Transmissão de dados simplificada	●	●	●	●
Eficiente energeticamente	●	●	●	●
Modular	●	●	●	●
6 graus de liberdade	●	●	●	●
Estável na água	●	●	●	●
Facilidade de programação	●	●	●	●
Segurança do equipamento e recuperação	●	●	●	●
Verificabilidade de sensores	●	●	●	●
SLAM	●	●	●	●
GPS	●	●	●	●

Relação RC X RP	
●	3 Forte
○	3 Moderado
○	1 Fraco
○	0 Inexistente

Direcionador de melhoria	
→	0 não importa a variação do valor
↑	1 quanto maior o valor melhor
↓	-1 quanto menor o valor melhor

Correlação entre RPs	
++	Positivamente Forte
+	Positivamente Fraco
	Inexistente
-	Negativamente Fraco
--	Negativamente Forte

Benchmark/Cliente	
1	Rhum
2	Regular
3	Bom / Neutro
4	Muito Bom
5	Excelente

RC: REQUISITOS DO CLIENTE		ANÁLISE MERCADOLÓGICA					Benchmarking de mercado	
Cliente	Qualidade Planjada	Qualidade Planjada	Qualidade Planjada	Qualidade Planjada	Qualidade Planjada	Qualidade Planjada	Qualidade Planjada	Qualidade Planjada
5.0	5	5	5	5	5	5	5	5
4.0	4	4	4	4	4	4	4	4
5.0	5	5	5	5	5	5	5	5
3.0	3	3	3	3	3	3	3	3
2.0	2	2	2	2	2	2	2	2
5.0	4	4	4	4	4	4	4	4
5.0	3	3	3	3	3	3	3	3
4.0	4	4	4	4	4	4	4	4
5.0	3	3	3	3	3	3	3	3
4.0	4	4	4	4	4	4	4	4
5.0	3	3	3	3	3	3	3	3
4.0	4	4	4	4	4	4	4	4
5.0	3	3	3	3	3	3	3	3
4.0	4	4	4	4	4	4	4	4

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para a análise de *Benchmark* de mercado foram escolhidos os produtos similares Ecomapper, da YSI, o Iver2, da OceanServer, e o Ecomapper adquirido pelo LRRG. De modo geral, esses veículos apresentam requisitos muito próximos ao desejado pelo cliente (coluna vermelha na Figura 42). O peso dos critérios adotado para o projeto do produto, assumida pelo projetista, é apresentado na última coluna do diagrama (em amarelo na Figura 42).

Características da qualidade são predicados do produto que se relacionam com os requisitos definidos pelo cliente, e são listados pelo projetista. Tomando como referência Moreno (2011), a revisão de literatura, a demanda de serviço e características inerentes ao produto pretendido, foram listadas as seguintes características:

- Custo;
- Precisão de localização;
- Tamanho;
- Tempo necessário para trocar sensores;
- Domo para câmeras;
- Compartimento estanque;
- Alcance;
- Sensores concomitantes;
- Tempo para mobilização;
- Lastro com água;
- Armazenamento de energia;
- Processador extra;
- Velocidade;
- Alcance da comunicação;
- Tempo para manutenção entre corridas.

O produto da relação entre os requisitos de engenharia definidos pelo cliente com o peso atribuído pelo cliente permite classificar as características da qualidade para o desenvolvimento do projeto.

Na análise mercadológica, o cliente define os pesos para os requisitos. Da mesma forma, o projetista define pesos para os requisitos tendo o objetivo de delinear a qualidade do projeto do produto. A Tabela 16 mostra os requisitos priorizados pelo cliente com base em sua avaliação subjetiva. As três principais características, levando-se em consideração a correlação entre Requisitos de Cliente - Requisitos de Projeto e Qualidade do Cliente (Figura 43) são “Sensores concomitantes”, “Armazenamento de Energia” e “Custo”. A Tabela 17 faz o mesmo para a correlação entre Requisitos de Cliente - Requisitos de Projeto e

Qualidade do Plano do Projeto e a classificação é praticamente a mesma, mudando apenas para “Alcance” e “Compartimento estanque”.

As especificações meta (Tabela 16, Tabela 17 e Figura 50) são as grandezas de projeto esperadas, com base na pesquisa de mercado e características do planejamento do projeto.

Tabela 16 - Requisitos de engenharia por ordem de relevância quanto ao peso definido pelo cliente.

Requisitos de engenharia	Classificação	Especificação-meta
Sensores concomitantes	1	6
Armazenamento de energia	2	1600 Wh
Custo	3	40000 USD
Processador extra	4	1
Tamanho	5	0,0317049 m ³
Capacidade de carga	6	35 kg
Tempo para manutenção entre corridas	7	1 h
Tempo necessário para trocar sensores	8	0,5 h
Tempo para mobilização	9	1 min.
Alcance da comunicação	10	30 m
Compartimento estanque	11	0,0157459 m ³
Alcance	12	50 km
Lastro com água	13	1
Precisão de localização	14	30 cm
Velocidade	15	4 nós

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 17 - Requisitos de engenharia por ordem de relevância quanto à meta estabelecida no projeto.

Requisitos de engenharia	Classificação	Especificação-meta
Sensores concomitantes	1	6
Armazenamento de energia	2	1600 Wh
Custo	3	40000
Processador extra	4	1
Tamanho	5	0,0317049 m ³
Capacidade de carga	6	35 kg
Tempo para manutenção entre corridas	7	1 h
Tempo necessário para trocar sensores	8	0,5 h
Tempo para mobilização	9	1 min.
Alcance da comunicação	10	30 m
Alcance	11	50 km
Compartimento estanque	12	0,0157459 m ³
Lastro com água	13	1
Velocidade	14	4 nós
Precisão de localização	15	30 cm

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Sensores concomitantes permitem que uma inspeção seja mais eficiente, na medida em que executam diferentes medições complementares, além daquelas indispensáveis, como localização e medição de grandezas da água. No entanto quanto maior o número de sensores funcionando em paralelo maior a necessidade de espaço e energia.

O armazenamento de energia pode comprometer a carga máxima, visto que baterias são elementos pesados. Uma alternativa inteligente seria a de recarga rápida.

Custo é característica limitante para qualquer solução adotada e impacta todos os critérios do cliente.

4.4 Projeto conceitual

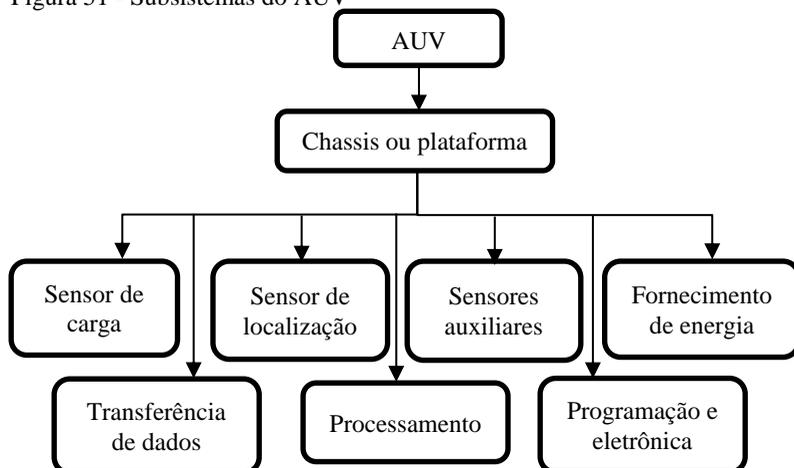
O projeto conceitual apresenta princípios físicos e tecnológicos que para resolver a demanda do projeto (ARRUDA, 2016).

Muitos desses conceitos já foram definidos, como a modularização de sensores, de fornecimento de energia e transferência de dados (Tabela 13).

O veículo subaquático é formado por subsistemas que executam funções complementares para a execução completa das tarefas, como apresentado por Floriani (2013).

Floriani (2013) se empenhou em desenvolver um modelo de produto a partir de elementos básicos, chegando à proposta final de um novo modelo de AUV para executar determinadas tarefas, como investigar o relevo subaquático. Esse processo pode ser acelerado ao se adotar um modelo comercial como plataforma, como feito por Hildebrandt e Hilljegerdes (2010) e Brown, Kim e Eustice (2008). Essa ideia se desenvolve em um produto com a estrutura funcional apresentada na Figura 51, onde todos os subsistemas são acoplados a uma plataforma comercial.

Figura 51 - Subsistemas do AUV



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Iniciativas existentes hoje no mercado de veículos autônomos submarinos utilizam diferentes modelos aos quais são adaptadas as ferramentas necessárias, como mostrado por Brown, Kim e Eustice (2008), o Zeabus de Tipsuwan e Hoonsuwan (2015) ou o Alister de Copros e Scourzic (2011). O desenvolvimento de novos veículos, além de tarefa exaustiva, consome tempo e recursos. Por exemplo, a indústria automobilística moderna, ao desenvolver novos modelos de veículos, tem o costume de adotar o conceito de plataformas (CONFESSOR, 2012). Uma plataforma veicular procura aproveitar elementos comuns de certos projetos para reutilizá-los em novos projetos. Da mesma forma, a adoção de um modelo de AUV como plataforma para desenvolvimento de uma ferramenta para atendimento a uma nova demanda é proveitosa e economiza recursos.

Ao se considerar o veículo plataforma como um bloco elementar acabado, que não precisa ser desenvolvido, o projeto de novo produto pode se concentrar apenas nas suas capacidades de inspeção e de navegação.

A experiência dos autores Brown, Kim e Eustice (2008), que tiveram êxito em seu projeto de aprimorar um AUV comercial, o Iver2 (da Ocean Server, com 1860mm de comprimento e 30kg) como plataforma para sensoriamento, oferece oportunidade de correlação com a situação objeto deste estudo.

Brown, Kim e Eustice (2008) relatam que o veículo Iver2 foi escolhido pois pode ser transportado em veículos leves e pode ser lançado por uma pessoa sozinha, alcança até 100m de profundidade, com velocidade de varredura de 4 nós. Um detalhe construtivo importante é o lastro de 0,45kg para flutuar em caso de perda de energia ou emergência.

Ao se modificar o veículo no âmbito do projeto, alguns cuidados foram tomados:

- Minimizar o arrasto hidrodinâmico;
- Manter o balanço e a flutuabilidade;
- Maximizar a capacidade de sensores de carga dentro do casco estanque.

Na instalação de novos sensores, a dissipação de calor e a interferência entre sensores precisou ser avaliada, principalmente devido ao espaço limitado. O fornecimento de energia e a integração elétrica de novos elementos também foi um ponto de atenção, pois para as modificações planejadas para o veículo, seriam necessários mais 53W de potência para seu completo funcionamento, além dos 119W originais.

Uma nova ponteira foi projetada para o veículo (Figura 30) e foi denominada de nariz cônico SLAM, pois foram instalados os sensores que atenderão a essa técnica, como câmeras e sonares.

A configuração original e aquela atingida após as modificações do Iver2 foram mostradas na Tabela 6.

Para este trabalho, é proposta uma solução similar à descrita por Brown, Kim e Eustice (2008): o laboratório de robótica Raul Gunther, da UFSC, possui um candidato com tamanho e capacidade similares ao Iver2 da Universidade de Michigan (EUA), que é o Ecomapper da Ysi Incorporated, com 1680mm de comprimento 28,84kg.

Neste estudo deverá ser considerado como uma plataforma o AUV comercial em si, com sua capacidade propulsora, seu desenho hidrodinâmico, sua capacidade de carga, estoque de energia, os canais disponíveis para instalação de sensores, navegabilidade, manobrabilidade etc. O AUV comercial considerado neste estudo é o Ecomapper®, fabricado pela YSI *Incorporated* (Figura 52). Suas especificações são apresentadas na Tabela 18 e Figura 52.

Esse AUV, compartilhado pelo Laboratório de Simulação Naval da UFSC e o Laboratório de Robótica Raul Gunther (LRRG), oferece a possibilidade de incorporação de novas ferramentas e possui um projeto adequado para navegação em águas rasas.

Figura 52 - AUV Ecomapper da YSI Systems pertencente ao LRRG.



Fonte: Budny (2017).

O modelo comercial é fornecido conjuntamente a um aparato de sensores que lhe permite executar tarefas básicas de inspeção, todas ligadas à qualidade da água. Esses sensores coletam dados como:

- Temperatura, condutividade e profundidade;
- Batimetria (não presente no modelo do LRRG);
- Orientação (bússola);
- Fluorescência de cianobactéria e clorofila;
- Oxigênio dissolvido;
- Turbidez;
- pH;
- Potencial eletroquímico;

Tabela 18 - Especificações do YSI Ecomapper.

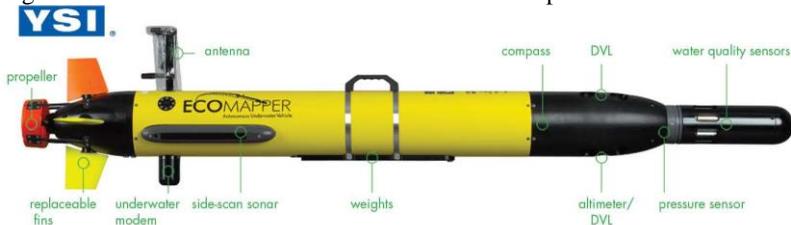
Dimensões	152,65cm de comprimento, 14,73cm de diâmetro
Massa	20,41kg (28,84kg com DVL)
Energia	600Wh de baterias de Íons de Lítio, vida acima de 300 ciclos (alimentação 12-18Vcc)
Capacidade	8 horas a 2,5nós
Velocidade	1 a 4nós (2,5nós máximos na superfície, 3,5nós máximos sob a água)
Profundidade trabalho	Até 100m
Controle	Quatro painéis de controle independentes
Conexão externa	Wireless 802.11g Ethernet (alcance de 200m)
Navegação	Navegação estimada por GPS quando na superfície, registro subsuperficial até 40m com DVL (não presente no modelo do LRRG) e navegação às escuras com bússola, sensores de profundidade e velocidade do veículo.
Registro	Registro interno de atividades, com resolução programável
Sensores	Temperatura, condutividade, profundidade, distância para o fundo, compasso digital em três eixos
Eletrônica embarcada	Processador X86 Intel ATOM de baixa potência 80GB de memória para dados
Software	Windows XP, navegação <i>GUI-based</i> , <i>Software</i> VectorMap para planejamento de missão e visualização de dados
Mosaico Sonar	Processa dados do sonar para sobrepor ao VectorMap (não presente no modelo do LRRG)
Comunicação	Rádio 2.4GHz, quando na superfície
Opcionais	
Sensores	Ótico para oxigênio dissolvido, turbidez, fluorescência de clorofila, fluorescência de cianobactéria, pH, potencial eletroquímico
Side-Scan Sonar	Imagenex 330kHz ou 330/800kHz
Sistema de segurança	<i>Airbag</i> de flutuação de emergência

Fonte: YSI Incorporated (2017).

Características de fábrica do equipamento (YSI INCORPORATED, 2017, Figura 53):

- Pode ser utilizado por apenas uma pessoa;
- Vasta área de varredura sem a necessidade de barco de apoio ou tripulação;
- *Software* de planejamento de missão para desenvolvimento e execução de varredura ágil e simples;
- Provê dados nos planos horizontal e vertical;
- Dados georreferenciados;
- Opção de medição de até 8 parâmetros de qualidade da água, do solo subaquático e do perfil aquático;
- DVL (não presente no modelo do LRRG).

Figura 53 - AUV ECOMAPPER conforme fornecido pela YSI.



Fonte: YSI Incorporated (2017).

A experiência de adaptar esse mesmo veículo para novos sensores e para missões específicas já foi executada por Pagán (2016), que, inclusive, utilizou uma câmera esportiva convencional como sensor visual, para a qual foi necessário o desenvolvimento de um dispositivo de fixação, apresentado na Figura 54.

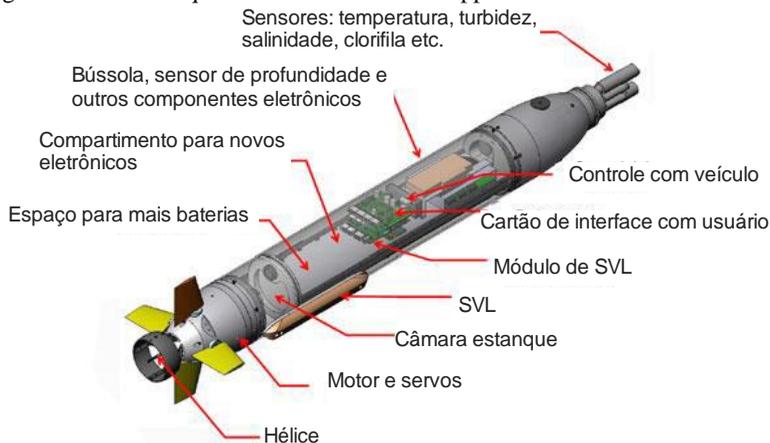
Figura 54 - Ecomapper adaptado pela Universidad Politécnica de Cartagena



Fonte: Pagán (2016)

A Figura 55 e a Figura 56 servem de comparativo para demonstrar o desafio de se adaptar um veículo comercial para maiores capacidades. O HUGIN 3000 (Figura 56) é um veículo com ampla capacidade de se adaptar a novos sensores, ele tem 1200kg, 5,3m de comprimento e um volume de 2,5m³. As escolhas de projeto devem permitir, de modo limitado, ao veículo da Figura 55 (com 28,84kg, 1,68m de comprimento e 0,0234m³) ter uma capacidade de serviço em escala menor, mas compatível com o HUGIN 3000 em águas rasas.

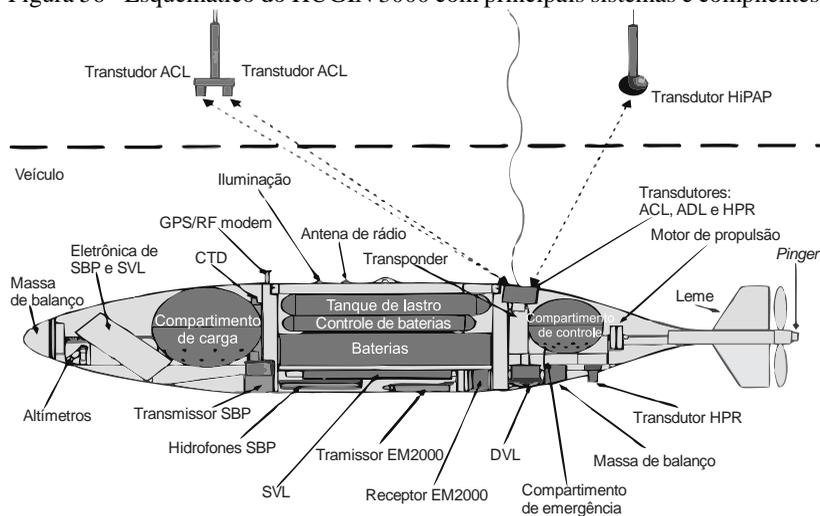
Figura 55 - Plano esquemático do AUV Ecomapper.



Fonte: Pagán (2016).

O HUGIN 3000, como mostrado na Figura 56, tem uma ampla variedade de sensores ou capacidade para que esses sejam instalados. Como fisicamente o Ecomapper não oferece a mesma possibilidade, a modularidade de sensores permitirá que novos sensores sejam adicionados em corridas diferentes para executar uma mesma missão que o AUV mais robusto. São desafios que possivelmente só poderão ser contornados com concessões, tais como simplificações ou perdas de capacidade de inspeção.

Figura 56 - Esquemático do HUGIN 3000 com principais sistemas e componentes.



Fonte: George *et al.* (2002).

A sugestão feita para o veículo/plataforma e a Tabela 13 que resume a proposta de sensoriamento substituem a matriz morfológica, que é uma ferramenta para o desenvolvimento do projeto de produto que contribui com o projeto conceitual.

A proposta conceitual de AUV para inspeção em águas rasas, utilizando o AUV Ecomapper como plataforma, é apresentada na Tabela 19.

Tabela 19 - Módulos de um AUV conceitual

Missão	Plataforma	Carga de energia	Transferência de dados	Módulos de serviço		
				Sensor de navegação	Sensor de carga	Ferramentas adicionais
Levantamento de traçado de dutos	Ecomapper	Baterias de troca rápida	WiFi e memória removível	Sensores inerciais	Magnetômetro	CTD, Sensores ópticos, Turbidez, Pressão
Perfil da subsuperfície subaquática				Sensores Inerciais, CTD	SBP	Sensores ópticos, Turbidez, SLAM, GPS
Batimetria				Sensores Inerciais, CTD	Ecobatímetro	SLAM, GPS
Identificação de vão livre no duto				Sensores Inerciais, CTD	SVL	SLAM, GPS
Mosaico do ambiente subaquático e mapeamento				Sensores Inerciais, CTD	Sensores ópticos	SLAM, GPS, Turbidez
Geração de mosaicos 3D				Sensores Inerciais, CTD	Sensores ópticos estéreos	SLAM, GPS, Turbidez
Monitoramento de proteção catódica				Sensores inerciais	Receptores de sinais	SLAM, GPS, eletrodos de referência fixos
Correlação de inspeções internas				Sensores Inerciais, CTD	Laser	GPS, Turbidez
Inspeção visual ou de pré-amarração				Sensores Inerciais, CTD	Sensores ópticos ou acústicos	SLAM, Turbidez

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.5 Comentários sobre o capítulo

Um dos objetivos específicos deste trabalho foi atingido, o de propor um de AUV para a aplicação de inspeção de estruturas submarinas, com o uso de ferramentas de inspeção conhecidas e de um veículo subaquático comercial como plataforma para sensores, sintetizado na Tabela 19.

A metodologia de desenvolvimento de projeto de produto PRODIP, bastante difundida, inclusive para novos veículos subaquáticos, se mostrou uma ferramenta bastante útil.

O AUV Ecomapper é o candidato para funcionar como a plataforma proposta. Porém, para atender aos requisitos e características apresentados no projeto informacional o veículo precisa receber adaptações físicas, sobretudo eletrônicas. Essa tarefa será escopo de trabalhos futuros, e demandará tanto aquisição de novos materiais e equipamentos, a construção de novos compartimentos e adaptações para ferramentas, tal como a experiência de Pagán (2016).

Outro objetivo atingido foi o de analisar o problema específico de inspeção do trecho submarino de oleodutos e a aplicabilidade de veículos submarinos para tal tarefa, para isso foram analisados quais sensores melhor atendem à demanda e foram propostos conjuntos modulares com capacidade para executar a tarefa de modo autônomo. Conforme a abordagem do programa PANDORA, relatada por Lane *et al.* (2015), melhorias ainda são necessárias para os equipamentos de inspeção e para os veículos subaquáticos não tripulados para que a implementação da ferramenta seja completa.

A solução modular é eficiente para que diferentes sensores possam ser utilizados no mesmo veículo e aumenta a autonomia energética para uma mesma carga de bateria. Além disso, ela diminui a interferência entre os sinais dos sensores. No entanto, para o uso correto, esses módulos de sensoriamento demandam uma estratégia de diversas corridas com propósitos específicos, em que cada passagem do veículo com um conjunto determinado de sensores exige sua missão particular, com caminho ou trajetória individualmente determinados, o que será discutido no capítulo que segue.

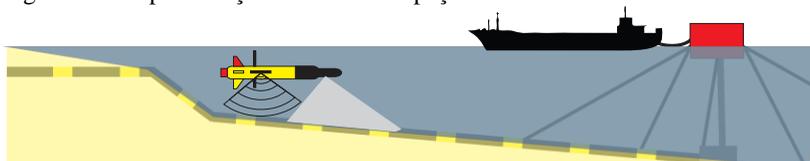
5 ABORDAGEM DE TRAJETO PARA O SERVIÇO DE INSPEÇÃO

Um dos objetivos deste trabalho é de analisar o problema específico de inspeção do trecho submarino de oleodutos e a aplicabilidade de veículos submarinos para tal tarefa, e o resultado é aquele apresentado no capítulo anterior (página 142). A análise necessária para atendimento aos objetivos restantes será de localização e trajetória específicas para o serviço.

Outro objetivo que precisa ser atingido é o de propor uma abordagem para inspeção, que deverá ser relacionada às características modulares do veículo.

A identificação de vão livre sob o duto é importante pois, se o espaço vazio sob o duto é maior que o admitido em projeto, além de esforços com forças cortantes e momentos fletores indesejados, surgem vibrações induzidas por vórtices que podem levar o duto à falha por fadiga (CHOI, 2001). Loureiro (2011) chegou a propor o uso de batimetria por AUV para o monitoramento dessa situação para dutos submarinos.

Figura 57 - Representação e AUV de inspeção



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como já citado neste trabalho, a opção de projeto modular pretende que o veículo seja mais simples, com menor carga e menor demanda de energia, com poucos sensores para executar uma missão.

Uma missão de inspeção é determinada por norma padrão de integridade, ou análise de integridade ou emergência, e tem escopo definido, quer seja de cobrir uma área a ser inspecionada ou de investigar um ponto específico.

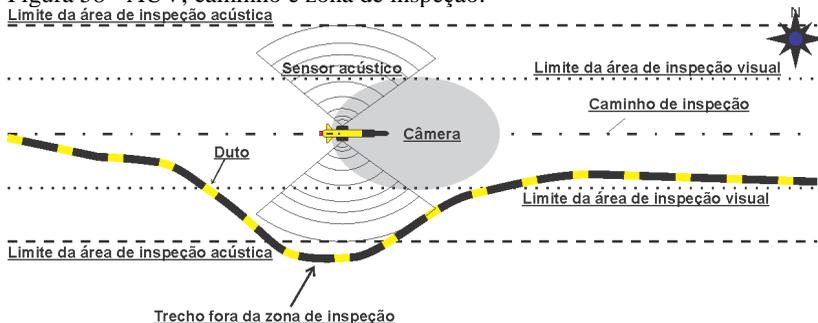
Corrida é cada execução completa de percurso programado, por exemplo, se a missão for de inspecionar um duto completo, cada percurso completamente executado, do início ao fim do duto será considerado uma corrida. Passagem é cada vez que o veículo cruzar um ponto específico. Caminho, rota ou trajeto definem a sequência de posições a serem assumidas pelo veículo ao longo da missão (Figura 58).

O atendimento à missão de um UUV e garantia de sua segurança são premissas do planejamento de movimento (PROENÇA, 2016).

Um veículo de inspeção em deslocamento (viajando a velocidade constante) precisa manter sua posição em relação aos dutos preferencialmente constante, para reduzir o erro sistemático da leitura (TIAN, 2008; OHI, 2005; ALBIEZ *et al.*, 2015). Por exemplo, no caso de uma inspeção visual, em que a turbidez da água afeta a qualidade da leitura, quanto mais distante do ponto de estudo maior será a dispersão de luz e também a perda de foco, e se muito próximo a distância focal do sensor não permitirá a medição. A Figura 58 ilustra o caminho de inspeção para um veículo com dois módulos de sensoriamento, um sonar de varredura lateral (SVL) e uma câmera, e suas áreas de cobertura estão identificadas na ilustração.

Quando o veículo obedece a um caminho de inspeção programado, ilustrado pela linha de centro na Figura 58, o caminho precisa ser feito sob medida para que todo o equipamento a ser inspecionado esteja dentro da zona de inspeção, como visto na mesma figura. Cabe ressaltar que a precisão dos sinais dos sensores diminui perto dos limites da área de inspeção.

Figura 58 - AUV, caminho e zona de inspeção.



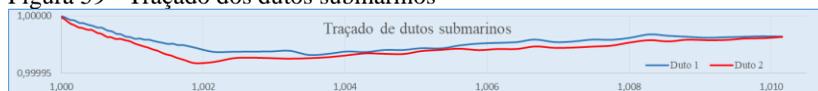
Fonte: Elaborado pelo Autor.

É importante que o caminho seja planejado de acordo com as condições atualizadas dos dutos para que todo o equipamento esteja contido na zona de inspeção. Os próprios equipamentos sob inspeção, por sua característica de continuidade, serviriam com referência para o SLAM.

A Figura 59 é um gráfico que ilustra o traçado de dois dutos. Os eixos usam unidades adimensionais de distância. O eixo vertical tem escala maior para permitir a visualização das duas linhas separadas e, por

isso, o gráfico mostrado não é uma representação exata do traçado. Nota-se que há diversas mudanças de direção no traçado dos dois dutos representados, que podem ser tanto características construtivas como podem ter sido causadas por ações físicas, como dilatação ou retração do duto com a temperatura, perda de sustentação por mudança do solo na base do duto, choques etc. Como exposto por Floriani (2013), as forças hidrodinâmicas a que um veículo subaquático está exposto, sobretudo quando navega próximo aos limites aquáticos (tanto do fundo quanto da superfície), dificultam a manutenção de uma trajetória controlada do AUV.

Figura 59 - Traçado dos dutos submarinos

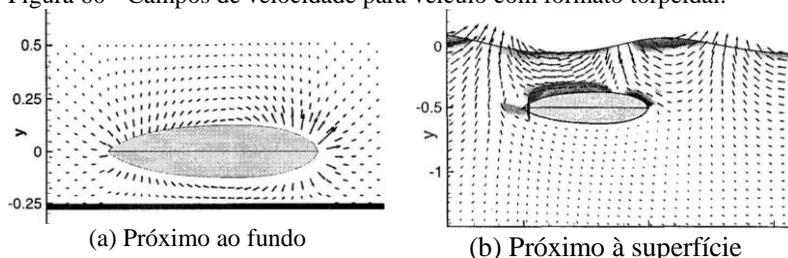


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Figura 60, os vetores representam a velocidade do fluido ao redor do corpo que representa o veículo e são representação gráfica da equação de Navier-Stokes²² (FLORIANI, 2013). Notam-se os pontos em que a velocidade é maior, que resulta em uma pressão é menor. Para a Figura 60 (a) o veículo é forçado para baixo, e na Figura 60 (b) o veículo é forçado para cima.

²² A equação de Navier-Stokes (FLORIANI, 2013) explica o surgimento de forças ao redor do veículo quando este se desloca: $\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \vec{\nu} \cdot \nabla^2 \vec{u}$, onde P é a pressão dinâmica, ρ é a densidade da água, ν é o coeficiente de viscosidade da água e \vec{u} é o vetor velocidade do fluido.

Figura 60 - Campos de velocidade para veículo com formato torpeidal.



Fonte: Ananthakrishnan e Zhang (1998, apud FLORIANI, 2013).

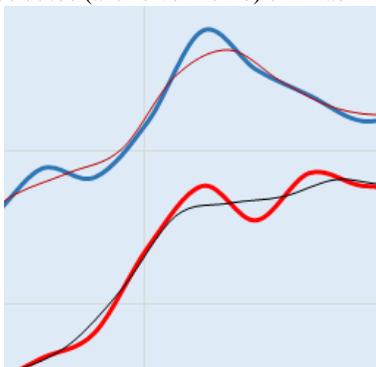
Os dutos estão posicionados tocando o fundo do oceano, por conseguinte o veículo deverá se deslocar próximo ao solo oceânico e também estará sujeito a essas forças.

Nota-se que os traçados dos dutos, ilustrados na Figura 59, seguem uma linha com orientação bastante variável, ao longo de seu comprimento. Nesses casos, é difícil para o veículo manter a rota paralela ao traçado (JACOBI e KARIMANZIRA, 2014), por vários fatores do veículo (tempo de reação à mudança de direção, raio de manobra etc.) e do ambiente (obstáculos, correntes marinhas etc.), e executar mudanças de trajeto frequentes também geram erros de posicionamento, demandam energia extra e podem causar perda de cobertura de inspeção.

Estudos como o exposto por Jacobi e Karimanzira (2014) demonstram que para o veículo manter uma trajetória muito parecida com o objeto sob monitoramento é difícil, e geralmente a trajetória real do veículo é mais próxima a segmentos de retas, como mostrado na Figura 18.

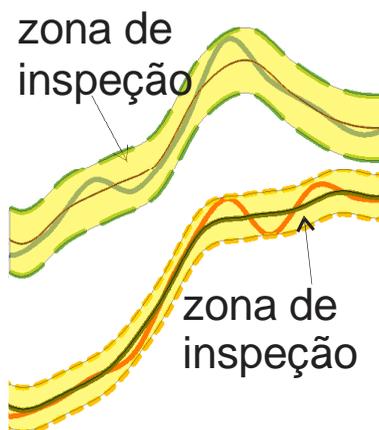
Uma solução possível para o caminho é que ele mantenha uma linha média que se aproxime matematicamente do traçado dos dutos. O caminho real se desvia do traçado dos dutos nos trechos em que há mudanças de direção, que pode ser visto em uma visão ampliada (Figura 61). O mais importante é que esse caminho da linha média faça com que o veículo permaneça próximo ao duto a ser inspecionado e que este permaneça o tempo todo dentro da zona de inspeção (espaços em amarelo entre as linhas tracejadas na Figura 62). A título de exemplo, a distância entre a linha média e os limites da zona de inspeção (ilustrada em linhas tracejadas verdes na Figura 62) é de aproximadamente 7 metros, e esse deve ser o raio mínimo de alcance dos sensores para cobrirem completamente a área.

Figura 61 - Trecho dos dutos (azul e vermelho) e linhas médias (marrom e preto)



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 62 - Área a ser inspecionada a partir dos caminhos de inspeção das linhas médias.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.1 Múltiplas passagens

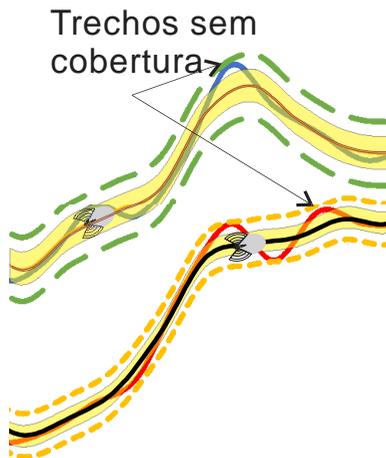
Para que a escolha de caminho seja viável tecnicamente, é necessário que dados prévios de traçado dos equipamentos sejam levantados. Isso pode ser feito com o próprio veículo de inspeção proposto, adotando-se a estratégia de múltiplas corridas, em que cada passagem do veículo colherá dados necessários para a programação da passagem seguinte. Dessa forma, além de conhecer o traçado a ser seguido, a área da zona de inspeção pode ser determinada para uma cobertura total, ou até mesmo para a execução de novas passagens sobre

os mesmos pontos para garantir essa cobertura. Essa mesma estratégia já foi utilizada por Borhaug & Hagen (2011 apud JACOBSON, 2013).

Autores como Burguera, Bonin-Font e Oliver (2015) sugerem que o fundo oceânico pode ser tratado como um plano, dispensando-se, dessa forma, o controle vertical. Para o controle nesse plano seria feito um planejamento adequado de sensores, de modo que o alcance dos sinais compense a diferença de cota e, assim, os equipamentos sob inspeção permanecerão dentro da zona de inspeção. Isso reduz o problema de inspeção a duas dimensões (eixos X-Y). Essa condição corresponde ao objetivo deste capítulo, que se limita ao problema de monitoramento de duto em balanço, onde podem ser usadas as técnicas de SVL (que sofrem com a geração de sombras no sinal de resposta) ou de sensoriamento visual e a planicidade do relevo não exigirá que o veículo de inspeção mude frequentemente de cota para continuar tendo um ponto de vista vantajoso, idealmente lateral, para detectar a falha no suporte do duto.

A Figura 63 ilustra o veículo de inspeção se deslocando sobre a linha média. No exemplo, os sinais dos sensores não têm alcance suficiente para uma cobertura completa da área a ser inspecionada, identificada na Figura 62. Em somente uma passagem não será possível que o veículo cubra toda a área de inspeção.

Figura 63 - Veículo sobre a zona de inspeção, uma passagem e cobertura incompleta.

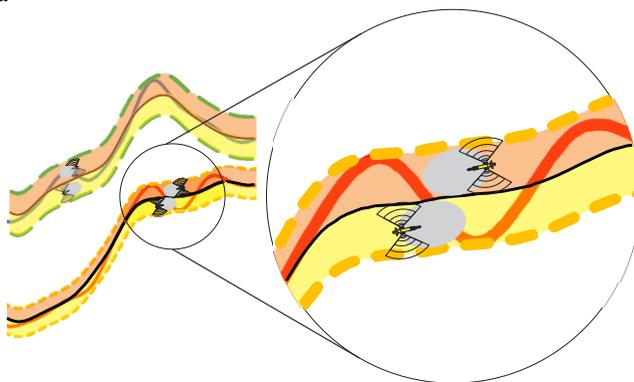


Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Figura 64 exemplifica uma solução para o problema, com o mesmo veículo e os mesmos módulos de sensores, e desta vez a cobertura de toda a área é atingida com duas passagens sobre cada duto.

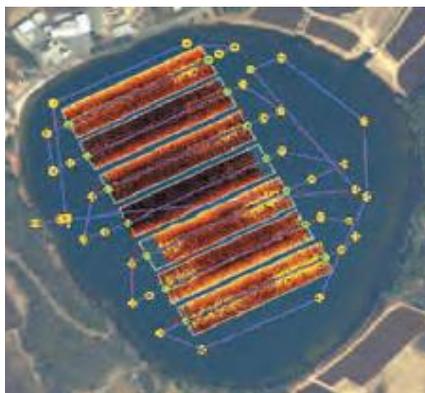
Essa seria uma das situações em que as múltiplas passagens substituiriam rotas menos eficientes energeticamente, como a de cortador de grama, que será apresentada a nas próximas seções (Figura 65).

Figura 64 - Veículo sobre a zona de inspeção, duas passagens e cobertura completa



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 65 - Planejamento de trajeto para batimetria em um lago com o AUV Ecomapper.



Fonte: YSI Incorporated (2017).

Essa estratégia demanda um correto planejamento de corridas e módulos de sensoriamento. Também, por exigir mais passagens para um mesmo equipamento, demanda maior consumo de energia e armazenamento de dados que somente uma passagem. Nesse caso, também é importante que o tempo de substituição de sensores, recarga de energia e descarga de dados seja o mais curto possível (o que pode, inclusive, influenciar a escolha das características na Casa da Qualidade, Figura 49).

Outra característica fundamental é que a ferramenta possa seguir um caminho programado, controlando seu deslocamento e corrigindo eventuais alterações, quer sejam de fontes externas (maré, correntes marinhas, animais, etc.) ou internas (mudanças de rota para evitar colisões, para se adequar à melhor resolução de inspeção etc.). Nesse quesito entram tanto a capacidade de resistir aos agentes externos, sobretudo forças hidrodinâmicas, e para isso o equipamento precisa de motores com potências adequadas e leme, quanto da possibilidade de monitorar e controlar seu deslocamento, para tanto usando referências ambientais e sensores embarcados para se localizar.

As corridas ou passagens preliminares com o equipamento podem contar com sensoriamento menos preciso e de maior área de cobertura, como o HISAS, utilizado por Hagen (2016) ou o magnetômetro, que é capaz de identificar os trechos de dutos enterrados e expostos. Essa primeira corrida serve para identificar o trajeto e criar um mapa (como proposto por Hagen, 2016 e Jacobson *et al.*, 2013) e é uma prática bastante simples que poderia tanto assegurar o desempenho da inspeção, quanto garantir que o que foi planejado corresponde à realidade (ou seja, verificar a condição atualizada do equipamento sob inspeção). Devem ser executadas tantas corridas quantas necessárias para completa cobertura do equipamento.

Os passes seguintes seriam com ferramentas que aprimoram os resultados obtidos na primeira corrida, tal como ecobatímetro aliado a câmeras (HAGEN, 2016), que podem identificar o traçado do duto facilmente e registrar imagens sucessivas que permitirão criar um mapa mais preciso da área inspecionada.

Mantendo coerência com a proposta de um AUV modular deste trabalho, foram sintetizadas na Tabela 20 as configurações de veículo para uma estratégia de múltiplas corridas para o mapeamento de vãos livres no duto submarino.

O controle da rota seria efetuado por SLAM, com os próprios dutos servindo como guia. Em complemento, com a implantação de marcos autossimilares, como aqueles propostos por Sun, Yu e Xu (2013) e

magnetos permanentes previamente instalados em campanhas de mergulho, o veículo subaquático proposto na Tabela 20 terá pontos de referência para, aprimorando sua capacidade de localização.

Tabela 20 - Configurações de AUV modular para múltiplas corridas para mapeamento de vão livre em dutos submarinos.

Corrida	Missão	Plataforma	Carga de energia	Transferência de dados	Módulos de serviço		
					Sensor de navegação	Sensor de carga	Ferramentas adicionais
1	Levantamento de traçado de dutos	Ecomapper	Baterias de troca rápida	WiFi e memória removível	Sensores inerciais	Magnetômetro	CTD, Pressão, Turbidez, Câmera
2	Batimetria				Sensores Inerciais, CTD	Ecobatímetro	SLAM, GPS
3	Inspeção visual				Sensores Inerciais, CTD	Sensores ópticos ou acústicos	SLAM, Temperatura, Turbidez
4	Identificação de vão livre no duto				Sensores Inerciais, CTD	SVL	SLAM, GPS, Câmera, Turbidez

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A autonomia do equipamento é importante, pois ele além de ser recuperado posteriormente, precisa executar suas tarefas com qualidade e se adequando às exigências de maior demanda de energia, como para vencer as forças concorrentes ao deslocamento do veículo e sua manutenção de trajeto.

Uma vantagem adicional das múltiplas corridas é que o veículo tende a manter uma velocidade constante, se desviando somente para manter a posição em relação aos dutos (sem desvios para aumentar a cobertura) e isso garante um uso mais eficiente da energia de propulsão.

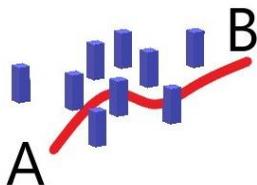
Como desvantagens, o veículo precisa ter um controle de posição com pouco erro para que as passagens tenham sobreposição de área inspecionada. Outra desvantagem é um possível maior uso do tempo, se comparado com trajetos como o de cortador de grama.

5.2 Planejamento de movimento

O planejamento do movimento prevê o controle dos movimentos de rotação e translação do veículo e as condições a que serão submetidas o robô definem o algoritmo do planejamento do movimento. O planejamento de trajetória atende ao caminho definido pelo planejamento de movimento e verifica se o robô (com suas limitações) pode executá-lo.

O planejamento é feito definindo a sequência de configurações que o veículo deve assumir, com um conjunto de *waypoints* (PAULL *et al.*, 2013, *apud* PROENÇA, 2016), e é usado para quatro tipos diferentes de missões: navegação, cobertura, localização e mapeamento. O caminho precisa ser livre de colisões em um ambiente conhecido, como a linha vermelha no Figura 66.

Figura 66 - Deslocamento entre dois pontos, através de obstáculos



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Proença (2016) propôs 3 algoritmos para a seleção automática de melhor caminho para um veículo subaquático para o planejamento de movimento.

Os algoritmos de planejamento visam substituir as escolhas de um programador humano nessa etapa, se adaptar melhor a ambientes complexos e qualificar o caminho.

Para construir seus algoritmos, Proença (2016) precisou definir os parâmetros cinemáticos e dinâmicos e, para isso, utilizou desenvolvimentos de Wang, Zhang e Shcafer (2014). Estes apresentaram um modelo matemático para a dinâmica do AUV Ecomapper citado no capítulo 4 para ser usado como plataforma para o veículo de inspeção. A curvatura máxima de um veículo é função de parâmetros cinemáticos e dinâmicos e Proença (2016) usa aproximações destes para determinar essa grandeza, usando as seguintes hipóteses para o veículo:

- Três planos de simetria (bastante razoável para um veículo em formato de torpedo);
- Baixa velocidade;

- Flutuabilidade neutra, centros de gravidade e de empuxo alinhados no eixo Z;
- Movimento em bidimensional (X-Y);
- Propulsor linear.

Essas condições condizem com o veículo AUV Ecomapper. Finalmente, o raio de manobra mínimo e a curvatura máxima são definidos por Proença (2016) como:

$$\kappa_{m\acute{a}x} = \frac{1}{\rho_{m\acute{i}n}} = \left| \frac{\tau_{\psi}}{u \cdot N_r} \right| \quad (1)$$

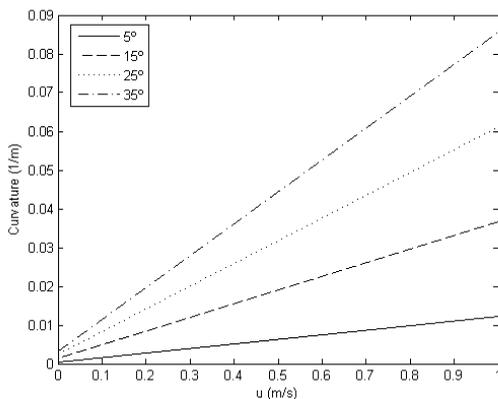
onde $\kappa_{m\acute{a}x}$ é a curvatura máxima, $\rho_{m\acute{i}n}$ é o raio mínimo de manobra, τ_{ψ} é o torque ao redor do eixo Z, u é a velocidade linear do veículo, e N_r é um parâmetro de resistência hidrodinâmica do veículo.

Esse modelo foi testado com o uso do MATLAB, usando os coeficientes hidrodinâmicos mapeados por Wang, Zhang e Schaefer (2014), apresentados na equação (2) e na Figura 67 (PROENÇA, 2016):

$$\kappa_{m\acute{a}x} = |0,00009375 \cdot \beta + 0,00235625 \cdot \beta \cdot u| \quad (2)$$

onde β é o ângulo do leme vertical.

Figura 67 - Variação da curvatura.



Fonte: Proença (2016).

Como exemplo, para $\beta = 35^\circ$ e $u = 1\text{m}$ (ou 1,94 nós), a curvatura máxima é de $0,0857\text{m}^{-1}$ e o raio mínimo de curvatura de 11,67m.

Esses valores são importantes para permitir a previsão do movimento que será necessário quando o veículo precisar mudar de direção, como será visto a seguir.

5.3 Caminhos para cobertura completa

O relevo e traçado apresentados na Figura 36, Figura 37, Figura 38 e Figura 59 evidenciam que parte da capacidade que um equipamento de inspeção precisa ter é a manobrabilidade que lhe garanta poder executar essa tarefa seguindo o caminho planejado.

Mudanças na direção do equipamento a ser inspecionado levam à necessidade direta de adequação da trajetória do veículo de inspeção para que esse fique o mais paralelo possível aos dutos e dentro da zona de inspeção. Esse paralelismo é importante para a coleta de dados, pois:

- A qualidade da coleta de dados depende diretamente dos parâmetros de inspeção, dentre eles a distância entre o equipamento de inspeção e do objeto a ser inspecionado, as condições ambientais;
- O ambiente marinho pode atrapalhar a coleta de dados, tendo em vista que a qualidade da água pode afetar a qualidade dos dados, sobretudo em inspeções visuais;
- Equipamentos de inspeção são calibrados para trabalharem a uma distância ideal, abaixo ou acima da qual a perda de resolução resulta na perda de dados;
- Ser capaz de acompanhar a estrutura a ser inspecionada confere ao AUV a possibilidade de medir constantemente sua posição, evitando perda de cobertura e colisões com corpos em áreas não mapeadas (fora da rota traçada);
- O veículo também precisa manter a referência para os casos de desvios, que são gerados tanto por fatores externos, como por correntes oceânicas ou maré, como são fatores internos, a partir do controle de colisão do veículo.

Para atender a esses requisitos de qualidade, não basta somente que a rota traçada seja correta, assim como os pontos de controle sejam identificados pelos meios de controle, é necessário que também o veículo seja capaz de executar manobras necessárias para:

- Manter o curso para executar a inspeção em todas as seções do equipamento;
- Corrigir a trajetória mesmo sob ação de agentes externos;

- Desviar de obstáculos e retornar à posição de referência estabelecida.

A rota deverá sempre ser definida para cada situação, módulo de sensores, objetivo etc. O traçado das estruturas influencia inclusive a escolha dos sensores, pois mudanças bruscas podem gerar erros nos dados coletados. Ademais, é importante que o sensor possa cobrir toda a área de varredura pretendida, e para tal pode ser necessária mais de uma passagem do veículo sobre o objeto de estudo.

Meios de controle simples e efetivos seriam de marcos autossimilares pode definir os pontos de controle de passagem do veículo, assim como controlar sua localização e servir de referência para os dados coletados.

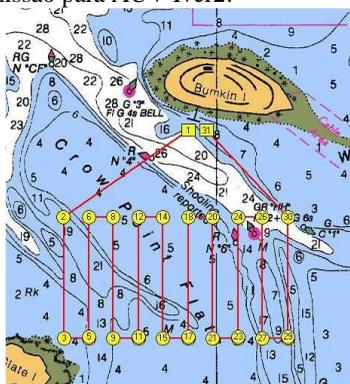
Como exposto no *caput* deste capítulo, o trajeto para o emprego do AUV para inspeção de um trecho de duto submarino está sob estudo.

A principal característica do campo de inspeção é sua extensão, de aproximadamente 8km, como exposto no capítulo 3, principalmente se comparada à sua largura, de cerca de 30m (considerando os dutos e o terreno próximo a ele).

Ao planejador do serviço é dada a tarefa da escolha de como cobrir a área a ser inspecionada e garantir a leitura completa, dentro das limitações do veículo e do ambiente.

Muito citado na literatura técnica, o tipo de trajeto para conseguir cobertura total da área ser inspecionada é conhecido como *lawn-mower* (ANDERSON e CROWELL, 2005; BINGHAM *et al.*, 2010; HILDEBRANDT e HILLJEGERDES, 2010; SANZ *et al.*, 2013; SØRENSEN e LUDVIGSEN, 2015), que pode ser traduzida do inglês como cortador de grama. É bastante intuitiva, seu nome deriva do movimento esperado para um cortador de grama poder cobrir todo um gramado sem deixar falhas no corte. É um trajeto senoidal, também chamado de bustrofédon, que demanda a mudança regular de direção e sentido do veículo para garantir uma cobertura completa da área inspecionada (Figura 68 e Figura 69). Esse movimento é usado para grandes campos de inspeção, sobretudo quando tanto a largura quanto o comprimento tem valores muito superiores ao alcance dos sensores. É uma variante do “problema de cobertura do caixeiro viajante” (PROENÇA, 2016), que precisa passar por uma lista de cidades passando pelas vizinhanças de todas elas. As estratégias de planejamento de movimento para cobertura desconsideram a cinemática e a dinâmica do veículo (PROENÇA, 2016).

Figura 68 - Plano de missão para AUV Iver2.



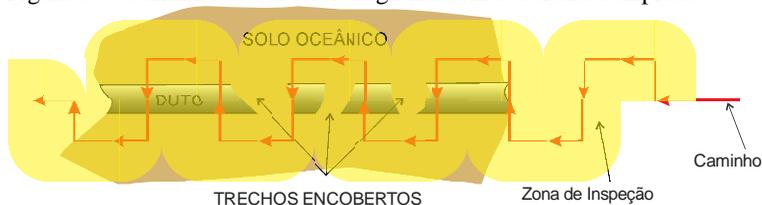
Fonte: Anderson e Crowell (2005).

Os requisitos que o robô precisa cumprir para a cobertura da área (CAO, HUANG e HALL, 1988, *apud* PROENÇA, 2016):

- Passar por todos os pontos;
- Sem sobreposição;
- Operação contínua e sequencial;
- Evitar colisão;
- Caminhos simples
- Determinar um caminho ótimo.

A Figura 69 representa o emprego desse caminho para a varredura de inspeção para dutos submarinos, sugerida neste capítulo, que é bastante diferente daquelas às quais é empregado normalmente, pois, neste caso, o comprimento é muito superior à largura da zona de inspeção que é poucas vezes maior que o alcance dos sensores.

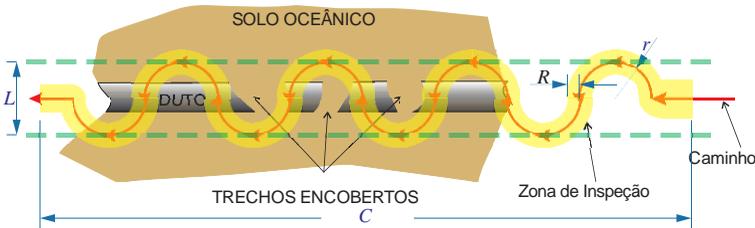
Figura 69 - Caminho de cortador de grama com cobertura completa.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

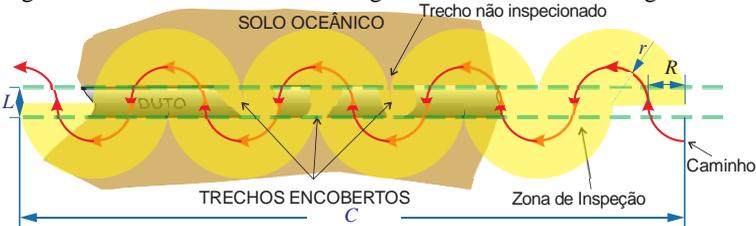
A Figura 69 mostra uma mudança de direção a 90° que exigiria um raio de manobra de $0m$, assim como a parada do veículo a cada ocasião.

Figura 72 - Caminho de cortador de grama com raio de manobra maior que raio de alcance de sensor.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 73 - Caminho de cortador de grama com sensores de longo alcance.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Quando o raio de manobra r for menor ou igual ao raio de alcance dos sensores R (Figura 74), a menor distância percorrida para cobertura completa da zona de inspeção (sem sobreposição, com comprimento total da zona de inspeção C e largura da zona de inspeção L) pode ser calculada como é apresentado a seguir.

Para cada avanço a equivalente a $4R - l$ (onde l é a largura de sobreposição do sinal dos sensores, Figura 75), o veículo percorre o caminho de:

$$a = 2L + 2\pi \cdot r \quad (3)$$

Ao percorrer a distância total da zona de inspeção C , o veículo executa o seguinte número de avanços N_a :

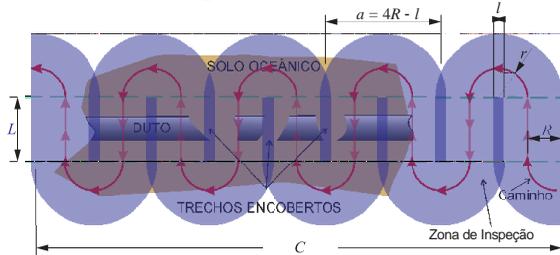
$$N_a = \frac{C}{4R - l} \quad (4)$$

E a distância total percorrida pelo veículo no caminho é o produto do avanço a pelo número de avanços N_a :

$$D = a \cdot N_a = (2L + 2\pi \cdot r) \frac{C}{4R - l} \quad (5)$$

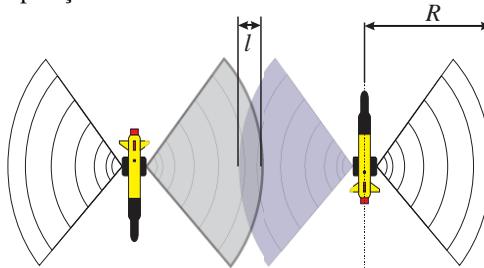
$$D = C \frac{(L + \pi \cdot r)}{(2R - l)} \quad (6)$$

Figura 74 - Caminho com sobreposição de sinal dos sensores.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

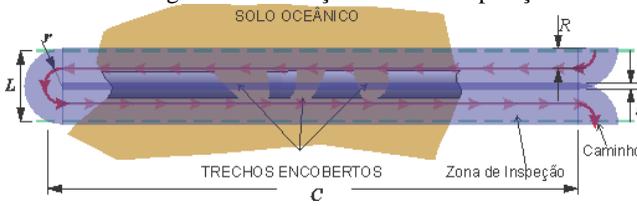
Figura 75 - Sobreposição de sinal dos sensores.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Numa estratégia de passagens múltiplas, proposta neste capítulo, o veículo não precisaria de mudanças constantes de direção, como ocorre no caso do caminho de cortador de grama, e a menor distância percorrida D pode ser calculada como segue.

Figura 76 - Caminho longitudinal ao traçado com sobreposição de sinal.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para cada avanço a o veículo percorre o caminho de:

$$a = C + \frac{\pi \cdot r}{2} \quad (7)$$

Ao percorrer a distância total da zona de inspeção C , o veículo executa o seguinte número de avanços N_a :

$$N_a = \frac{L}{2R - l} \quad (8)$$

E a distância total percorrida pelo veículo no caminho é o produto do avanço a pelo número de avanços N_a :

$$D = a \cdot N_a = L \frac{\left(C + \frac{\pi \cdot r}{2}\right)}{(2R - l)} \quad (9)$$

Uma comparação entre as equações (6) e (9) esclarece que a escolha de múltiplas passagens percorre uma distância menor para o duto, pois o numerador da equação (6) sempre será maior que o da equação (9), dado que $C \cdot r \cdot \pi$ será sempre maior que $L \cdot r \cdot \pi / 2$.

Outra consideração é que, para um número par de passagens, o caminho de múltiplas corridas fará com que o veículo retorne ao ponto de partida. O caminho de cortador de grama tende a levar o veículo para longe do ponto de partida, e o veículo deverá percorrer um novo deslocamento para o retorno.

Em múltiplas passagens o veículo tende a manter velocidade de cruzeiro, mais alta que velocidade para mudança de direção e mais eficiente energeticamente.

Essas mudanças contínuas de direção estão sujeitas a erros cumulativos, tanto devidos a forças externas ao veículo como a falhas na

propulsão ou na previsão da posição, a trajetória seria afetada, gerando uma perda de cobertura ou gasto desnecessário de energia e tempo. Essa trajetória gera mais erro sistemático e dificulta o trabalho para que o veículo volte a encontrar o traçado em áreas encobertas longas.

Independente da escolha de trajeto a se adotar para a varredura do duto, uma ocorrência comum no serviço de inspeção externa de dutos é a interrupção da continuidade do traçado, como, por exemplo, dutos enterrados que ficam inacessíveis para sensores como câmeras ou SVL, ver Figura 77. É necessário, portanto, prever o comportamento do veículo em tais casos é orientar sua programação a reencontrar o traçado e continua a missão.

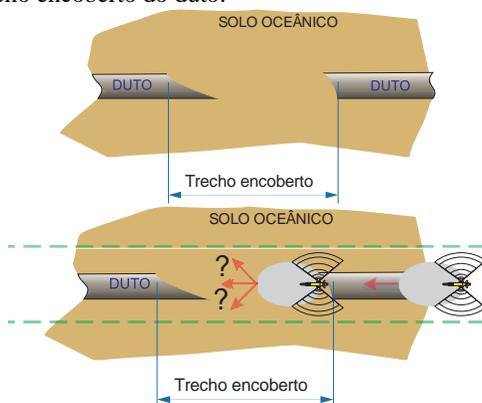
Figura 77 - Interrupção de traçado e perda de sinal de inspeção



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Essas ocorrências são problemas tanto para a cobertura de inspeção quanto para a localização do veículo em serviço (SLAM), já que há a perda da principal referência do movimento, a estrutura (Figura 78). A continuidade da estrutura é premissa essencial no planejamento do movimento. É preciso salientar que essa dificuldade só existe para sistemas que precisam de visada direta ao equipamento, que é o caso de câmeras e sonares como o SAS e o SVL.

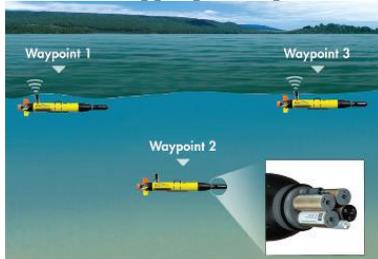
Figura 78 - Trecho encoberto do duto.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Quando ocorre a perda da referência, o veículo precisa adotar estratégias para suprir essa falha. Uma das possíveis soluções é apresentada na Figura 79, o veículo emerge a um ponto em que pode receber sinais de GPS e assim se localizar, e com base em padrões de reconhecimento, pode retornar ao último ponto mapeado na inspeção. Outra possibilidade seria o veículo ignorar a área não mapeada e procurar o próximo ponto acessível da estrutura, através do padrão de reconhecimento e geolocalização, nesse caso, haveria perda de área coberta.

Figura 79 - Rotina do AUV Ecomapper para adquirir sinais de GPS

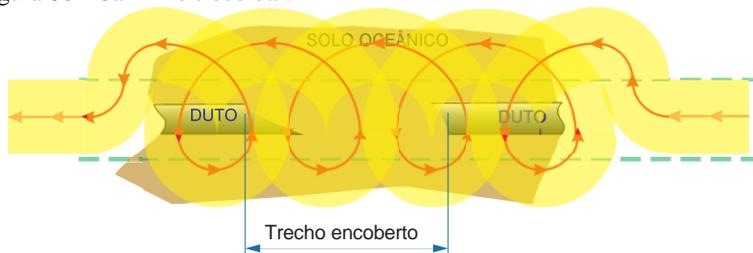


Fonte: YSI Incorporated (2017).

A solução proposta neste trabalho é de uma rota planejada que utiliza o modelo de curvas trocoides, ilustradas na Figura 80. Ela permite que o veículo faça uma varredura em área estreita, se necessário, fazendo com que o veículo mantenha sua manobra somente em um sentido,

horário ou anti-horário. Ela tem uma cobertura equivalente à de cortador de grama e respeita o raio de curvatura do veículo, além de, ao fazer diversas passagens sobre a estrutura em intervalos mais curtos, ser mais eficiente para a retomada do traçado. A sobreposição evita que hajam áreas não cobertas e aumenta a chance de se encontrar novamente o traçado do duto.

Figura 80 - Caminho trocoidal.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como há o movimento força retorno ao trecho já inspecionado, é possível identificar o ponto onde houver a perda do traçado e, a partir da sua orientação, possivelmente prever em qual direção está o próximo trecho.

Esse caminho gera erro sistemático com a possibilidade de o veículo não conseguir manter o raio de curvatura esperado além de aumentar a distância percorrida.

A curva trocoide é representada parametricamente como:

$$x = a \cdot t - b \cdot \text{sen } t \quad (10)$$

$$y = a - b \cdot \text{cos } t \quad (11)$$

onde $t \in \mathbb{R}$, para uma trajetória de veículo, x seria a sua distância no eixo longitudinal ao deslocamento, y seria sua distância no eixo ortogonal ao deslocamento, a seria o mínimo raio de curvatura possível para o veículo, b seria o raio de ação do sensor utilizado para a varredura e t seria o ângulo direcional do veículo (controlado pelos sensores inerciais e pela atuação dos rotores e do leme do veículo). Para que a trocoide tenha uma superposição, como mostrada na Figura 80, o valor de a deve sempre ser inferior ao valor de b , sendo, portanto, conhecida como cicloide prolata.

Nas equações (10) e (11), ao se aumentar os valores para a , a distância entre os centros de cada voluta aumenta. Ao se aumentar o valor

de b , é o diâmetro das volutas que aumentam. Esses parâmetros auxiliam à configuração da trajetória à área de cobertura desejada.

5.4 Comentários sobre o capítulo

Serviços como inspeção visual são têm demanda recorrente que pode ser frequentemente atendida por um AUV com capacidade para a tarefa.

Com a Tabela 20, foi atingido o objetivo de propor uma abordagem para inspeção para o AUV Ecomapper idealizado. Adicionalmente, a localização com o uso de SLAM para acompanhamento do traçado dos dutos submarinos e a definição de um caminho específico para inspeção, marcos autossimilares e magnetos permanentes como referência definem outro objetivo específico atingido.

O planejamento de movimento poderá ser aprimorado com uma programação avançada ou com a introdução de inteligência artificial. Atualmente, algoritmos como os propostos por Proença (2016) procuram fornecer a capacidade para o veículo evitar obstáculos. No entanto, no caso específico avaliado, de inspeção de dois dutos submarinos, para os quais o ambiente é conhecido e não há obstáculos fixos, a única solução que resta é que o próprio veículo possa processar seu caminho, uma vez que qualquer barreira ao longo do caminho não pode ser prevista.

A escolha de um caminho de varredura completa convencional conhecido como cortador de grama não se mostrou eficiente, sobretudo em comparação ao método proposto de múltiplas passagens. Neste método, o veículo deve percorrer todo o caminho longitudinalmente à estrutura tantas vezes quantas forem necessárias para a cobertura completa.

Por fim, em casos em que o veículo segue a estrutura inspecionada e trechos tornam-se invisíveis aos sensores (trechos encobertos), foi proposta uma rotina de mudança de trajeto utilizando curvas trocoides para busca da continuidade do duto.

Em todos os casos de mudança de direção, incluindo a varredura com as trocoides, é importante conhecer o mínimo raio de manobra possível e o modelo proposto por Proença (2016) fornece a referência necessária.

O Apêndice apresenta uma análise da transição entre o caminho anterior à perda do traçado do duto e a curva trocoide proposta.

6 CONCLUSÃO

O desafio deste trabalho foi de conhecer o estado atual da tecnologia de inspeção submarina aplicável para um caso real e uma ferramenta pré-existente que fosse adaptável.

O veículo indicado é comercial, já foi usado para iniciativas similares por outros autores e se mostra bastante versátil, permitindo a instalação de uma série de instrumentos de medição e também adaptações ao projeto de fábrica.

A aplicação de veículos subaquáticos na atividade de inspeção ainda sofre com a falta de regulação em normas e padrões industriais onde a presença de mergulhadores ainda é culturalmente forte, sobretudo porque é uma tecnologia mais recente que as próprias normas (JACOBSON, 2013). Desafios como o apresentado por este trabalho e outros similares são o início dessa mudança de cultura e pode permitir que esse avanço tecnológico aumente a segurança e o alcance dos serviços subaquáticos.

A revisão bibliográfica inicial foi o primeiro passo para conhecer esse meio tecnológico. Diversos autores e centros de pesquisa se ocupam em executar iniciativas próprias de veículos subaquáticos não tripulados. Foi uma etapa indispensável para introdução ao assunto e foi a oportunidade de reconhecer o panorama da área de robótica submarina.

Dentre os veículos estudados, destacam-se duas plataformas: o ROV, que necessita de comandos externos e operadores treinados, e o AUV, que é programado para executar tarefas e enfrentar adversidades sem ajuda de um operador.

Adicionalmente, para entender o ambiente submarino e a demanda de serviços para equipamentos inseridos nesse meio exigiu que o conhecimento fosse buscado diretamente no campo de trabalho, através de profissionais da área, como mergulhadores e técnicos. Esse conhecimento não está normalmente disponível em publicações científicas, e foi um desafio que trouxe frutos proveitosos.

O serviço de inspeção submarina, devido à dificuldade de acesso do meio, comumente é executado de maneira direta por mergulhadores (mesmo em situações instáveis, como após desastres naturais, MURPHY, 2009) e acaba não envolvendo as mesmas tecnologias disponíveis para o serviço em terra, que são desenvolvidas para trabalho seco. Mesmo com a dificuldade tecnológica, os trabalhos de inspeção para equipamentos submarinos é extenso e frequente.

Foi possível reunir uma lista de equipamentos de inspeção usualmente utilizados em ambiente subaquático, através de mãos

humanas ou de máquinas especialmente desenvolvidas. Mesmo disponíveis, muitas técnicas são somente empregadas em equipamentos bastante robustos.

A pesquisa congregou argumentos que fomentam o desenvolvimento de ferramenta específica para aplicações menos severas que as normalmente empregadas em alta profundidade, que são a maioria das presentes nas fontes bibliográficas.

A escolha do AUV, por sua capacidade de cobrir grandes áreas de maneira rápida e eficiente o torna uma ferramenta excelente para o serviço. A adaptação do Ecomapper da YSI *Incorporated* para que possa executar os serviços esperados é uma de engenharia que se mostra bastante promissora. Esse modelo já foi adotado pela Universidade de Michigan, que utilizou um veículo com dimensões similares e conseguiu adaptá-los a novos sensores. O mesmo pode ser observado para o Ecomapper, que foi utilizado como veículo para a Universidad Politécnica de Cartagena.

Com uma concepção de plataforma modular, diferentes sensores poderiam ser adicionados em diferentes ocasiões ao AUV em questão, permitindo que ele possa executar tarefas bastante complexas, mesmo que em etapas diferentes, o que foi proposto no capítulo 4.

Por fim, o desafio da autonomia é maior que aquele de adaptar as ferramentas de inspeção a uma plataforma já existente. E esse desafio se concentra principalmente na definição de caminho e na programação da autonomia do veículo para a inspeção de dutos. A decisão de múltiplas corridas para cobrir completamente a área a ser inspecionada, comparada a outros caminhos citados na bibliografia, se mostrou mais eficiente e com menor custo energético. As diferentes corridas coletam informações necessárias para o mapeamento que será utilizado para a corrida sucessiva. Como os dutos são estruturas contínuas, seu traçado serve de meio de controle para a orientação do veículo, equipado com SLAM. Marcos fixos autossimilares e magnéticos oferecem referência de localização para o veículo.

Durante a execução das varreduras, é comum que áreas encobertas interrompam a continuidade da inspeção. Nesses casos, a estratégia de um caminho de cicloide prolata permite ao veículo autônomo executar uma varredura ampla e completa de uma área extensa submarina e localizar novamente seu objeto de interesse.

6.1 Tendências futuras e desafios

Sørensen e Ludvigsen (2015) descreve alguns desafios futuros, como as tecnologias em desenvolvimento que criarão novas possibilidades, tais como:

- Tecnologia da informação e comunicação;
- Nanotecnologia;
- Biotecnologia;
- Tecnologia de materiais;
- O desenvolvimento em múltipla escala e redistribuição de sistemas por sensoriamento ou intervenção podem ter ganhos com integração de disciplinas e tecnologias;
- Veículos híbridos AUV-ROV seriam um passo intermediário para operações que envolvam manipulação, no entanto o reduzido canal de comunicação para os AUVs se mostram um grande entrave para a evolução nesse sentido;
- Inteligência artificial e auto-aprendizado (STREEKSOFF, 2011).

Redes de veículos, no entanto, oferecem diversas vantagens, tais como:

- Multiplicação de força;
- Propriedades complementares entre veículos;
- Dinâmica do processo de interesse;
- Maior cobertura espacial.

Para essa estratégia, a comunicação entre os veículos precisa melhorar, permitindo, ainda, o controle de mudanças necessário para o trabalho em conjunto. Bessa *et al.* (2004) apresentam um projeto para operação via internet de ROVs com capacidade de executar algumas tarefas de maneira autônoma.

Vários trabalhos citam o emprego de veículos híbridos entre ROV e AUV, alguns não possuem casco estanque tubular (tal qual um torpedo), como o Zeabus de Tipsuwan e Hoonsuwan (2015), que permite manobras mais suaves, porém dificultando tarefas em velocidade de cruzeiro. Citado por Jacobson (2013), veículos híbridos também teriam a capacidade de efetuar algumas tarefas de manutenção. O SWIMMER, citado por Peñalver *et al.* (2015), foi usado para transportar ROVs até o ponto em que seu uso era necessário. O próprio Girona 500, citado por Palomeras *et al.* (2014), é um híbrido que tem sido utilizado em diferentes testes e projetos com sucesso.

McAulay (1977) cita uma aplicação de magnetômetro para localização de submarinos (no caso dele, a partir de aviões), outro uso aplicável tanto para técnica de magnetometria quanto para o uso de AUVs na localização de naufrágios, como nos recentes acidentes dos submarinos K-141 Kursk, da Rússia (em 2000), e ARA San Juan, da Argentina (em 2017). É viável que pequenos AUVs com navegação por ponto isolado possam ser liberados de embarcações no fundo do mar e assim emitir chamados de socorro e de localização do naufrágio ou, de maneira alternativa, AUV com ampla cobertura de buscas estejam disponíveis para rápida investigação subaquática.

A Tabela 5 relacionou desafios no âmbito do projeto PANDORA (LANE *et al.*, 2015) que demonstram tendências para inovações e onde os esforços podem se concentrar.

6.2 Propostas para o futuro

Algumas tarefas não couberam dentro do escopo deste trabalho e exigirão desenvolvimento futuros. Um deles será definir o modelo de trajetória a ser incluída no AUV para testes em ambiente controlado. O ambiente controlado para testes de um veículo com as dimensões do Ecomapper é bastante difícil de encontrar, sendo ainda viável seu teste em águas oceânicas rasas abrigadas.

Desenvolver simuladores e executá-los para prever o comportamento do AUV é uma tarefa que grande importância ainda a ser cumprida. O ROS é uma plataforma que pode ser bastante promissora para implementação de modelos, é citada por vários autores, como Prats *et al.* (2012), Ridao *et al.* (2015), Fernández *et al.* (2013), dentre muitos outros.

É necessário ainda desenvolver planos de controle de trajetória e localização, ou seja, definir o comportamento do veículo para situações inesperadas.

A construção de um projeto piloto baseado no modelo proposto, com o uso de um veículo comercial como plataforma e a inclusão das tecnologias necessárias para torná-lo uma ferramenta de inspeção que possa ser empregada pela indústria. O Ecomapper precisa de projetos específicos de suportes externos para a instalação de novos sensores, tais como adotados por Pagán (2016).

A evolução de baterias favorecerá a melhoria do produto, tanto na diminuição de peso quanto no aumento do tempo de missão. O carregamento solar apesar de lento permite o aumento na segurança do veículo, pois mesmo descarregado ele poderá se reativar com uma recarga

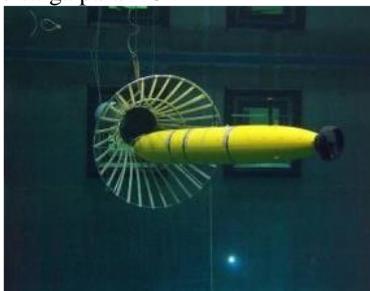
posterior – com um planejamento da fluatibilidade e alívio de lastro para que o veículo vá para a superfície nesses casos. A substituição rápida de baterias é uma estratégia eficiente para a recarga entre corridas, o que, no entanto, exigirá a remoção do veículo do meio aquático assim como um meio de manter tanto os engates quanto as próprias baterias secas.

Como parte do desenvolvimento futuro do veículo estará a adaptação da eletrônica para os novos sensores, mantendo a blindagem contra ruídos entre sensores. A capacidade de processamento precisa conferir um eficiente tratamento de dados em tempo hábil, sobretudo o tratamento de imagens e sua utilização para o SLAM.

O início da missão, com a partida do veículo, e sua posterior recuperação são etapas que merecem atenção especial. A missão pode ter tempo máximo de deslocamento (em casos de emergência) ou local de partida determinado. Da mesma forma, a recuperação depende da capacidade do veículo retornar ainda tendo carga em suas baterias ou que emerja quando perder sua carga, e ainda emitir sinais de que auxiliem sua localização, como um sinalizador visual (também conhecido como *pinger*, Figura 56).

A Figura 81 mostra uma estação de docagem, proposta para um AUV bastante similar ao proposto neste trabalho. Essa solução diminui o tempo de mobilização e aumenta a autonomia do veículo, pois serve tanto para ponto de recarga de energia como para descarga de dados. Estações como essas aumentarão a autonomia do veículo e da missão.

Figura 81 - Estação de carga para AUV



Fonte: Pagán (2016)

As iniciativas apresentadas neste trabalho são em sua quase totalidade estrangeiras. A evolução desse projeto é uma oportunidade para a engenharia nacional para participar desse promissor mercado, sobretudo através de investimentos da indústria do Petróleo e o incentivo a ideias inovadoras é necessário (GARCIA, 2014).

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 16244: **Ensaio não destrutivo – Ensaio visual – Inspeção subaquática**. Rio de Janeiro. 2013.

ABNT. **NBR ISO 15589: a proteção catódica de dutos terrestres**. Rio de Janeiro. 2016.

ALBIEZ, J.; DUDA, A.; FRITSCHÉ, M.; REHRMANN, F.; KIRCHNER, F. **CSurvey - An autonomous optical inspection head for AUVs**. *Robotics and Autonomous Systems*, [s.l.], v. 67, p. 72–79, 2015. ISSN: 09218890, DOI: 10.1016/j.robot.2014.10.004.

ALLEN, George I.; PURPURA, J.; OVERWAY, D. **Measurement of magnetic noise characteristics on select AUVs with some potential mitigation techniques**. *Oceans 2002 Mts/Ieee Conference & Exhibition, Vols 1-4, Conference Proceedings*, [s. l.], p. 978–984, 2002.

AMMAR, A. GEOSPATIAL GEEKS. **How DGPS (Differential Global Positioning System) Works**: <http://www.geospatialgeeks.com/differential-gps-working/>. Acessado em 9 de dezembro de 2017.

ANDERSON, Bob; CROWELL, Jon. **Workhorse AUV – A cost-sensible new Autonomous Underwater Vehicle for Surveys / Soundings , Search & Rescue , and Research**. [s. l.], p. 1–6, 2005.

ANDONIAN, M., CHYBA, M., GRAMMATICO, S., & CAITI, A. **Using geometric control to design trajectories for an AUV to map and sample the summit of the Loihi submarine volcano**. *2010 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles, AUV 2010*. <https://doi.org/10.1109/AUV.2010.5779646>

API – American Petrol Institute. **5L: Specification for Line Pipe**. Washington D.C./EUA. 2004.

ARNONE, R.A., A.M. WOOD, AND R.W. GOULD JR. **Water mass classification**. *Oceanography*. [s. l.], 17(2), 14-15. 2004

ARRUDA, Diego Henrique Sertich. **Projeto de um Veículo Subaquático Remotamente Operado de Classe de Trabalho com**

Manipuladores. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

BACK, Nelson; OGLIARI, Andre; DIAS, Acires; SILVA, Jonny Carlos da. **Metodologia de projeto integrado de produtos.** 1st ed. São Paulo. Monole Editora Ltda, 2006.

BAHR, Ludwig; LERCH, Reinhard. **Beam profile measurements using light refractive tomography.** IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, [s. l.], v. 55, n. 2, p. 405–413, 2008.

BASTEZINI, Eduardo Micael. **Levantamento dos Esforços Hidrodinâmicas de um AUV Utilizando Software CFD.** Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Joinville. 2016. 47p.

BESSA, Wallace Moreira; DUTRA, Max Suell; KREUZER, Edwin; REIS, Ney Robinson Salvi dos. **Projeto e construção de um veículo robótico submarino teleoperado via internet.** III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2004. [s.l.]. 2004.

BINGHAM, Brian; FOLEY, Brendan; SINGH, Hanumant; CAMILLI, Richard; DELAPORTA, Katerina; EUSTICE, Ryan; MALLIOS, Angelos MINDELL, David; ROMAN, Christopher; SAKELLARIOU, Dimitris. **Robotic Tools for Deep Water Archaeology: Surveying an Ancient Shipwreck with an Autonomous Underwater Vehicle.** Journal of Field Robotics, [s. l.], v. 27, n. 6, p. 702–717, 2010.

BOBKOV, V.; MOROZOV, M.; BAGNITSKY, A.; INZARTSEV, A.; PAVIN, A.; SCHERBATYUK, A.; TUPHANOV, I. **Simulation system for underwater research vehicle.** Scientific Visualization, 2013.

BRIGGS, A. J., SCHARSTEIN, D., BRAZIUNAS, D., DIMA, C., & WALL, P. **Mobile Robot Navigation Using Self-similar Landmarks.** In Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation. 2000. (pp. 1428–1434). San Francisco, CA.

BROWN, H., KIM, A., & EUSTICE, R. **Development of a multi-AUV slam testbed at the university of Michigan.** Oceans 2008. 2008. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2008.5151880>

BUDNY, PEDRO. **Fotografia do AUV Ecomapper do LRRG,** Joinville. 2017.

BURGUERA, A.; BONIN-FONT, F.; OLIVER, G. **Trajectory-Based Visual Localization in Underwater Surveying Missions.** Sensors, (15), 1708–1735. 2015.

CHOI, H.S. **Free spanning analysis of offshore pipelines.** Ocean Engineering. Volume 28, Issue 10, October 2001, Pages 1325-1338.

CHURCH, R. A., WESTRICK, R. F., WARREN, D. J., & TECHNOLOGIES, C. **OTC 21515 Deep-water Archaeological AUV Surveys and Photo Capabilities,** (May), 2–5. 2011

COLLINS, K. **Untethered AUV's Can Reduce Costs for Offshore Inspection Jobs.** 25th Annual Offshore Technology Conference (OTC), Houston, 3-6 May 1993, 299–308. 1993.

CONFESSOR, W. **Tendências do Setor Automotivo Brasileiro: Plataformas Globais,** 65. 2012.

COPROS, T.; SCOURZIC, D. **Global Change: Mankind-Marine Environment Interactions.** 2011. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-8630-3>

CRANCH, G. A.; NASH, P. J.; KIRKENDALL, C. K. **Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications.** IEEE Sensors Journal, 3(1), 19–30. 2003. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2003.810102>

CROWELL, Jon. **Design Challenges of a Next Generation Small AUV.** In: 2013 OCEANS - SAN DIEGO 2013, Fall River, MA, USA. *Anais...* Fall River, MA, USA

DEEPSTAR. Disponível em: www.deepstar.org. Acessado em 09 de dezembro de 2017.

DPREVIEW. Disponível em:

<https://www.dpreview.com/forums/thread/2791860>. Acessado em 11/12/2017.

EUSTICE, Ryan M.; M.; PIZARRO, Oscar; SINGH, Hanumant **Visually augmented navigation for autonomous underwater vehicles.** IEEE Journal Oceanic Engineering, 2008. v. 33, n. 2, p. 103–122.

EUSTICE, R.; BROWN, H.; KIM, A. **An overview of AUV algorithms research and testbed at the University of Michigan.** 2008 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles, AUV 2008. 2008.

FERNÁNDEZ, José Javier, Mario PRATS, Pedro J SANZ, Juan Carlos GARCÍA, Raul MARÍN, *et al.*, **Grasping for the Seabed, Robotics and Automation Magazine, IEEE**, 2013, 121–30.

FLORIANI, B. L. **Proposta de uma solução conceitual de um sistema de investigação subaquático para águas rasas.** Florianópolis. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

GALCERAN, E.; CARRERAS, M. **Planning coverage paths on bathymetric maps for in-detail inspection of the ocean floor.** Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. Karlsruhe, 2013. 101p.

GARCIA, Rubens Roberto Faria. **Canal Subterrâneo de Comunicações.** Editora Letra d'Água. Joinville. 2014. P. 80.

GEORGE, Robert A, GEE Lindsay, W HILL Andrew, A THOMSON James, e JEANJEAN Philippe. **High-Resolution AUV Surveys of the Eastern Sigsbee Escarpment.** Proceedings of Offshore Technology Conference (OTC), (14139–MS). 2002. <https://doi.org/10.4043/14139-MS>

GOOGLE STREET VIEW. Disponível em:

<https://www.google.com/streetview/>. Acessado em 22/05/2017.

HAGEN, P. E. **Multi-sensor pipeline inspection with AUV.** Oceanology International, UUVS. London, 2014.

HAGEN, P. E. **Pipeline Inspection with AUV : Operational Experience and Lessons Learned**. Oceanology International, London. 2016

HEERMANCE, David; KULARATNE, Dhanushka; DANIEL, Jose; SOSA, Hernandez; HSIEH, M Ani; SMITH, Ryan N. **Design and Validation of a Micro-AUV for 3-D Sampling of Coherent Ocean Features**. In: OCEANS 2015. Washington D.C. EUA. Anais p 1-5. Washington D.C. EUA. 2015.

HILDEBRANDT, Marc; HILLJEGERDES, Jens. **Design of a Versatile AUV for High Precision Visual Mapping and Algorithm Evaluation**. In: 2010 IEEE/OES AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES 2010, Monterey, CA, EUA. **Anais...** p 1-6. 2010.

HOLLINGER, G. A.; MITRA, U.; SUKHATME, G. S. **Active classification: Theory and application to underwater inspection**. In Springer Tracts in Advanced Robotics (Vol. 100, pp. 95–110). 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29363-9_6

HURNI, M.; KIRIAKIDIS, K. **Planning the Minimum Time and Optimal Survey Trajectory for Autonomous Underwater Vehicles in Uncertain Current**. Robotics, 4(4), 516–528. 2015. <https://doi.org/10.3390/robotics4040516>

HURTOS, Natalia; PALOMERAS, Narcis; NAGAPPA, Sharad; SALVI, Joaquim **Automatic detection of underwater chain links using a forward-looking sonar**. Oceans 2013 MTS/IEEE. San Diego, 2013.

HURTÓS, Nàtalia; PALOMERAS, Narcís; CARRERA, Arnau; CARRERAS, Marc; BECHLIOULIS, Charalampos P.; KARRAS, George C.; HESMATI-Alamdari, Shahab; KYRIAKOPOULOS, Kostas. **Sonar-based chain following using an autonomous underwater vehicle**. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Chicago, 2014.

IBGE. Disponível em : <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/pmrg/faq.shtm#2>. Acessado em 9 de dezembro de 2017.

ITO, Y., KATO, N., KOJIMA, J., TAKAGI, S., ASAKAWA, K., & SHIRASAKI, Y. **Cable tracking for autonomous underwater vehicle**. Proceedings of IEEE Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology (AUV'94), 218–224. 1994. <https://doi.org/10.1109/AUV.1994.518628>

JACOBI, Marco e KARIMANZIRA, Divas. “**Underwater pipeline and cable inspection using autonomous underwater vehicles**”, 2013 MTS/IEEE OCEANS - Bergen, 2013, p. 1–6. <<https://doi.org/10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608089>>

JACOBI, Marco e KARIMANZIRA, Divas. “**Multi sensor underwater pipeline tracking with AUVs**”, 2014 Oceans - St. John's, OCEANS 2014, 2014. <<https://doi.org/10.1109/OCEANS.2014.7003013>>

JACOBI, Marco, e Thomas RAUSCHENBACH, “**A tool chain for AUV system testing**”, OCEANS'10 IEEE Sydney, OCEANSSYD 2010, 2010. <<https://doi.org/10.1109/OCEANSSYD.2010.5603626>>

JACOBSON, John, Pierce COHEN, Amin NASR, Art J SCHROEDER Jr., e Greg KUSINSKI, “**DeepStar 11304: Laying the Groundwork for AUV Standards for Deepwater Fields**”, Marine Technology Society Journal, 47 (2013), 13–18.

KANTHARIA, Raunek, “**How Single Point Mooring (SPM) Offshore Operation Works?**”. Disponível em: <http://www.marineinsight.com/offshore/how-single-point-mooring-spm-offshore-operation-works/>. Acessado 8 setembro 2016.

KIM, A.; EUSTICE, R. M. **Toward AUV survey design for optimal coverage and localization using the Cramer RAO lower bound**. Proceedings of the IEEE/MTS OCEANS Conference and Exhibition. Biloxi, 2009. KONGSBERG <http://www.oceanologyinternational.com>

KONGSBERG Maritime. Disponível em: km.kongsberg.com. Acessado em 10 de fevereiro de 2018.

KROS, H. **OTC 21969 Performing Detailed Level 1 Pipeline Inspection in Deep Water with a Remotely Operated Vehicle (ROV)**, 1–11. 2011

KUHN, V. N., DREWS, P. L. J., GOMES, S. C. P., CUNHA, M. A. B., & BOTELHO, S. S. DA C. **Automatic control of a ROV for inspection of underwater structures using a low-cost sensing.** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 37(1), 361–374. 2015. <https://doi.org/10.1007/s40430-014-0153-z>

LANE, D. M., MAURELLI, F., KORMUSHEV, P., CARRERAS, M., FOX, M., & KYRIAKOPOULOS, K. **PANDORA - Persistent autonomy through learning, adaptation, observation and replanning.** IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), 48(2), 238–243. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.039>

LAPIERRE, Lionel. **Underwater Robots Part I: Current Systems and Problem Pose.** [s.l.] : InTech, 2006. 27p. Disponível em: http://www.intechopen.com/books/mobile_robots_towards_new_applications/underwater_robots_part_i__current_systems_and_problem_pose

LLORT-PUJOL, G.; SINTES, C.; LURTON, X. **A New Approach for Fast and High-Resolution Interfometric Bathymetry.** IEEE Oceanic Engineering Society Newsletter, (Summer), 12–19. 2006

LOUREIRA, Paula Amorim. **Análise de Vão Livres em Dutos Rígidos.** Projeto de Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2011. 128p.

MARINHA DO BRASIL DIRETORIA DE PORTOS E COSTAS. **NORMAM 15 NORMAS DA AUTORIDADE MARÍTIMA PARA ATIVIDADES SUBAQUÁTICAS.** 2016.

MAURELLI, F., CARRERAS, M., SALVI, J., LANE, D., KYRIAKOPOULOS, K., KARRAS, G., CALDWELL, D. **The PANDORA project: A success story in AUV autonomy.** OCEANS 2016 - Shanghai. 2016. <https://doi.org/10.1109/OCEANSAP.2016.7485618>

MCAULAY, A. D. **Computerized Model Demonstrating Magnetic Submarine Localization.** IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-13(3), 246–254. 1977. <https://doi.org/10.1109/TAES.1977.308392>

MELLO, Wilyams Bezerra de. **Proposta de um Método Aberto de Projeto de Produto - Três Alternativas de Criação**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2011. 141 p.

MIDDLESWORTH, Mark van; KAESS, Michae; HOVER, Franz; LEONARD, John J.. **Mapping 3D underwater environments with smoothed submaps**. Springer Tracts in Advanced Robotics, 2015. v. 105, p. 17–30.

MINISTÉRIO DO TRABALHO, **NORMA REGULAMENTADORA 15 – Atividades e operações insalubres**. Brasília. 2015.

MORENO, Eduardo, “**Development Of Economical Modular Experimental Unmanned Underwater Vehicle Design and Feasibility Study Is Cooperative Robotics**”, 1–9. MURPHY. 2011.

MURPHY, Robin R. *et al.* **Robot-Assisted Bridge Inspection after Hurricane Ike**. In: 2009 IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON SAFETY & RESCUE ROBOTICS 2008, Denver, CO, EUA. **Anais...** Denver, CO, EUA. P 1-5. 2008.

NAKHKOUB, S., CHATRAEI, A., SHOJAEI, K. **Fuzzy Adaptive Control for Trajectory Tracking of Autonomous Underwater Vehicle**. Intelligent Procedures in Electrical Technological Technol, 4(16), 7. 2014.

NARIMANI, Mehdi; NAZEM, Soroosh; LOUEIPOUR, Mehdi. **Robotics vision-based system for an underwater pipeline and cable tracker**. 2009. <https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2009.5278327>

NASR, A., COURBOT, A., SA, T., GILMOUR, B., BIEDERMANN, C. **OTC 24224 A new approach to Pipeline Inspection using Autonomous Underwater Vehicles (AUV's)**, 6–9. 2013.

NDT RESOURCE CENTER. Disponível em: <https://www.nde-ed.org>. Acessado em 22 de novembro de 2017.

NORSK ELEKTRO OPTIKK AS 2004. Disponível em: <http://www.neo.no/research/pipeline/xplisit.html>. Acessado em 09 de dezembro de 2017.

OHI – ORGANIZAÇÃO HIDROGRÁFICA INTERNACIONAL.
MANUAL DE HIDROGRAFIA. Lisboa. Vol. 2005. 487p.

OHI – ORGANIZAÇÃO HIDROGRÁFICA INTERNACIONAL.
Special Publication 32. Londres. 1994.

ORTIZ, A., SIM, M., & OLIVER, G. **A vision system for an underwater cable tracker.** *Machine Vision and Applications*, 13(3), 129–140. 2002. <https://doi.org/10.1007/s001380100065>

ORTIZ, Alberto, Miquel SIMÓ, e Gabriel OLIVER, “**A vision system for an underwater cable tracker**”, *Machine Vision and Applications*, 13. 2002. 129–40 <<https://doi.org/10.1007/s001380100065>>

PAGÁN, Gabriel Carrasco, **.Evaluación y análisis de un AUV mediante CFD y estudio de alternativas operativas.** Proyecto Final de carrera. Universidad Politécnica de Cartagena, 2016. 147 p.

PALLAYIL, V., CHOTIROS, N. P. **AUV-Based Seabed Characterisation Using a Lightweight Towed Array System.** OTC-26693-MS. 2016.

PALOMERAS, Narcís, Antonio PEÑALVER, Miquel MASSOT-CAMPOS, Guillem VALLICROSA, Pep Lluís NEGRE, J. Javier FERNÁNDEZ, *et al.*, “**I-AUV docking and intervention in a subsea panel**”, *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2014, p. 2279–85. <<https://doi.org/10.1109/IROS.2014.6942870>>

PASAWANG, Thip; CHATCHANAYUENYONG, Theerayuth; SANGIAMVIBOOL, Worawat. “**QFD-based conceptual design of an autonomous underwater robot**”, 37. 2015. 659–68.

PEÑALVER, A., PÉREZ, J., FERNÁNDEZ, J. J., SALES, J., SANZ, P. J., GARCÍA, J. C., MARÍN, R. **Visually-guided manipulation techniques for robotic autonomous underwater panel interventions.** *Annual Reviews in Control*. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2015.09.012>

PETROBRÁS. Disponível em <http://www.PETROBRÁS.com.br/fatos-e-dados/>, acessado em 08 de agosto de 2017.

PETROBRÁS. **N-1487 - Inspeção de Dutos Rígidos Submarinos**. Rio de Janeiro. 2011.

PETROBRÁS. **N-1812 – Estruturas Oceânicas**. Rio de Janeiro. 2006.

PETROBRÁS. **N-2838 - Proteção Catódica para Instalações**. Rio de Janeiro. 2014.

PLESKACH, MARIA, **WiMust – A Fleet of AUVs for Seismic Surveys**. Disponível em: <https://www.hydro-international.com/content/article/wimust-a-fleet-of-auvs-for-seismic-surveys>. Acessado em 11 de dezembro de 2017.

PRATS, M., PEREZ, J., FERNANDEZ, J. J., & SANZ, P. J. **An open source tool for simulation and supervision of underwater intervention missions**. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2577–2582. 2012. <https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6385788>

PROENÇA, Leonardo Alexandrino. **Estratégias para planejamento de movimento de veículos subaquáticos baseado em G2CBS**. Dissertação de Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Florianópolis, SC, 2016. 121 p.

REEVES, T., MCLEOD, D., EMBRY, C., NICKERSON, B. **AUV-based 3d laser inspection for structural integrity management in deepwater fields**. Offshore Technology Conference. Houston, 2014.

RIDAO, P., CARRERAS, M., RIBAS, D., SANZ, P. J., & OLIVER, G. **Intervention AUVs: The next challenge**. *Annual Reviews in Control*, 40(40), 227–241. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2015.09.015>

ROCHA, C. R. **Planejamento de movimento de sistemas robóticos de intervenção subaquática baseado na teoria dos helicoides**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. 279. 2012.

ROMANO, L.N. **Modelo de Referência para o Processo de Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

SANZ, Pedro J.; RIDAO, Pere; OLIVER, Gabriel; CASALINO, Giuseppe; PETILLOT, Yvan; SILVESTRE, Carlos; MELCHIORRI, Claudio; TURETTA, Alessio. **Trident an european project targeted to increase the autonomy levels for underwater intervention missions.** Oceans 2013 MTS/IEEE. San Diego, 2013

SCARADOZZI, D David; ROSSI, Irena Radić; ZUŽIĆ, Kruno. **Geoposition data aided mosaicing for archeology sites documentation: the Islet of Bisaga (Kornati Archipelago) site case.** 2011 19th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2011. Corfu, 2011.

SIMONI, Roberto, **Síntese Estrutural de Cadeias Cinemáticas e Mecanismos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2008. 98 p.

SISMERG/CBMES – **NORMEG 01.** Vitória, ES. 2016.

SONAGLIO, Rangel, SIMONI, Roberto. WEIHMANN, Lucas. **Inspeção subaquática em águas rasas.** 26º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore - SOBENA 2016. 2016.

SØRENSEN, A. J., & LUDVIGSEN, M. **Towards integrated autonomous underwater operations.** IFAC-PapersOnLine, 28(2), 107–118. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.018>

SØRENSEN, A. J.; REFSNES, J. **Towards supervisory-switched control of hybrid underwater vehicles.** International Journal of the Society for Underwater Technology, 2009. Vol 28, No 4, p 141–150.

STARS NET-DIVER SCHOOL (2006) <http://pt.net-diver.org>, acessado em 22/05/2017.

STREEKSOFF, Héctor Galisteo, “**Propuesta de nuevos dispositivos, mejoras de circuitos y sistemas implementados en ROVs para trabajos de búsqueda y rescate.**” Universitat Politècnica de Catalunya, 2011. 127 p.

SUN, Feng.; XU, Wen.; LI, Jianlong. **Enhancement of the aided inertial navigation system for an AUV via micronavigation.** MTS/IEEE Seattle, OCEANS 2010, 2–5. 2010.
<https://doi.org/10.1109/OCEANS.2010.5664097>

SUN, Feihu; YU, Junzhi; XU, De. **Visual measurement and control for underwater robots: A survey.** 2013 25th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2013 . 2014. 333-338. 2013.
<https://doi.org/10.1109/CCDC.2013.6560944>

TIAN, W.-M. **Integrated method for the detection and location of underwater pipelines.** Applied Acoustics, 69(5), 387–398. 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2007.05.001>

TIPSUWAN, Y.; HOONSUWAN, P. **Design and implementation of an AUV for petroleum pipeline inspection.** Proceedings - 2015 7th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering: Envisioning the Trend of Computer, Information and Engineering, ICITEE 2015, 382–387. 2015 .
<https://doi.org/10.1109/ICITEED.2015.7408976>

VESTGARD, K., HANSEN, R., CONFERENCE, P. E., ENGINEERS, P., JALVING, B., & PEDERSEN, O. A. **The HUGIN 3000 Survey AUV.** ISOPE-2001 Elev. Int. Offshore Polar Eng. Conf., IV, 679–684/r702. 2001. Retrieved from <http://e-book.lib.sjtu.edu.cn/isope2001/pdf/papers/447.pdf>%5Cn%3CGo to ISI%3E://000171430500108

WANG, Yiwei, Nicolas BINAUD, Christian GOGU, Christian BES, e Jian FU, **“Determination of Paris’ law constants and crack length evolution via Extended and Unscented Kalman filter: An application to aircraft fuselage panels”**, Mechanical Systems and Signal Processing. Elsevier. 2015. 262–81. <<https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.04.027>>

WINDGURU. Disponível em www.windguru.com. Acessado em 22 de maio de 2017.

WOLFRAM ALPLA. Disponível em <http://www.wolframalpha.com> Acessado em 09 de dezembro de 2017.

YSI INCORPORATED. Disponível em: <http://www.ySI.com>. Acesso em: 22 de novembro de 2017.

YSI INCORPORATED. **Ecomapper AUV 9**. Disponível em: <http://www.ySIsystems.com/productsdetail.php?>. Acessado em: 22 de maio de 2016.

ZHANG, Y.; NEGAHDARIPOUR, S.; LI, Q. **Low bit-rate compression of underwater imagery based on adaptive hybrid wavelets and directional filter banks**. Signal Processing: Image Communication. Vol. 47 p. 96–114. 2016.

APÊNDICE

Este apêndice apresenta um modelo de transição entre o caminho planejado do veículo e o caminho necessário para mapear essa área encoberta merece uma consideração especial. Um comparativo entre duas curvas de transição, uma circular e a outra senoidal é apresentada a seguir.

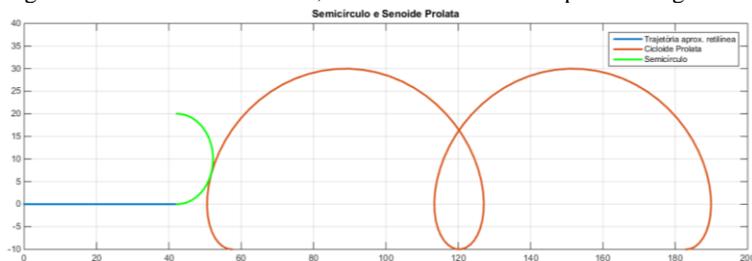
Considerando que o veículo até o momento em que deixa de rastrear a estrutura segue um deslocamento retilíneo ($y = 0$ para todo x), a adoção de um caminho cicloidal prolata passa necessariamente por uma transição, que em seu início deve tangente ao deslocamento retilínea e em seu fim seja tangente ao caminho trocoidal. Essa característica é comum a um incontável número de curvas, duas das quais foram escolhidas para avaliação: a semicircular e a senoidal, dentre outras. Essa escolha se deve tão somente porque a manobra de mudança de direção exige a atuação de um momento angular que atue sobre o veículo; a ação desse momento é de forçar o AUV a um raio de manobra. Há um raio mínimo sobre o qual o veículo pode mudar de direção (limitações de projeto do veículo) e um raio maior para avanço que devem ser previstos no planejamento do movimento.

Na Figura 82 e na Figura 83 simulações foram feitas para as mesmas condições:

- Raio mínimo de manobra: 10m e
- Raio projetado do veículo (maior que o raio mínimo de curvatura para a cicloide prolata): 20m.

Ignorando-se ações de correntes marinhas e a inércia do veículo devido à sua energia cinética, que tendem a forçar o veículo a um raio de manobra maior, o resultado mostra que a trajetória semicircular do veículo leva a uma tomada de posição adequada de maneira mais rápida, aproximadamente 5 metros antes da trajetória senoide.

Figura 82 - Caminhos retilíneo, semicircular e cicloide prolata tangenciais.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A prova matemática é fornecida a partir das equações das curvas. Para a circunferência, na sua forma paramétrica:

$$x = a_1 + r \cos \varphi \quad (12)$$

$$y = b_1 + r \sin \varphi \quad (13)$$

onde a_1 é a distância do centro da circunferência ao eixo longitudinal do deslocamento do veículo, b_1 é a distância do centro da circunferência ao eixo normal ao deslocamento do veículo, r é o raio do círculo e φ é o ângulo de orientação do veículo.

Ao se resolver o sistema que envolve as equações da circunferência (equações (12) e (13)) e as equações da cicloide prolata (equações (10) e (11)), o ângulo comum a elas é encontrado, e, portanto, as coordenadas de posição em x e y comuns entre elas são definidas.

$$\left\{ \begin{array}{l} x = a_1 - b \sin \varphi \\ y = a_1 - b \cos \varphi \end{array} \right. \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x = a_1 + r \cos \varphi \\ y = b_1 + r \sin \varphi \end{array} \right. \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x = a_1 + r \cos \varphi \\ y = b_1 + r \sin \varphi \end{array} \right. \quad (16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x = a_1 + r \cos \varphi \\ y = b_1 + r \sin \varphi \end{array} \right. \quad (17)$$

onde a_1 pode ser o mínimo raio de manobra do veículo (ou seja, igual a a) e b_1 pode ser definido a como o ponto do fim da trajetória teoricamente retilínea.

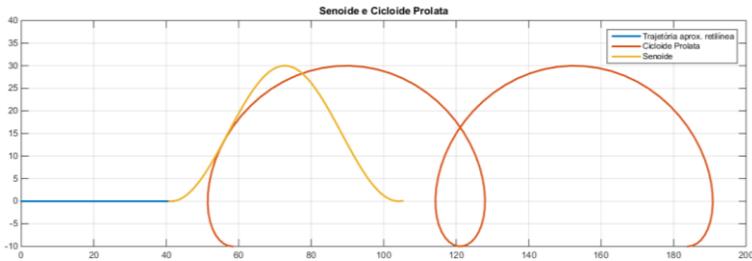
A distância percorrida na trajetória até o ponto de encontro com os dois modelos matemáticos é encontrada a partir do cálculo do comprimento de arco de circunferência com o ângulo percorrido, e é dado por:

$$d_c = \frac{\alpha \cdot \pi \cdot r}{180} \quad (18)$$

onde α é o ângulo percorrido, o mesmo ângulo coincidente do sistema de equações (14), (15), (16) e (17).

Para os dados fornecidos, o cálculo forneceu um ângulo de aproximadamente 80° .

Figura 83 - Caminhos retilíneo, senoide e cicloide prolata tangenciais.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para um trecho de transição senoidal, a descrição da curva se utiliza de:

$$\begin{cases} x = x, & x \in \mathbb{R} \\ y = a_2 \text{sen}(f\varphi + \beta) + b_2 \end{cases} \quad (19)$$

onde a_2 , a amplitude, cujo valor não pode ser menor que o raio de manobra mínimo, caso contrário o veículo teria de fazer uma manobra para a qual não foi projetado.

Para o exercício, a_2 foi considerado 19,3, pouco menor que o raio projetado b (o que faz com que o raio de manobra seja superior ao raio mínimo), e b_2 igual a 15 e β $1,87 \cdot \pi \cdot \text{rad}$, para que o início da curva coincidissem com o valor de fim da trajetória aproximadamente retilínea utilizado no cálculo anterior. Da mesma forma, monta-se o sistema de equações:

$$\begin{cases} x = a \cdot \varphi - b \cdot \text{sen} \varphi & (21) \\ y = a - b \cdot \text{cos} \varphi & (22) \\ x = (0, 2 \cdot \pi \cdot \text{rad}) = \varphi & (23) \\ y = a_2 \text{sen}(\varphi) + b_2 & (24) \end{cases}$$

Para o qual o resultado retorna um ângulo coincidente de aproximadamente $101,82^\circ$.

Comparando com o resultado da curva semicircular, 80° , a senoide, percorre um caminho mais longo para tangenciar a trajetória de cicloide prolata quando comparada com o semicírculo. Isso provavelmente se deve ao raio de manobra constante e mínimo adotado pelo semicírculo.