



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA

JOÃO VICTOR ALMEIDA LEMOS

**PROPOSTA DE CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS PARA UM PROJETO
CONCEITUAL DE UM VEÍCULO SUBMERSO AUTÔNOMO (AUV) PARA
INSPEÇÃO DE MANUTENÇÃO DE ESTRUTURAS OCEÂNICAS EM ÁGUAS
RASAS**

RECIFE

2022

JOÃO VICTOR ALMEIDA LEMOS

**PROPOSTA DE CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS PARA UM PROJETO
CONCEITUAL DE UM VEÍCULO SUBMERSO AUTÔNOMO (AUV) PARA
INSPEÇÃO DE MANUTENÇÃO DE ESTRUTURAS OCEÂNICAS EM ÁGUAS
RASAS**

Trabalho de conclusão de graduação, apresentado ao curso de Engenharia Naval do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval.

Orientador: Silvio Eduardo Gomes de Melo

RECIFE

2022

JOÃO VICTOR ALMEIDA LEMOS

**PROPOSTA DE CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS PARA UM PROJETO
CONCEITUAL DE UM VEÍCULO SUBMERSO AUTÔNOMO (AUV) PARA
INSPEÇÃO DE MANUTENÇÃO DE ESTRUTURAS OCEÂNICAS EM ÁGUAS
RASAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval.

Data de aprovação: Recife – PE, _____ de _____ de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Silvio Eduardo Gomes de Melo, DSc.
(Orientador – UFPE – Departamento de Engenharia Mecânica)

Prof. Miguel Angel Celis Carbajal, DSc.
(Examinador – UFPE – Departamento de Engenharia Mecânica)

Prof. Adriano Dayvson Marques Ferreira, MSc.
(Examinador – UFPE – Departamento de Engenharia Mecânica)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por ter me proporcionado a vida e saúde para alcançar esta conquista em minha vida.

Segundamente, quero dedicar esta graduação à minha mãe. Ela que foi responsável por toda minha trajetória na faculdade, pois foi ela que, em um período difícil de minha vida, fez minha inscrição no vestibular e não desistiu de mim em momento algum.

Também quero agradecer ao meu pai, minha principal fonte de inspiração e que sempre me incentiva a melhorar.

À minha irmã e toda minha família que estiveram esse tempo todo ao meu lado, por todo seu apoio e carinho.

Às minhas melhores amigas Caroline e Gabriela por todo apoio e companhia.

Aos meus companheiros de curso, por todos os momentos compartilhados e experiências vividas que serão sempre únicas.

Aos professores do curso de Engenharia Naval, que compartilharam de seus conhecimentos e contribuíram pelo meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

Agradeço ao meu orientador, Silvio, por todo o apoio e contribuição para a conclusão deste TCC e também pelo incentivo da publicação deste trabalho no congresso da Sociedade Brasileira de Engenharia Naval.

Vocês todos fizeram parte da construção da pessoa e profissional que me tornei e por isso sou e serei eternamente grato.

Mais uma vez, obrigado mãe, por tudo.

Te dedico este TCC.

Te amo muito!

RESUMO

Os Veículos Submersos Autônomos (AUV's) são robôs que atualmente utilizam de inteligência artificial para tomadas de decisão e dispensam recursos humanos para a realização de suas missões. Devido a esse fator, a utilização de AUV's está se expandindo para aplicações em diversos ecossistemas de pesquisa, inspeção e manutenção. O uso em águas profundas e ultra profundas, ainda traz uma série de desafios, no entanto o uso de águas rasas é extremamente promissor em termos de novas possibilidades de atuação. Este trabalho reúne as principais características fundamentais para um AUV atuando na função de inspeção para manutenção de estruturas submersas em águas rasas. Será realizado um estudo de caso baseado no AUV "*Cyclops*" em sua missão de inspeção através de captação de imagens, comparando este projeto com as características apresentadas no trabalho e, em seguida, será realizada uma proposta de um AUV para inspeção em águas rasas, no qual serão detalhados os equipamentos e estimado um valor financeiro para ser utilizado como base orçamentária de um projeto preliminar. A partir deste projeto é possível definir as características hidrodinâmicas que devem ser consideradas para a obtenção dos coeficientes hidrodinâmicos do veículo, assim como identificar as principais tecnologias para cada componente do AUV.

PALAVRAS CHAVES: AUV's, Veículos Autônomos Submersos, Manutenção de Instalações Offshore, Hidrodinâmica.

ABSTRACT

Autonomous Submerged Vehicles (AUV's) are robots that currently use artificial intelligence for decision making and dispense human resources to carry out their missions. Because of this factor, the use of AUV's is expanding to applications in various research, inspection, and maintenance ecosystems. The use in deep and ultra-deep waters still brings several challenges, however the use of shallow water is extremely promising in terms of new possibilities of action. This work brings together the main fundamental characteristics for an AUV acting in the function of inspection for maintenance of submerged structures in shallow water. A case study based on the AUV "Cyclops" will be carried out in its inspection mission through image capture, comparing this project with the characteristics presented in the work and then a proposal of an AUV for inspection in shallow waters will be carried out, in which the equipment will be detailed and a financial value estimated to be used as a budget basis for a preliminary project. From this project it is possible to define the hydrodynamic characteristics that must be considered to obtain the vehicle's hydrodynamic coefficients, as well as identify the main technologies for each component of the AUV.

KEYWORDS: AUV's, Submerged Autonomous Vehicles, Offshore Facility Maintenance, Hydrodynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de um HAUV.....	17
Figura 2 – Exemplo de AUV com propulsor de hélices com jato de água (SUR-III).	17
Figura 3 – Exemplo de AUV biomimético (U-CAT).	18
Figura 4 – Navegação acústica (a) USBL (b) SBL (c) LBL.	20
Figura 5 – Definição de referencial e movimento relativo.....	21
Figura 6 – Sonar típico: (a) sonar de feixe único; (b) sonar de varredura lateral; (c) sonar multifeixe.	23
Figura 7 – Detecção de objetos acústicos subaquáticos e reconstrução de cenas: (a) detecção de objetos de sonar de varredura lateral; (b) detecção de objetos de sonar multifeixe; (c) reconstrução esparsa; (d) reconstrução densa.	23
Figura 8 – Aplicações do sensor visual subaquático: (a) ancoragem de robôs subaquáticos; (b) interação homem-máquina submarina (c) medição de tubulações submarinas; (d) reconstrução de destroços de navios submersos.	23
Figura 9 – Detecção de objetos acústicos subaquáticos e reconstrução de cenas: (a) detecção de objetos de sonar de varredura lateral; (b) detecção de objetos de sonar multifeixe; (c) reconstrução esparsa; (d) reconstrução densa.	24
Figura 10 – Sensor de scanner a laser subaquático: (a) sensor de medição de luz estruturado subaquático; (b) sensor de scanner a laser subaquático; (c) scanner a laser de rotação subaquática; (d) sensor de scanner a laser subaquático.....	25
Figura 11 – Exemplo de um AUV no formato de torpedo (SPARUS II).	31
Figura 12 – Exemplos de AUV's com formato esférico: (a) Ommi-Egg; (b) SUR III.....	31
Figura 13 – Vista em perspectiva do P-SURO, AUV com geometria complexa.....	31
Figura 14 – Exemplo de um AUV no com a estrutura aberta (Girona 500).	32
Figura 15 – Exemplos de AUV's biomiméticos em formato de (a) cobra, (b) tartaruga, (c) besouro, (d) peixe e (e) caranguejo.	32
Figura 16 – Exemplo de AUV com diferentes módulos acoplados (MARTA).	33
Figura 17 – Esquema do AUV submetido a onda e corrente.	35
Figura 18 – Coeficientes instantâneos de forças hidrodinâmicas no AUV para cinco alturas de onda diferentes.	35
Figura 19 – Perfis de velocidade para diferentes alturas de onda e profundidade de água.....	36
Figura 20 – Coeficientes instantâneos de forças hidrodinâmicas no AUV em quatro diferentes profundidades submersas.	37

Figura 21 – (a) Perfis de velocidade a montante do AUV para diferentes profundidades submersas e (b) velocidade média a montante em diferentes profundidades submersas.	37
Figura 22 – Coeficientes instantâneos de forças hidrodinâmicas no AUV em quatro diferentes números de Reynolds.	38
Figura 23 – Envelope operacional para o AUV manobrar com segurança ao redor do submarino para a relação de diâmetro de 14.634. A resolução espacial das zonas é +/- 0,05 Rlong e +/- 0,05 RLat.	40
Figura 24 – Área com e sem efeito de águas rasas.	40
Figura 25 – Exemplo de um AUV com sistema de posicionamento dinâmico.	42
Figura 26 – AUV <i>Cyclops</i>	46
Figura 27 – Propulsores usados no AUV <i>Cyclops</i> e sua configuração.	47
Figura 28 – Configuração dos sensores usados no AUV <i>Cyclops</i>	47
Figura 29 – Métodos de navegação com e sem mudança de direção. (a) Rastreamento de caminho com mudança de direção, (b) Rastreamento de caminho sem mudança de direção.	48
Figura 30 – Posição relativa entre a câmera e o caminho durante a navegação; (a) com mudança de direção de rumo, (b) sem mudança de direção de rumo.	49
Figura 31 – Configuração do experimento para mosaico de imagens. (a) Ambiente de experimento de mosaico de imagens, (b) Bandeira projetada e impressa, (c) Trajetória do estilo cortador de grama.	50
Figura 32 – Resultados do mosaico com imagens ampliadas para verificar a precisão da conectividade.	50
Figura 33 – Resultados de mosaico de imagens de testes no mar.	51
Figura 34 – Layout do AUV <i>Cyclops</i>	52
Figura 35 – Fotografia do AUV TUNA-SAND.	54
Figura 36 – Exemplo de previsão da altura significativa das ondas.	55
Figura 37 – Em vermelho, exemplo de trajetória vertical no estilo cortador de grama em um casco de navio.	56
Figura 38 – Em vermelho, exemplo de trajetória vertical no estilo cortador de grama para plataformas eólicas offshore.	56
Figura 39 – Em verde, bacias produtoras marítimas e terrestres.	57
Figura 40 – Luz led subaquática para robô 20-28v via AliExpress.	70
Figura 41 – ExplorerHD 2.0 Underwater ROV/AUV USB Câmera de 10M pixels via DeepWater Exploration.	70

Figura 42 – PCM-3365EW-S3A1E Intel®Atom™ E3825 PC/104-Plus via Advantech Online.	70
Figura 43 – Propulsor T200 via BlueRobotics.....	70
Figura 44 – DVL A50 via WaterLinked.	70
Figura 45 – Sonar de Varredura lateral multi-frequência modelo 881 ^a via Imagenex-.	71
Figura 46 – Bateria de polímero de lítio 24V via AliExpress.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Evolução das profundidades máximas alcançadas.	15
Tabela 2 – Principais aplicações dos AUV's.	16
Tabela 3 – Frota de AUV acadêmica dos Estados Unidos e suas características de potência. 28	
Tabela 4 – Química das baterias e suas características.	28
Tabela 5 – Quadro resumo com características sugeridas para um AUV de inspeção em águas rasas.	45
Tabela 6 – Especificações do AUV proposto.	60
Tabela 7 – Quadro de custos dos componentes do AUV proposto.	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS	14
2.1	Área de pesquisa e atuação	14
2.2	Sistemas de propulsão	17
2.3	Sistema de navegação e localização	18
2.4	Sistemas de inspeção/mapeamento.....	22
2.5	Sistemas de controle	26
2.6	Fonte de energia.....	27
2.7	Formato do casco.....	30
3	CARACTERÍSTICAS DE INSPEÇÃO EM ÁGUAS RASAS	34
3.1	Fenômenos de <i>seakeeping</i> em águas rasas	34
3.2	Seleção das características principais de um AUV para águas rasas	41
4	ESTUDO DE CASO	46
4.1	Análise crítica	51
4.2	Proposta de um AUV para inspeção em Águas Rasas	57
5	CONCLUSÃO	62
	REFERÊNCIAS	64
	ANEXO A – Componentes do AUV proposto	70

1 INTRODUÇÃO

Na indústria offshore, há uma necessidade de inspeções e monitoramento regulares para avaliar a integridade das estruturas submersas. Esses processos hoje são realizados por mergulhadores ou Veículos Operados Remotamente (ROV's). O primeiro grupo tem sua limitação atrelada à segurança humana e sendo, também, limitada pela profundidade da operação. Já o segundo grupo possui um custo operacional demasiado alto, além de possuir problemas relacionados à precisão de operação do operador.

Como alternativa para esse problema, surgem os Veículos Submersos Autônomos (AUV's) por possuírem alta manobrabilidade, acessibilidade para navegar em locais confinados e não envolverem a atividade humana direta. Com isso, há um crescente interesse pelo desenvolvimento de novas tecnologias de inspeção e manutenção para a exploração e intervenção em ambientes subaquáticos.

Uma outra aplicação em que estão sendo utilizados AUV's é na inspeção para manutenção de estruturas submarinas, como navios, submarinos, pernas de plataformas offshore e cabos no fundo do oceano, devido à necessidade de inspeção regular a fim de avaliar o estado dessas estruturas para planejar intervenções de reparo e manutenção.

O objetivo principal deste trabalho será apresentar as principais características essenciais para um projeto preliminar de um AUV para inspeção para manutenção em águas rasas. Tendo como objetivos secundários a indicação das melhores soluções para um projeto deste tipo, as características fundamentais a serem observadas no projeto de um AUV dentro do escopo do trabalho e identificar as propriedades hidrodinâmicas provenientes da navegação em águas rasas.

Na seção 2 deste trabalho, será apresentado um estudo sobre as principais características fundamentais de um AUV englobando as áreas de atuação, os sistemas de propulsão, navegação e localização, controle, inspeção e mapeamento, as fontes de energia e os formatos do casco, para o qual são discutidos em maiores detalhes o estado da arte de cada aspecto avaliado associando a exemplos de projetos reais.

Na seção 3 será abordado as particularidades sobre as necessidades de um AUV em relação à inspeção para manutenção em águas rasas.

Na seção 4 será realizado um estudo de caso no qual será revisado o projeto de desenvolvimento do AUV "*Cyclops*", que foi desenvolvido para a realização de pesquisas de solo submarino em águas rasas, e propondo soluções para adaptar o AUV em estudo, para

realizar inspeção para manutenção de estruturas offshore, através das metodologias selecionadas na seção 3.

Por fim, nas conclusões serão abordados as principais oportunidades e dificuldades encontradas neste trabalho com vistas ao desenvolvimento de um AUV como proposto.

2 CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS

2.1 Área de pesquisa e atuação

Recentemente, houve um aumento na demanda pela exploração subaquática, com pesquisas e explorações sendo realizadas para fins relacionados a pesquisa científicas, manutenção de estruturas, questões ambientais, entre outras aplicações (CAMPOS et al., 2019). Apesar da alta demanda e dos esforços para estudar o ambiente subaquático, este ainda representa uma área de conhecimento limitado (SEGOVIA RAMÍREZ et al., 2021). Os principais motivos para esta limitação estão relacionados à complexidade dos levantamentos de dados em oceanos profundos e às limitações técnicas que incidem sobre a autonomia operacional nestas circunstâncias ao operar debaixo d'água (MAYER et al., 2018, p. 68, apud SEGOVIA RAMÍREZ et al., 2021).

Estruturas submersas como os sistemas de produção de óleo e gás, bases para edificações e torres eólicas offshore necessitam ser inspecionadas regulamente para a avaliação do seu estado físico e planejar futuras intervenções para reparo e manutenção. Estas inspeções são comumente realizadas por veículos operados remotamente (ROV's) ou por mergulhadores, porém este tipo de inspeções são caras e demandam muito tempo (ALBIEZ et al., 2015).

Com o aumento e sofisticação das atividades de exploração e inspeção offshore, os veículos subaquáticos surgem como uma resposta à limitação humana em realizar atividades submersas (BI et al., 2020). Veículos estes que se tornaram ferramentas fundamentais para os cientistas, pesquisadores e engenheiros realizarem tarefas submarinas (BI et al., 2020).

O primeiro veículo submerso autônomo (AUV) foi desenvolvido em 1957 com o objetivo de realizar pesquisa no fundo do mar sem a necessidade de ser controlado por uma pessoa (SAHOO; DWIVEDY; ROBI, 2019). A principal vantagem que os AUV's possuem sobre os veículos operados remotamente é que eles possuem autonomia, reduzindo o trabalho operacional humano, e podem operar em paralelo com outras atividades (ALBIEZ et al., 2015). A Tabela 1 mostra a evolução das profundidades máximas alcançadas pelos AUV's até a profundidade de 11.000 metros.

Os AUV's que foram desenvolvidos com o intuito de proporcionar alta automação, custo-benefício e grande autonomia para executar missões submarinas sem colocar vidas humanas em risco (ZHAO et al., 2016, p. 155-169, apud BI et al., 2020), também estão sendo utilizados para realizar levantamentos e inspeções detalhadas na exploração de ambientes desconhecidos (GUPTA; HARE; ZHOU, 2012, p. 1-5, apud BI et al., 2020)), inspeção de

estruturas submarinas (MAKI; URA; SAKAMAKI, 2012, p. 523-531, apud BI et al., 2020)), entre outras aplicações.

Tabela 1 – Evolução das profundidades máximas alcançadas.

Ano de construção	AUV	Profundidade máxima
1957	SPURV	3.000 metros
1994	Explorer	5.000 metros
1996	Okpo 6000	6.000 metros
2009	Nereus	11.000 metros

Fonte: AUVAC, 2022.

Em 2012, os AUV's começaram a atuar, também, na inspeção de cascos de embarcações (HOVER et al., 2012). Área que apresenta dificuldades visuais decorrentes do ambiente acústico, má qualidade da água e estruturas altamente complexas a serem inspecionadas, como a região do propulsor e leme.

Todavia, com o aprimoramento das tecnologias de navegação e automação ao longo do tempo, os AUV's foram ganhando mais espaço e utilização na inspeção de estruturas submarinas, como navios ancorados, submarinos e o fundo do oceano (HOLLINGER et al., 2013).

Outra aplicação dos AUV's é na inspeção e monitoramento da integridade de estruturas offshore, como dutos, *risers* e umbilicais (KAUR; CORSAR; MA, 2019), uma vez que estas estruturas oceânicas atuam em ambientes operacionais agressivos como o carregamento de ondas cíclicas, carregamento de vento, corrosão, danos acidentais e crescimento marinho.

Ao longo dos anos, diversos AUV's foram desenvolvidos para atuar em diversas aplicações comerciais, militares e industriais. A Tabela 2 lista suas principais aplicações junto com quais AUV's foram utilizados para este fim (SAHOO; DWIVEDY; ROBI, 2019).

Algumas das principais dificuldades segundo Sahoo et al. (2019) no desenvolvimento de um AUV são a comunicação sem fio subaquática, baterias de longa duração, computadores de bordo compactos com alto poder computacional para uma melhor tomada de decisão, geração de energia a bordo e seu uso eficiente. Com isso, os sistemas embarcados em um AUV que devem ser planejados são o sistema de propulsão ou maquinário, fonte de energia, controle de missão, sistemas de mapeamento e navegação (CAMPOS et al., 2019).

Tabela 2 – Principais aplicações dos AUV's.

Aplicações dos AUV's		
Indústria	Área de aplicação	Modelo de AUV
Militar	Vigilância	REMUS-6000, AUV-150
	Guerra anti-submarinos	Bluefin21, Echo Ranger, Gavia Defence, SOG Seaglidars, Eagle Ray
	Contra-medidas de minas	Bluefin21
	Inspeção de destroços	U-CAT
	Entrega de carga para o fundo do oceano	GIRONA 500 I-AUV
	Busca e resgate	Bluefin21
	Investigação de acidente aéreo	GIRONA 500 I-AUV
	Exploração oceânica e estudo batimétrico	Theseus AUV, REMUS-6000, AUV-150, AE 2000A
	Mapeamento do fundo do oceano	Autosub 6000
Científico	Estudos de biologia marinha	Maya AUV
	Pesquisa Geológica	Tri-TON 2
	Levantamento arqueológico	MARTA, A-Size
	Monitoramento ambiental	Maya AUV, REMUS-6000
	Rastrear vazamento de óleo e gás	SOTAB
Industrial	Reparo e manutenção	SAUVIM, SeaCat
	Rastrear e reparar cabos submarinos	AE1000
	Inspeção de estrutura subaquática	SeaCat
Outros	Coleção de imagens de vídeo subaquáticas	Maya AUV
	Pesca	
	Entretenimento e Turismo	

Adaptado de: SAHOO; DWIVEDY; ROBI, 2019.

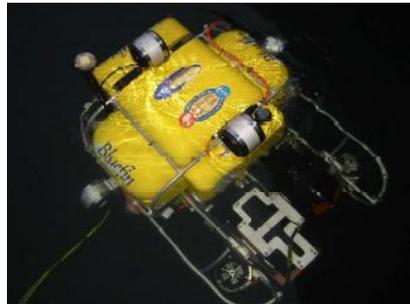
2.2 Sistemas de propulsão

Sobre o sistema de propulsão podemos considerar os modelos mais comuns os propulsores convencionais que fazem o uso do conjunto leme e hélice e o sistema de propulsão por jato d'água (ALAM; RAY; ANAVATTI, 2014).

Os propulsores convencionais dos AUV's utilizam do conjunto entre leme e hélice para realizar seu translado, podendo implementar o sistema de flutuação que utiliza da regulação do calado para controlar a profundidade do veículo (ISA; RIZAL ARSHAD, 2011).

Uma variação deste modelo de hélice é fornecida pelos HAUV (Veículos subaquáticos autônomos flutuantes), que possibilitam que o AUV flutue debaixo d'água (Figura 1). Ele utiliza da velocimetria Doppler, em conjunto com pequenos propulsores, ao longo do casco para obter navegação e controle relativos ao objeto de estudo (VAGANAY et al., 2006).

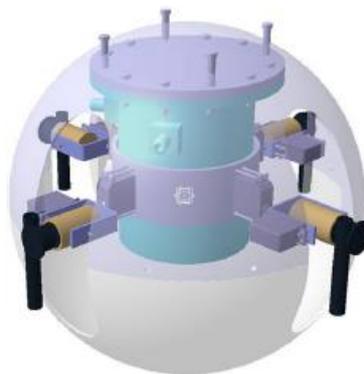
Figura 1 – Exemplo de um HAUV.



Fonte: VAGANAY et al., 2006.

Para os sistemas de propulsão a base de jato de água (Figura 2), a água é descarregada através dos bicos dos hélices que fazem com que aumente a velocidade de saída do jato. Este tipo de propulsor possui menores índices de turbulência, ruído e cavitação quando comparados ao propulsor convencional de hélice fixa (LI; GUO; WANG, 2017).

Figura 2 – Exemplo de AUV com propulsor de hélices com jato de água (SUR-III).



Fonte: LI; GUO; WANG, 2017.

Embora os sistemas mais comuns de propulsão se baseiem em hélices, eles não apresentam bons desempenhos quando atuam em espaços confinados, perto da superfície (ZHOU et al., 2013) ou em fluxo instável (LICHT et al., 2004).

Como forma de contornar estes problemas, surgiram os AUV's biomiméticos (Figura 3) que imitam as técnicas de propulsão, utilizando aletas, e estrutura dos animais marinhos, no qual eles navegam através da propulsão ondulatória resultante da diferença de pressão que é criada ao mover o corpo em um padrão de onda (SAHOO; DWIVEDY; ROBI, 2019). O uso das aletas (hidrofólios) como sistema de propulsão alternativo está ganhando mais espaço por permitir movimento estável com menos ruído, boa flexibilidade e alta manobrabilidade (LICHT et al., 2004). Todavia, este modelo de AUV é incapaz de transportar cargas pesadas e alcançar altas velocidades (SAHOO; DWIVEDY; ROBI, 2019).

Figura 3 – Exemplo de AUV biomimético (U-CAT).



Fonte: SALUMAE; CHEMORI; KRUUSMAA, 2019.

2.3 Sistema de navegação e localização

Sabemos que para a realização dos estudos subaquáticos por robôs, os mesmos precisam identificar o ambiente e realizar sua navegação evitando quaisquer tipos de obstáculos submersos (CONG et al., 2021). Portanto, os sistemas de navegação e de localização são componentes fundamentais para garantir que o AUV siga o caminho predeterminado com precisão para cumprir sua missão (SAHOO; DWIVEDY; ROBI, 2019).

Todavia, há a necessidade de se fazer a distinção entre navegação e localização: o primeiro corresponde à precisão com que o AUV se guia de um ponto a outro, enquanto que o segundo representa o erro geográfico do posicionamento do AUV em determinado local (PAULL et al., 2014).

O principal desafio na navegação do AUV é manter a precisão da posição ao longo de uma longa missão, uma vez que não se pode utilizar do Sistema de Posicionamento Global

(GPS) nem sinais de rádio de alta frequência, pois esses sinais propagam-se apenas a curtas distâncias quando debaixo d'água (SAHOO; DWIVEDY; ROBI, 2019).

Caso o AUV não tenha precisão de navegação durante sua missão, é possível que informações críticas da inspeção sejam ignoradas, resultando em uma performance imprecisa da atuação do mesmo. Um dos motivos pelo qual há essa perda de precisão é pela falta de uma posição referenciada externamente (STUTTERS et al., 2008), sendo este um sistema imprescindível para garantir uma navegação mais apurada.

De acordo com Stutters et al. (2008), os tipos de navegações dos AUV's podem ser classificados como navegação inercial, acústica ou geofísica, definidas a seguir:

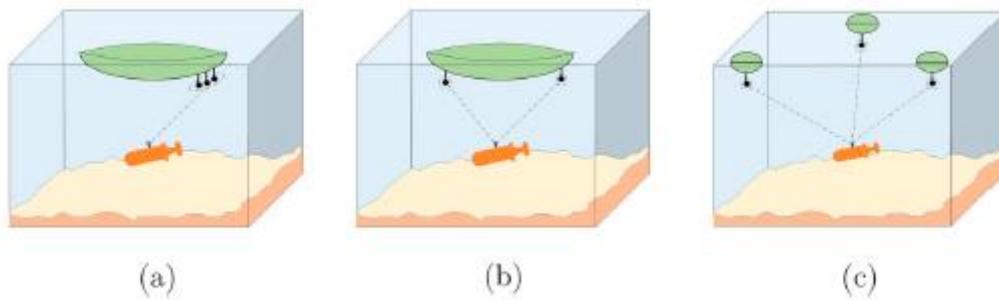
A navegação inercial utiliza dados dos sensores da Unidade de Medição Inercial (IMU) para estimar a velocidade e posição relativa do veículo. Estes sensores compõem do acelerômetro, giroscópio e magnetômetro, que realizam a obtenção dos dados de aceleração, velocidade rotacional e a intensidade do campo magnético, respectivamente.

Como forma de minimizar o erro do posicionamento estimado, ainda se utilizam outros sensores como o registro de velocidade Doppler (DVL), dados de profundidade do sensor de pressão, entre outros. Este sistema possui um sistema compacto e barato, além de ser autônomo e não requerer referências externas para seu funcionamento, sendo bastante utilizado em pequenos AUV's.

Entretanto, este sistema tende a acumular erros ao longo de sua vida útil, uma vez que a velocidade relativa estimada e sua posição são resultados de integrações numéricas dos dados do acelerômetro e do giroscópio. Logo, erros nas medições desses dados irão resultar em valores alterados das integrais, gerando um desvio na velocidade e posição estimadas do AUV (SAHOO; DWIVEDY; ROBI, 2019).

A navegação acústica usa diferentes sinalizadores transponders acústicos posicionados em um corpo flutuante fixo de referência para estimar a posição do AUV (Figura 4). Dentro deles, os sinalizadores mais comuns são: Linha de Base Longa (LBL), que utiliza de, no mínimo, dois transponders separados em diferentes embarcações; Linha de Base Curta (SBL), que utiliza de dois transponders, um avante e outro a ré de uma única embarcação; Linha de Base Ultracurta (USBL) que utiliza de transponders calibrados por GPS em um único navio (STUTTERS et al., 2008).

Figura 4 – Navegação acústica (a) USBL (b) SBL (c) LBL.



Fonte: SAHOO; DWIVEDY; ROBI, 2019.

A navegação geofísica usa as características físicas do ambiente do AUV para estimar a localização do mesmo. Para isso, são utilizados diferentes sensores capazes de detectar e identificar essas características (STUTTERS et al., 2008), como câmeras monoculares ou estéreo e sonares. No caso de câmeras, elas são utilizadas para tirar fotografias do ambiente subaquático e extrair informações para serem utilizados no método SLAM (Localização e mapeamento simultâneos).

Os sonares são um recurso muito utilizados em mapeamento do fundo do mar, uma vez que os sonares de imagem produzem informações batimétricas, como uma imagem em preto e branco, com as rochas representando a parte escura da imagem e o piso de areia as partes claras (SAHOO; DWIVEDY; ROBI, 2019).

Atualmente, segundo Stutters et al. (2008), os AUV's são equipados com sensores que podem fazer a combinação desses métodos para uma única missão. Para isso, os dados obtidos por esses sensores devem ser processados em conjunto utilizando de 3 principais técnicas a fim de obter uma estimativa ideal da posição do veículo. São estas:

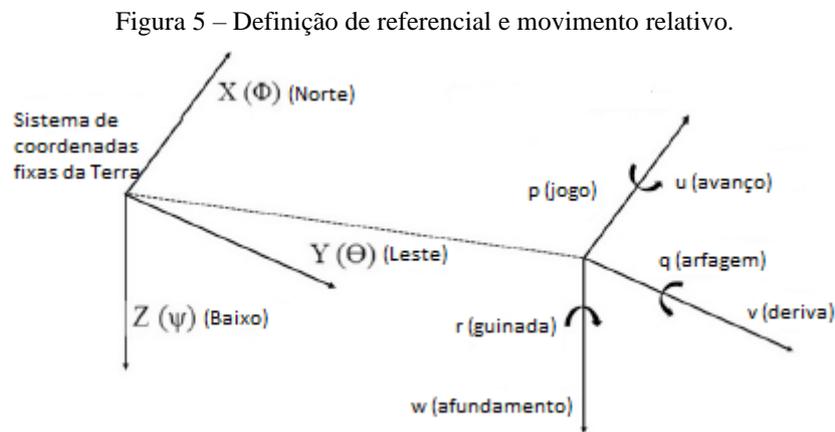
- 1) Filtro de Kalman (KF)
- 2) Filtro de partículas (PF)
- 3) SLAM

Os KF's e os PF's são técnicas que utilizam de métodos numéricos para a fusão dos sensores (STUTTERS et al., 2008). Já o SLAM usa do reconhecimento das áreas do ambiente que o AUV já passou para obter a localização do mesmo.

Como os AUV's podem ser implementados em diversos ambientes para as suas missões, estes também envolvem diferenças de profundidade que resultam em combinações de sensores diferentes (STUTTERS et al., 2008). Para pesquisas em águas rasas, como a superfície de um casco de navio, a maioria dos AUV's usam sonares de varredura lateral por abrangerem uma ampla faixa de visualização.

As pesquisas em águas profundas, geralmente envolvendo a indústria de petróleo de gás, utilizam de sonares de varredura lateral e multifeixe junto com sensores químicos. As pesquisas no fundo do mar, como dutos e cabos, exigem uma combinação de sensores visuais, perfis de sub-fundo e um amplo processamento a bordo, este tipo de missão também requer uma fonte de iluminação para os sensores óticos e demanda de maiores capacidades energéticas.

Sahoo et al. (2019) determinam que para a definição da posição, velocidade e aceleração do AUV, é necessário definir um modelo cinemático das diferentes partes do robô em relação a um referencial e um modelo dinâmico que tem a função de relacionar as forças e os momentos junto com a posição e velocidade final do mesmo. Para isso, ele considera o AUV de corpo rígido possuindo 6 graus de liberdade, no qual seu modelo cinemático é definido segundo a Figura 5.



Adaptado de: SAHOO; DWIVEDY; ROBI, 2019.

De acordo com Fossen et al. (1995, p. 17-27, apud SAHOO; DWIVEDY; ROBI, 2019) a modelagem não linear de um veículo marítimo de 6 graus de liberdade pode ser estendida para um AUV de corpo rígido, uma vez que a interação entre o movimento e as forças e torques podem ser expressas em função das seguintes equações:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (1)$$

$$M = M_{RB} + M_A \quad (2)$$

$$C(v) = C_{RB}(v) + C_A(v) \quad (3)$$

Sendo M_{RB} e M_A a constante de inércia e a matriz de massa adicionada do AUV, respectivamente e $C_{RB}(v)$ e $C_A(v)$ o Coriolis e matriz centrípeta do corpo rígido e a massa adicionada, respectivamente, $D(v)$ é a matriz de amortecimento contendo os valores de arrasto

e sustentação, $g(\eta)$ é o vetor de forças e momentos de restauração incluindo as forças gravitacionais e empuxo e τ é o vetor de forças de corpo fixo dos atuadores.

2.4 Sistemas de inspeção/mapeamento

Por conta de sua principal função, o AUV atua como um sensor móvel que realiza exploração e inspeção de aspectos de interesse para uma determinada missão. Portanto, é necessário identificar os principais sistemas de inspeção e mapeamento que são utilizados pelos AUV's ou veículos submersos para realizar missões de inspeções nos diversos ambiente subaquáticos.

Atualmente, as principais tecnologias de captação de dados são as acústicas e óticas, mas também possuindo alternativas como a biônica, eletromagnética, térmica, química, entre outras (HOVER et al., 2012).

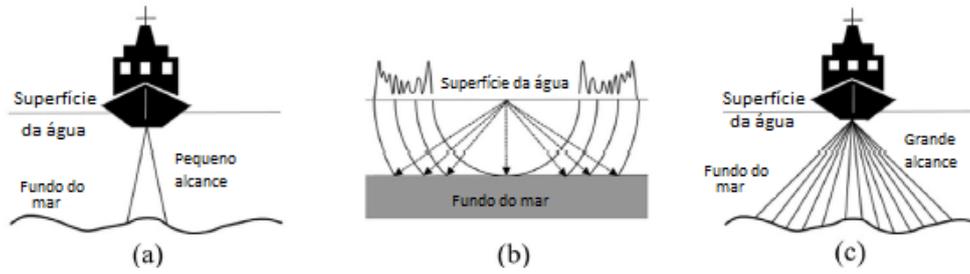
Os sensores acústicos, além de suas funcionalidades de localização do AUV, também podem ser utilizados em manutenção de estruturas marítimas e inspeções de tubulações no fundo do oceano, sendo a melhor tecnologia de detecção aplicadas em robôs subaquáticos (CONG et al., 2021). Estes sensores são classificados em duas classes: sensores acústicos de alcance/imagem e sensores de posicionamento acústico, com o último já discutido anteriormente.

Os sensores acústicos de alcance/imagem utilizam principalmente de sonares de feixe único, varredura lateral e sonares multifeixe (Figura 6). No qual o sonar de feixe único calcula a profundidade do objeto submerso através do recebimento de um sinal acústico emitido por um transdutor. Por ser um sonar simples, possui um baixo custo e é de fácil operação, entretanto ele não consegue obter resultados precisos nem possui uma ampla faixa de cobertura.

O sonar de varredura lateral é composto por submódulos que visam o estudo detalhado de topografia, geologia e minerais, além de realizar busca e rastreamento de objetos. No entanto, o sonar de varredura lateral não consegue medir com precisão a profundidade do AUV, podendo apenas estimar aproximadamente a direção dele.

Por fim, o sonar multifeixe é a combinação de vários sonares de feixe único, obtendo com maior precisão a direção e profundidade do veículo submerso. Quando comparado com o sonar de feixe único, este apresenta maior cobertura da área do fundo do mar com maior precisão, aumentando significativamente a eficiência da exploração oceânica (CONG et al., 2021).

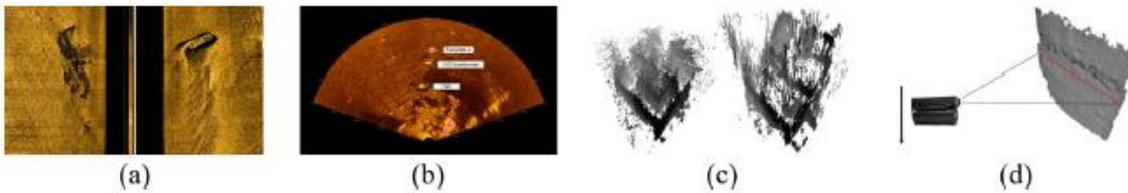
Figura 6 – Sonar típico: (a) sonar de feixe único; (b) sonar de varredura lateral; (c) sonar multifeixe.



Adaptado de: CONG et al., 2021.

As imagens acústicas capturadas pelos sonares são bastante utilizadas para a detecção e rastreamento, conforme a Figura 7. Outra utilização das imagens acústicas se dá na reconstrução de imagens 3D, estas podem se dar através da reconstrução esparsa ou reconstrução densa (GUERNEVE; SUBR; PETILLOT, 2018, p. 890-905, apud CONG et al., 2021).

Figura 7 – Detecção de objetos acústicos subaquáticos e reconstrução de cenas: (a) detecção de objetos de sonar de varredura lateral; (b) detecção de objetos de sonar multifeixe; (c) reconstrução esparsa; (d) reconstrução densa.



Fonte: CONG et al., 2021.

Apesar dos métodos de detecção acústica possuírem um grande alcance de inspeção, eles possuem baixa resolução, sendo incapazes de detectar estruturas mais complexas, limitando suas aplicações práticas. Como alternativa a esse déficit de resolução, surgem os sensores óticos subaquáticos que possuem imagens com altas resoluções e precisão para pequenas distâncias de inspeção (HOVER et al., 2012), no qual existem as alternativas de sensor visual 2D subaquático e de envio visual 3D, conforme a Figura 8 (CONG et al., 2021).

Figura 8 – Aplicações do sensor visual subaquático: (a) ancoragem de robôs subaquáticos; (b) interação homem-máquina submarina (c) medição de tubulações submarinas; (d) reconstrução de destroços de navios submersos.



Fonte: CONG et al., 2021.

A inspeção visual 2D é diversamente utilizada para a observação do ambiente subaquático, no qual este método possui apenas a necessidade de restauração da qualidade das imagens captadas e a detecção e rastreamento de objetos subaquáticos, como dutos de fundo do mar e inspeção de estruturas oceânicas (plataforma e navios) (CONG et al., 2021).

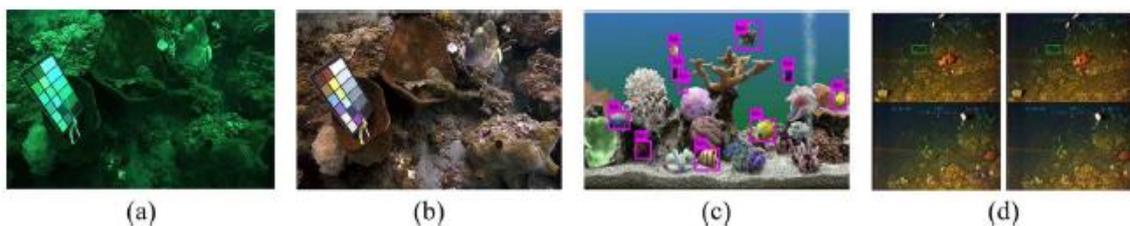
Um dos problemas em conseguir boas resoluções em imagens subaquáticas se deve a que o cenário subaquático possui grande absorção e espalhamento de luz, podendo ainda diminuir a visibilidade e o contraste das mesmas (LI et al., 2020, p. 4376-4389, apud CONG et al., 2021).

Portanto, é fundamental que os sensores óticos tenham um sistema de restauração de qualidade de imagem. Atualmente, utilizam-se três métodos distintos para melhorar a nitidez das imagens: método baseado em modelos não físicos, método baseado em modelos físicos e método baseado em dados (CONG et al., 2021).

O método de modelos não físicos aprimora a qualidade da imagem realizando alterações no contraste e no espaço de cores da mesma. Já o método de modelos físicos melhora a qualidade utilizando da construção de um modelo físico de degradação.

Por fim, o método que utiliza de dados é dividido em duas categorias: modelos baseados em dados sintéticos e baseados em dados reais. O modelo baseado em dados sintéticos utiliza de pares de dados sintetizados artificialmente, enquanto que o modelo de imagem depende de cenários especiais, condições de luz, temperatura e turbidez, reduzindo drasticamente a sua utilização prática (CONG et al., 2021). A Figura 9 mostra exemplos de restauração de imagens captadas por sensores acústicos.

Figura 9 – Detecção de objetos acústicos subaquáticos e reconstrução de cenas: (a) detecção de objetos de sonar de varredura lateral; (b) detecção de objetos de sonar multifeixe; (c) reconstrução esparsa; (d) reconstrução densa.



Fonte: CONG et al., 2021.

Por outro lado, a detecção de objetos subaquáticos visa captar os objetos de interesse através de imagens. Para realizar essa detecção, ela é dividida em dois métodos: baseados em recursos tradicionais e baseados em aprendizado profundo.

Os métodos baseados em recursos tradicionais utilizam de dois passos para captar as imagens: 1) gerar uma pirâmide de imagem com subníveis por amostragem da imagem original nos eixos verticais e horizontais e 2) extrair os recursos da imagem e enviando os resultados para um classificador de imagem. Já no método baseado em aprendizado, o objeto é localizado estimando a pontuação da caixa delimitadora obtida por amostragem da imagem de entrada (CONG et al., 2021).

A inspeção visual 3D possui o diferencial de não apenas recuperar estruturas 3D subaquáticas, mas também de localizar com alta precisão as posições dos objetos. Bodenmann et al. (2017, p. 833-851, apud CONG et al., 2021) projetaram um scanner a laser subaquático capaz de capturar simultaneamente a imagem cinza e a imagem da faixa do laser, podendo transformar essas capturas em informações precisas de forma e cor. Bleier et al. (2019, p. 13-18, apud CONG et al., 2021) projetaram um scanner a laser onde a câmera captura a linha cruzada projetada pelo laser e forma a imagem através de nuvens de pontos 3D.

No entanto, estes dois métodos não consideram a influência da refração dos ambientes subaquáticos. Em virtude desse problema, Palomer et al. (2019, p. 1333-1344, apud CONG et al., 2021) desenvolveram um sensor de varredura de imagem subaquática que delimita os planos de luz em um cone elíptico, obtendo maior precisão de reconstrução 3D. Por fim, o Instituto de Automação Shenyang projetou um sensor de luz subaquático, que considera a refração da água, fazendo com que o sensor possa alcançar um desempenho de reconstrução com alta precisão GU et al., 2021, p. 1-12, apud CONG et al., 2021 (GU). A Figura 10 ilustra os principais sensores de scanners a laser subaquáticos.

Figura 10 – Sensor de scanner a laser subaquático: (a) sensor de medição de luz estruturado subaquático; (b) sensor de scanner a laser subaquático; (c) scanner a laser de rotação subaquática; (d) sensor de scanner a laser subaquático.



Fonte: CONG et al., 2021.

Embora as tecnologias de detecção acústica e ótica subaquática sejam as mais amplamente utilizadas, ainda existem muitos problemas que as mesmas não conseguem solucionar (por exemplo, efeitos acústicos de multipercursos, reverberação acústica e atenuação ótica). Portanto, para incrementar a capacidade de detecção e inspeção dos AUV's, se fez

necessário explorar diferentes tecnologias de detecção subaquática, no qual as mais emergentes no âmbito naval são o sensoriamento eletromagnético subaquático e o sensor biônico subaquático.

O sensoriamento eletromagnético subaquático permite a comunicação do veículo submerso em ambientes complicados e pode evitar os efeitos acústicos de múltiplos caminhos, sendo uma ótima alternativa para a inspeção em locais de água turva ou regime turbulento (YU et al., 2019, p. 45-49, apud CONG et al., 2021). O sensor biônico é uma linha lateral artificial que simula a percepção dos peixes, cujo órgão proporciona detectar mudanças no fluxo de água ao seu redor (LIU et al., 2016, p. 1-15, apud CONG et al., 2021).

2.5 Sistemas de controle

Com o desenvolvimento de sistemas de navegação e localização é necessário desenvolver um sistema de controle para que o AUV funcione corretamente. Este sistema tem a função de regular a velocidade a fim de obter o posicionamento desejado, possuindo três operações primárias: planejamento, controle e diagnóstico de erros. Dentre essas três, o controle é a operação fundamental para garantir que o AUV siga o trajeto planejado e acione mecanismos de replanejamento caso aconteça alguma interferência ao longo da missão (SAHOO; DWIVEDY; ROBI, 2019).

O procedimento mais clássico para o controle da navegação é o Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID), uma vez que possui fácil aplicação (SAHOO; DWIVEDY; ROBI, 2019). Entretanto, devido ao aumento na complexidade das missões, outros sistemas foram desenvolvidos envolvendo estratégias de controles mais avançadas, como o controle não linear, adaptativo, de modo deslizante e controle de rede neural.

Como forma de reduzir a complexidade matemática que os controles PID possuem, estão sendo amplamente utilizados os controladores *Fuzzy* (difusos), uma vez que ele funciona a base de entradas analógicas na forma de uma variável lógica, assumindo valores contínuos entre 0 e 1.

No entanto, a aplicação desses sistemas não exclui o outro, por exemplo, Kato et al. (2002) desenvolveram um AUV que utiliza os controladores PID e *Fuzzy* para manter a altitude do mesmo na função de rastreamento de cabos submersos. Para um AUV esférico controlado por propulsores de jato d'água, Li et al. (2017) usaram o *Fuzzy Sliding Mode Controller* para realizar o controle da navegação do veículo submerso autônomo.

Para o controle de veículos submersos não rígidos, é necessário utilizar de sistemas diferentes dos convencionais, uma vez que a maior parte deles foi formulado para veículos

submersos rígidos. Um desses sistema de controle foi utilizado por Yu et al. (2016). Onde eles usaram um controle de dois estágios para manter a postura de um peixe robótico.

O primeiro estágio é um controle que permite que o peixe nade mais rápido em direção ao seu destino, enquanto o segundo estágio refere-se ao ajuste do controle de estabilidade do mesmo. Outro exemplo deste sistema foi utilizado por Vo et al. (2010), cujo desenvolvimento do modelo dinâmico de um robô peixe foi baseado no método de Lagrange.

Com o avanço das tecnologias dos computadores, há um crescente aumento na utilização de controladores de redes neurais (SAHOO; DWIVEDY; ROBI, 2019). Este sistema é inspirado em redes neurais biológicas no qual o computador processa as informações conforme aprende via processamento de dados. Li e Lee (2005) projetaram um controlador de rede neural para um AUV, cuja rede foi utilizada para detectar dinâmicas desconhecidas no movimento do veículo submerso.

De forma geral, os sistemas de controle são desenvolvidos e utilizados para fazer com que o AUV siga o caminho pré-determinado para sua missão, envolvendo a análise e precauções com a dinâmica desconhecida do robô, a não linearidade do sistema e dos eventuais distúrbios que são causados no ambiente subaquático. No entanto, estes sistemas também podem ser desenvolvidos para controlar a profundidade, eficiência energética, propulsão biomomética, entre outros mecanismos (SAHOO; DWIVEDY; ROBI, 2019).

2.6 Fonte de energia

Pela geometria compacta do AUV, os mesmos possuem pouco espaço a bordo para armazenamento de fontes de energia, podendo comprometer o desempenho da duração da missão. Dessa forma é de fundamental importância a procura por melhores fontes de energia que sejam capazes de serem implementadas dentro do AUV (HENDERSON; PANTELAKIS; AN, 2003).

Embora existam diversos sistemas de armazenamento de energia comercializados (baterias, células de combustível e motores de combustão), as baterias de íons de lítio são as mais comuns (SEGOVIA RAMÍREZ et al., 2021) devido a sua tecnologia ser de simples implementação em pequenos veículos submersos. No entanto, sua manutenção e recarga envolvem produtos químicos voláteis com altos custos (SUN et al., 2016, p. 243-251, apud SEGOVIA RAMÍREZ et al., 2021).

As baterias primárias são aquelas que não são recarregáveis e as secundárias são recarregáveis. Por esse motivo, as baterias secundárias são as de maior uso nos AUV's, sendo as baterias primárias utilizadas apenas em missões específicas (BRADLEY et al., 2001). A

Tabela 3 apresentam exemplos de AUV's e quais tipos de baterias são utilizados nos mesmos, enquanto que a Tabela 4 apresenta os tipos de baterias químicas e suas determinadas características.

Tabela 3 – Frota de AUV acadêmica dos Estados Unidos e suas características de potência.

Nome	Tamanho	Química da bateria	Profundidade
Remus	1 m	Chumbo ácido	150 m
Odyssey IIB	2 m	Zinco prateado	4500 m
ABE	2 m x 3 cascos	Chumbo ácido	5500 m
FAU Explorer	2 m	Níquel-cádmio	300 m
Autosub	7 m	Alcalina	300 m
FAU Morpheus	1.5-3 m	Níquel-cádmio	-

Adaptado de: BRADLEY et al., 2001.

Tabela 4 – Química das baterias e suas características.

Química	Densidade energética (Wh/kg)	Pressão compensável (Wh/kg)	Desgaseificação	Ciclos de vida útil	Comentários
Alcalina	140	Não	Possível em altas temperaturas	1	Barata, de fácil manuseio
Lítio primário	375	Não	-	1	Densidade de energia muito alta
Chumbo ácido	31,5	Sim (46)	Sim, inclusive em células seladas	~100	Bem estabelecido, fácil de trabalhar com tecnologia
Níquel-cádmio	33	Não	Se sobrecarregada	~100	Curvas de descarga muito planas
Níquel-zinco	58,5	Possível (160)	Não	~500	Tecnologia emergente
Íons de lítio	144	Não	Não	~500	Ampla utilização em embalagens pequenas
Polímero de lítio	193	Possível	Não	~500	Apenas o formato "cartão de crédito" disponível no momento
Zinco prateado	100	Não	Não	~30	Pode lidar com picos de potência muito alta

Adaptado de: BRADLEY et al., 2001.

Entre as baterias primárias, as baterias alcalinas são as mais simples de usar, uma vez que são baratas e seguras, embora tendam a liberar hidrogênio quando armazenados por longos períodos. Este problema pode ser agravado caso elas estiverem em um compartimento de pressão selado por um longo prazo.

Outro ponto negativo das baterias alcalinas é que elas possuem apenas uma vida útil, por ser uma bateria primária, logo não são recarregáveis. Para situações onde grandes densidades de energia é necessário, as células primárias de lítio representam a melhor escolha. Dentre suas desvantagens, a principal é o seu custo, embora a variabilidade de cargas da bateria também é de fundamental importância, pois se a carga atuar em pulsos de alta potência com longos intervalos entre os pulsos, essas células podem perder uma fração significativa de sua energia química (BRADLEY et al., 2001).

Dentro das baterias secundárias as células de chumbo-ácido são as mais fáceis de trabalhar, no qual para sistemas grandes, as baterias podem ser compensadas por pressão em uma caixa com óleo, resultando em uma diminuição no peso associado à mesma. Em sistemas menores são utilizados, normalmente, eletrólitos gelificados. As células de níquel-cádmio apresentam uma melhoria em relação ao ácido de chumbo na densidade de energia.

Seus pontos negativos residem na dificuldade de determinar o estado de carga e o calor desenvolvido perto do final da carga pela célula, podendo acarretar problemas para baterias maiores. A mais recente forma química de baterias é o sistema níquel-zinco. Este modelo apresenta células seladas, mas utilizam um eletrólito líquido (hidróxido de potássio – KOH) com um pequeno espaço de ar. Este modelo de células, a priori, foram desenvolvidos para a indústria eletromotriz leve (bicicletas e *scooters* elétricas), superando o ácido de chumbo em termos de densidade de energia e em vida útil (BRADLEY et al., 2001).

Ainda a respeito das baterias secundárias, as células de íons são as mais utilizadas em telefones celulares e laptops e, mais recentemente, foram adaptadas para os AUV's devido à sua alta densidade de energia e sua longa vida útil. Em sua estrutura, as baterias de íons possuem um eletrólito líquido e uma caixa de aço inoxidável com uma pequena bolsa de gás para permitir a expansão térmica.

Entretanto, essa bolsa de gás não permite sua utilização em águas profundas devido às pressões nessas regiões. Outra desvantagem das baterias de íons de lítio são seus altos custos e dimensões maiores que as demais, além de exigir uma maior complexidade dos circuitos para operá-las.

As baterias de polímero de lítio referem-se à química dos íons de lítio com o eletrólito preso em um gel ou outro material absorvente, possuindo baixa densidade e, quando operados com óleo, podem ser uma alternativa das baterias de íons de lítio.

As baterias de zinco prateado possuem uma vida útil curta em comparação com as demais baterias secundárias, além disso, são caras e demasiadas sensíveis, requerendo atenção extra no manuseio das mesmas, por conta desses fatores, esta é uma bateria pouco utilizada dentre os AUV's (BRADLEY et al., 2001).

2.7 Formato do casco

A definição do formato do corpo do AUV é de extrema importância pois além de servir para alocar todos os componentes mecânicos e eletrônicos, ela também afeta a hidrodinâmica envolvida na interação fluido-casco (SAHOO; DWIVEDY; ROBI, 2019). No geral, ela é definida dependendo dos diferentes objetivos e ambientes subaquáticos propostos para a missão.

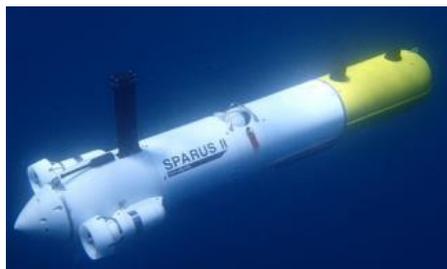
Durante o movimento, o AUV recebe forças arrasto e sustentação devido ao atrito entre o corpo e a água afetando a dinâmica do mesmo. Um dos principais fatores para a intensidade dessas forças é a estrutura do corpo (SAHOO; DWIVEDY; ROBI, 2019). Portanto avaliar a interação entre o casco do AUV com a água é fundamental para estimar o arrasto e a sustentação incidentes.

Outra força incidente no AUV é a pressão hidrostática, que aumenta com a profundidade, e a pressão hidrodinâmica, que é influenciada pela velocidade e o movimento do veículo submerso. Em casos de grandes pressões hidrostáticas, o corpo do AUV pode ser deformado ou danificado, podendo comprometer seu funcionamento e vida útil.

Como forma de prever as intensidades dessas forças, pesquisadores utilizam o Método dos Elementos Finitos (MEF) para realizar análises de tensão e flambagem da estrutura do casco, auxiliando na seleção de materiais e espessura de paredes adequadas, além de definir limites de profundidade de operação do AUV (SAHOO; DWIVEDY; ROBI, 2019).

Como o AUV foi inspirado em submarinos, a maioria deles possui o formato de torpedo, conforme mostrado na Figura 11. Entretanto, há diversas outras formas de estruturas que são utilizadas atualmente. Fittery et al. (2012) desenvolveram um AUV em forma de ovo chamado "Omni-Egg". Já Li et al. (2017) elaboraram AUV's esféricos, no qual eles apresentam alta manobrabilidade, além de conseguirem acessar locais remotos e de difícil acesso, como mostrado na Figura 12.

Figura 11 – Exemplo de um AUV no formato de torpedo (SPARUS II).



Fonte: CARRERAS et al., 2018.

Figura 12 – Exemplos de AUV's com formato esférico: (a) Ommi-Egg; (b) SUR III.



Fonte: (a) FITTERY et al., 2012; (b) LI et al., 2017.

Além das estruturas simples mencionadas anteriormente, o formato do casco dos AUV's também pode ser elaborado com geometrias mais complexas, como o caso do P-SURO (LI et al., 2010), apresentado na Figura 13.

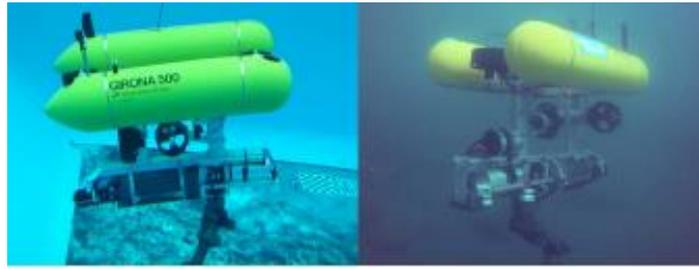
Figura 13 – Vista em perspectiva do P-SURO, AUV com geometria complexa.



Fonte: LI et al., 2010.

Uma característica em comum desses AUV's é que devido a velocidade em que eles atuam, que variam de média para alta, eles possuem uma estrutura fechada, resultante do arrasto gerado. Por conta disso, AUV's que navegam em baixa velocidade podem possuir uma estrutura aberta, como o caso do Girona 500 (WIRTH; CARRASCO; CODINA, 2013 (Figura 14).

Figura 14 – Exemplo de um AUV no com a estrutura aberta (Girona 500).

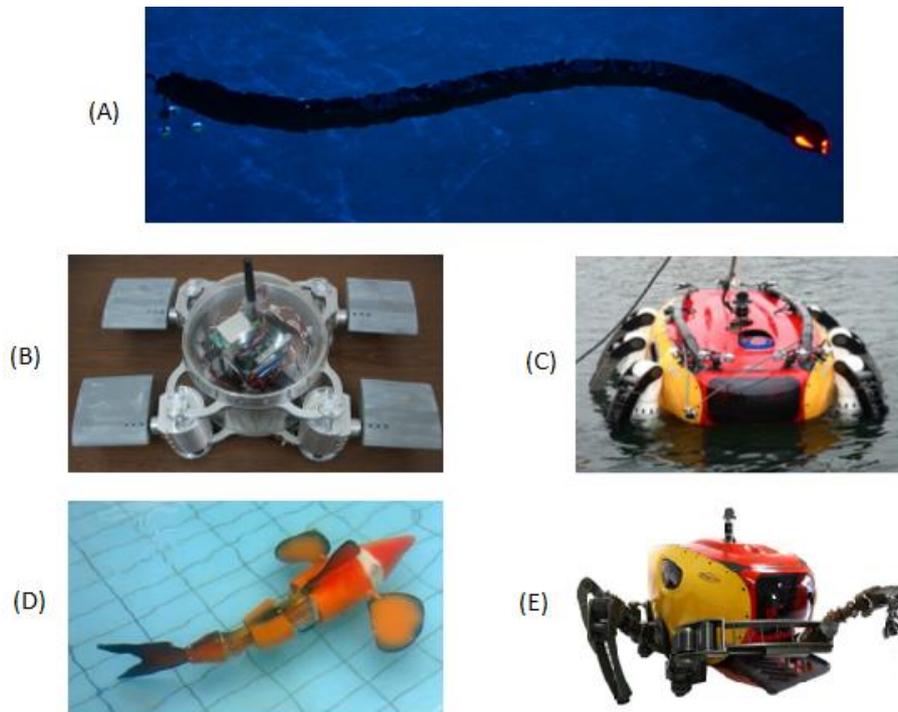


Fonte: WIRTH; CARRASCO; CODINA, 2013.

Além desses modelos artificiais, também existem AUV's que possuem sua estrutura baseada em animais aquáticos. Eles são chamados de AUV's biomiméticos, por conta de sua estrutura biônica. Esses formatos usualmente são utilizados em exploração e pesquisa em ambientes subaquáticos de forma que o veículo submerso integre no ambiente sem perturbar a vida aquática.

Dentre eles, o modelo mais comum é no formato de peixe, Figura 15 (d) (ASHAR et al., 2013). Entretanto, também foram desenvolvidos AUV's imitando outros animais aquáticos como cobra (Figura 15 (a)) (KELASIDI et al., 2015), tartaruga (Figura 15 (b)) (ZHAO et al., 2008), besouro (Figura 15 (c)) (KIM; LEE, 2014), caranguejo (Figura 15 (e)) (JUN et al., 2013), entre outros.

Figura 15 – Exemplos de AUV's biomiméticos em formato de (a) cobra, (b) tartaruga, (c) besouro, (d) peixe e (e) caranguejo.



Fonte: (a) KELASIDI et al., 2015; (b) ZHAO et al., 2008; (c) KIM; LEE, 2014; (d) ASHAR et al., 2013; (e) JUN et al., 2013.

Uma outra vertente de criação de AUV's que está se desenvolvendo é a criação de diferentes módulos que podem ser acoplados uns aos outros, como mostrado na Figura 16. Essa ideia surgiu para diminuir a dificuldade de substituir sensores ou computadores danificados em um AUV compacto, uma vez que a separação por módulos permite eles serem trocados mais facilmente. Além da facilidade de manutenção, eles também possuem uma estrutura modular versátil, permitindo uma melhor navegação (SAHOO; DWIVEDY; ROBI, 2019).

Figura 16 – Exemplo de AUV com diferentes módulos acoplados (MARTA).



Fonte: ALLOTTA et al., 2015.

3 CARACTERÍSTICAS DE INSPEÇÃO EM ÁGUAS RASAS

A seguir serão apresentadas as necessidades e características de um AUV operando em águas rasas.

3.1 Fenômenos de *seakeeping* em águas rasas

A influência das ondas de superfície pode ser significativa para a navegação e o desempenho hidrodinâmico do AUV quando ele trabalha em águas rasas (TIAN; SONG; DING, 2019).

Entretanto, na maioria dos casos, pesquisas sobre modelos numéricos para prever o movimento do AUV não consideram os efeitos de ondas. A principal razão para essa falta de interesse dos pesquisadores é devido a que a maioria dos AUV's navegam em águas profundas, onde o efeito de ondas é insignificante.

Outra motivação para a negligência desse fator é que ao incluir os efeitos ocasionados pelas ondas resultará em um modelo numérico mais complexo, dificultando sua aplicação na inteligência artificial do veículo submerso autônomo (FANG; CHANG; LUO, 2006).

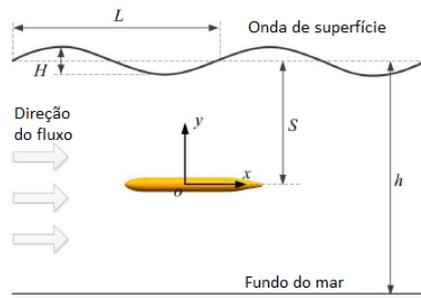
Atualmente, o modelo de *Reynolds Averaged Navier Stokes* (RANS) é o mais aplicado para calcular as forças hidrodinâmicas em veículos subaquáticos. Entretanto, o modelo RANS não considera os efeitos de gravidade e de superfície livre.

Portanto, para avaliar os efeitos hidrodinâmicos nos AUV's que trafegam próximo da superfície livre, pesquisadores utilizam de métodos experimentais ou de análises em CFD (Dinâmica de Fluidos Computacional) para estudar esses fenômenos incidentes no desempenho do veículo submerso (TIAN; SONG; DING, 2019).

A exemplo de estudo baseado em métodos experimentais, Jagadeesh et al. (2009) realizaram um estudo experimental utilizando tanques de reboque para avaliar as forças e momentos hidrodinâmicos no casco de um AUV que se encontrava próximo à superfície. Já na avaliação utilizando os recursos de CFD, Nematollahi et al. (2015) realizaram sua pesquisa avaliando numericamente as propriedades hidrodinâmicas do AUV próximo à superfície livre utilizando o software *ANSYS CFX*.

Recentemente, Tian et al. (2019) desenvolveram um estudo investigativo sobre o desempenho hidrodinâmico de um AUV com escoamento de onda-corrente utilizando a análise baseada em métodos CFD. No qual eles avaliaram as influências oriundas da altura de onda (Figura 18), da profundidade (Figura 20) e do número de Reynolds (Figura 22). Para esse estudo, os autores utilizaram os parâmetros dimensionais mostrados na Figura 17.

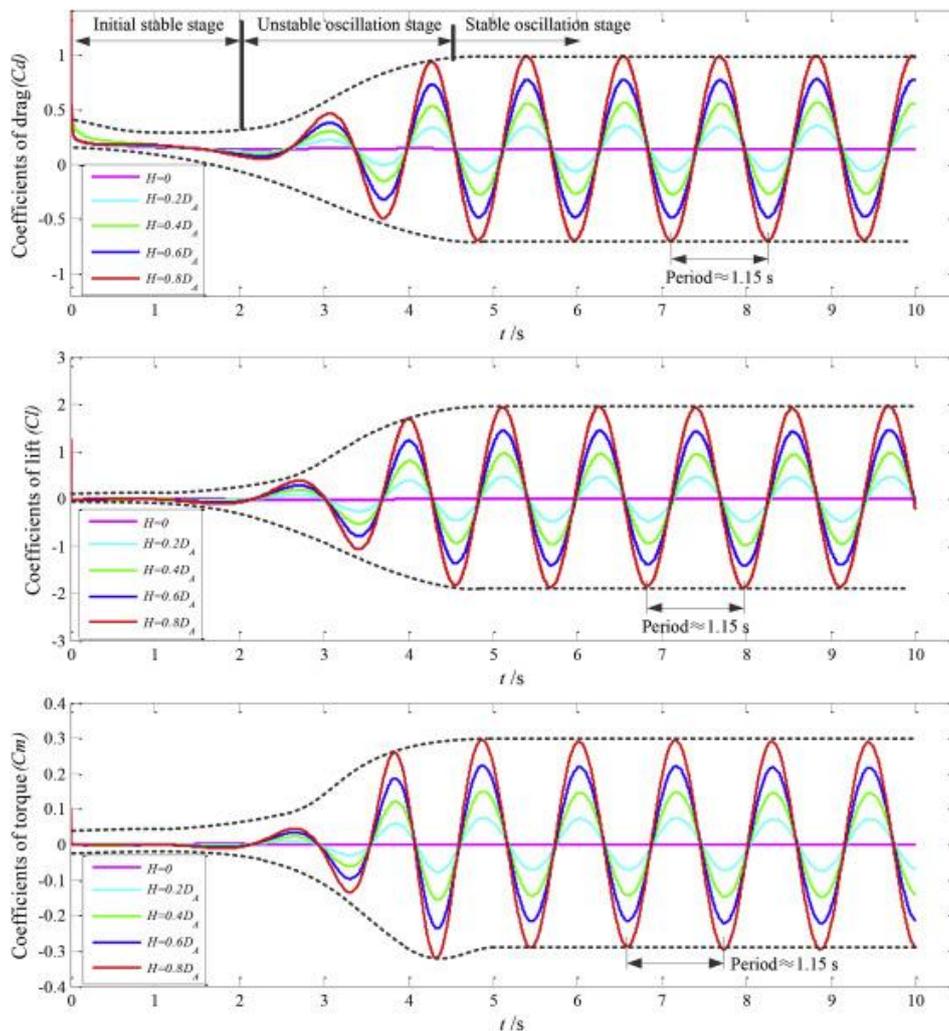
Figura 17 – Esquema do AUV submetido a onda e corrente.



Adaptado de: TIAN; SONG; DING, 2019.

Onde L é o comprimento da onda, H é a altura da onda, S é a profundidade do AUV e h é a profundidade da água. Para este caso, Tian et al., determinaram diferentes alturas de ondas, profundidades do AUV e da água relacionando-os com o diâmetro de 0,20 metros do AUV.

Figura 18 – Coeficientes instantâneos de forças hidrodinâmicas no AUV para cinco alturas de onda diferentes.

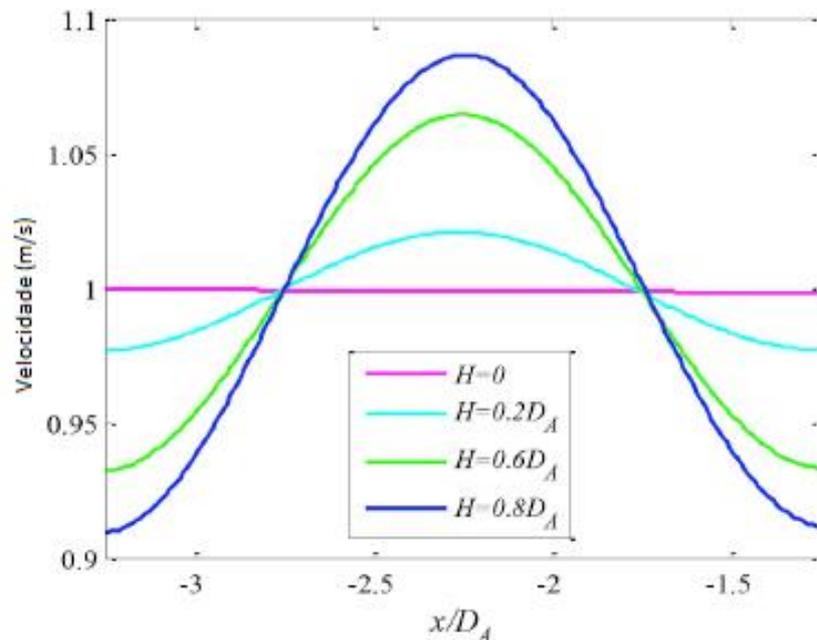


Fonte: TIAN; SONG; DING, 2019.

Para o efeito da altura de onda nas características do AUV, os autores obtiveram que para a condição sem onda ($H=0$), o arrasto, a sustentação e o torque convergem após os 4 segundos. Já para condições de onda, essas forças oscilam, com a amplitude de oscilação aumentando conforme a altura da onda. Onde D_A é o diâmetro do AUV.

Também foi possível verificar que, para a mesma profundidade, a amplitude da velocidade do fluxo de água aumenta conforme a aumenta a altura da onda, como mostrado na Figura 19. Onde para os casos com onda, quanto maior altura de onda, maior é a velocidade da água perto da superfície.

Figura 19 – Perfis de velocidade para diferentes alturas de onda e profundidade de água.

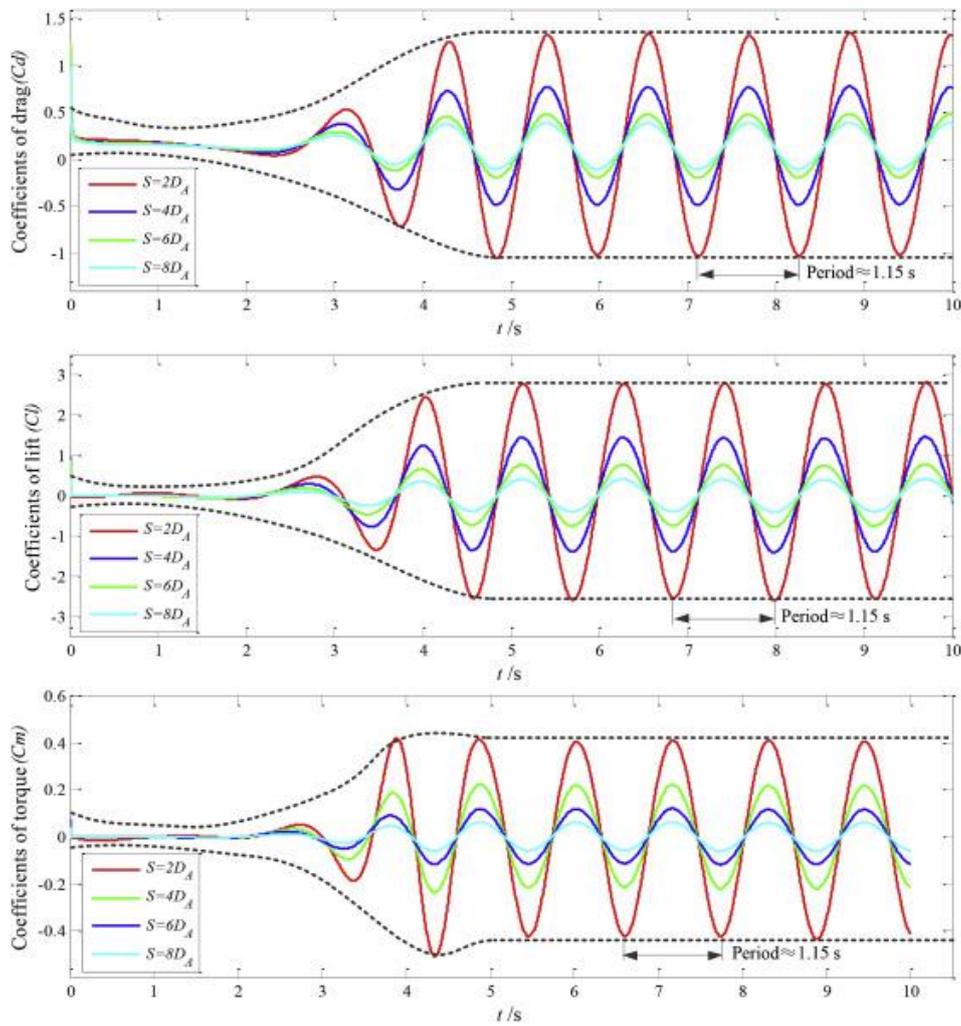


Adaptado de: TIAN; SONG; DING, 2019.

Em relação ao efeito da profundidade nas características do AUV, foi obtido que à medida que a profundidade aumenta, tanto a amplitude do coeficiente de arrasto (C_a) quanto as do coeficiente de sustentação (C_s) e torque (C_t) diminuem, resultando em uma menor influência da onda no arrasto, sustentação e torque no AUV (Figura 20).

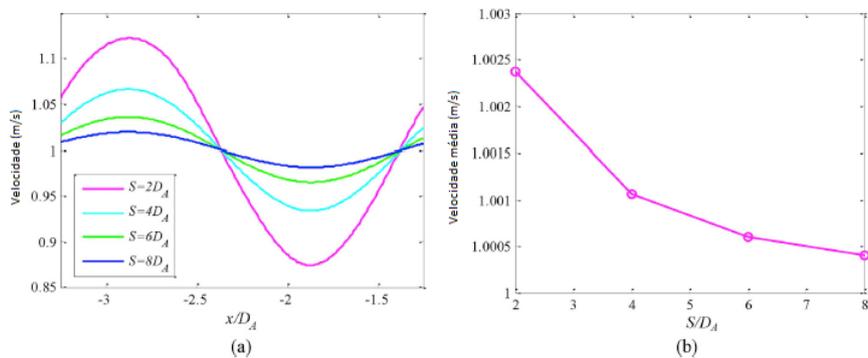
A Figura 21 (a) apresenta os perfis das velocidades no qual foi possível constatar que a amplitude da velocidade da água diminui com o aumento da profundidade do AUV. Com a Figura 21 (b) mostrando a variação da velocidade média para diferentes profundidades, no qual é possível observar que, à medida que a profundidade aumenta, a velocidade média diminui, contribuindo para uma diminuição de forças incidentes no AUV.

Figura 20 – Coeficientes instantâneos de forças hidrodinâmicas no AUV em quatro diferentes profundidades submersas.



Fonte: TIAN; SONG; DING, 2019.

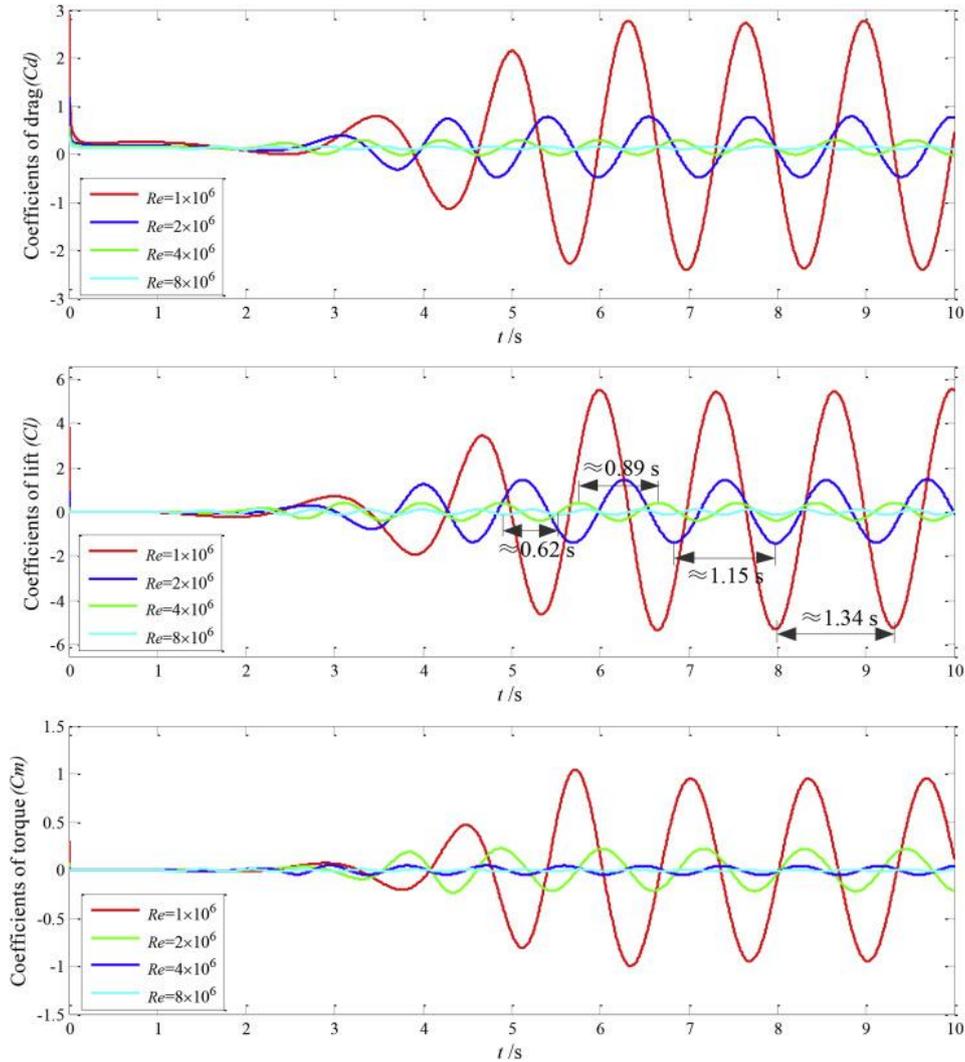
Figura 21 – (a) Perfis de velocidade a montante do AUV para diferentes profundidades submersas e (b) velocidade média a montante em diferentes profundidades submersas.



Adaptado de: TIAN; SONG; DING, 2019.

Com relação às influências do número de Reynolds, a Figura 22 mostra as amplitudes dos coeficientes de arrasto, sustentação e torque para quatro diferentes números de Reynolds, no qual é possível observar que esses coeficientes diminuem à medida que o Reynolds aumenta.

Figura 22 – Coeficientes instantâneos de forças hidrodinâmicas no AUV em quatro diferentes números de Reynolds.



Fonte: TIAN; SONG; DING, 2019.

Esse fenômeno acontece devido a que números de Reynolds altos correspondem a maiores velocidades, para o qual os coeficientes das forças hidrodinâmicas são reduzidos devido às seguintes equações:

$$C_a = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho S_A U^2} \quad (4)$$

$$C_s = \frac{F_y}{\frac{1}{2}\rho S_A U^2} \quad (5)$$

$$C_t = \frac{F_z}{\frac{1}{2}\rho S_A U^2 L_A} \quad (6)$$

Onde F_x , F_y e F_z são o arrasto, sustentação e torque, respectivamente; ρ é a densidade do fluido, S_A é a máxima área transversal do AUV; L_A é comprimento do corpo do AUV e U é a componente da velocidade. Este último possui grande influência pelo número de Reynolds, motivo pelo qual, com o aumento do número de Reynolds, os coeficientes diminuem.

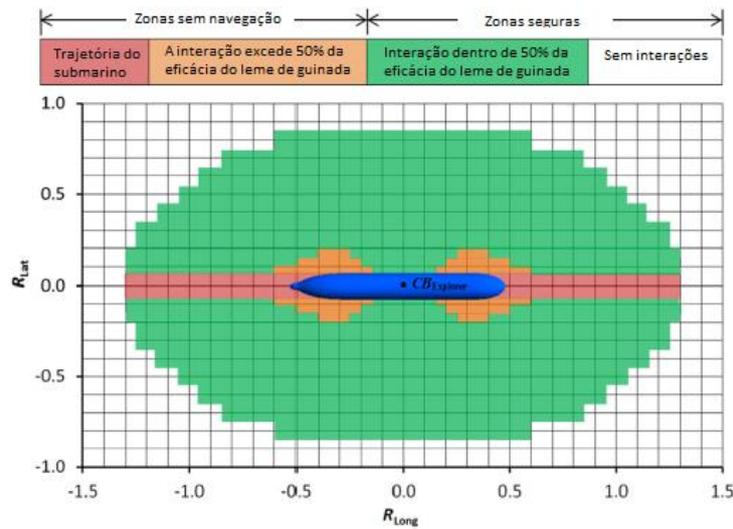
Outro fator que pode influenciar negativamente na navegação e desempenho do AUV são suas interações hidrodinâmicas quando o veículo submerso navega próximo a superfícies significativamente maiores que o mesmo ou próximo do fundo, caracterizando os fenômenos de navegação em águas restritas e águas rasas.

O efeito de parede, resultante do fenômeno de águas restritas, ocorre quando o casco do navio está próximo o suficiente do limite do corpo de água, afetando sua resistência, velocidade, manobra e outras características de desempenho (HARVALD, 1983). Esse mesmo efeito acontece de forma similar nos AUV's, quando, ao operar próximo de uma superfície maior, como um navio, cais, plataformas, submarinos etc., ele sofre interferências dos campos de pressão gerados pela estrutura maior (HARDY; BARLOW, 2008).

Por este motivo, é fundamental estudar os efeitos da interação entre o AUV e corpos maiores, a fim de entender seu desempenho em relação as suas manobras. Randeni et al. (2015) desenvolveram um modelo numérico, utilizando análises em CFD, com o intuito de simular os movimentos ocasionados em um AUV para diferentes posições laterais e longitudinais em relação a um veículo subaquático de maior porte. Leong et al. (2015) realizam um estudo experimental dos efeitos da interação entre um AUV operando próximo a um submarino de diâmetro 14,634 vezes maior. Para esse estudo, os autores investigaram a influência da interação hidrodinâmica nas forças longitudinais e laterais, além do momento de guinada atuando sobre o AUV oriundas do tamanho relativo entre os dois veículos subaquáticos.

A Figura 23 apresenta duas regiões onde não é viável para o AUV navegar devido à alta variação nas forças e momentos de interação em relação a uma pequena mudança na posição relativa, sendo a faixa em verde representando a área de navegação segura nas proximidades do submarino. Todavia, é válido ressaltar que essas áreas de atuação certamente irão variar conforme ao formato e tamanho da estrutura do AUV e do corpo maior.

Figura 23 – Envelope operacional para o AUV manobrar com segurança ao redor do submarino para a relação de diâmetro de 14.634. A resolução espacial das zonas é +/- 0,05 Rlong e +/- 0,05 RLat.

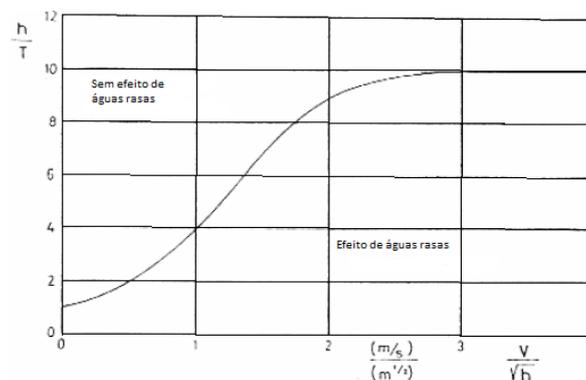


Adaptado de: LEONG et al., 2015.

Por fim, o efeito de águas rasas ocorre quando as extremidades do corpo de água são muito próximas em relação a distância vertical do navio. Uma análise do efeito de águas rasas foi feita por Schlichting (1934). Sua análise abordou o aumento da resistência em águas rasas de extensão lateral ilimitada para navios, operando em velocidades subcríticas, onde a redução da velocidade leva a uma redução da resistência ao atrito. No entanto, o limite do efeito de águas rasas na resistência depende do tipo, do tamanho e da velocidade do navio. Uma ideia aproximada da área sem efeito de águas rasas pode ser obtida através da Figura 24.

Onde V é a velocidade do navio, h é a profundidade da água e T é o calado. Como o estudo de Schlichting foi realizado para navios, os resultados certamente vão diferir para AUV's, uma vez que este possui propriedades similares a um submarino, visto que toda a sua estrutura é submersa. Por tanto, é recomendado para o desenvolvimento de um projeto de AUV em águas rasas que seja levado em consideração este efeito.

Figura 24 – Área com e sem efeito de águas rasas.



Adaptado de: SCHLICHTING, 1934.

3.2 Seleção das características principais de um AUV para águas rasas

Como o objetivo deste trabalho é identificar as características necessárias para realizar um projeto preliminar de um AUV para águas rasas, a partir da revisão de bibliografia e do estado da arte, foi realizada uma análise das principais características necessárias para realizar a inspeção para manutenção para as condições de águas rasas, que na literatura se considera como profundidades de até 200 metros, mas que excepcionalmente e dependendo da estrutura, pode se considerar profundidades de até 300 metros.

Como visto na seção 2.1, os AUV's possuem atuações nos setores militares, industriais, científicos e em algumas aplicações para esporte e recreio. Entretanto, foi determinado o setor industrial como foco de estudo, uma vez que ele possui as principais aplicações de inspeção para manutenção. De acordo com a Tabela 2, é possível identificar três principais áreas de atuação, sendo elas: reparo e manutenção, rastrear e reparar cabos submarinos e inspeção de estruturas subaquáticas.

Pela restrição de estudo para águas rasas, as áreas de atuação que envolvem os cabos submarinos não foram analisadas, uma vez que os mesmos possuem profundidade superior a 300 metros. Consolidando o estudo para as áreas de reparo, manutenção e inspeção de estruturas subaquáticas. Dentro desse setor, as principais aplicações de AUV's são mapeamento de portos, análise estrutural de plataformas offshore e inspeção de cascos navios atracados.

3.2.1 Sistema propulsivo

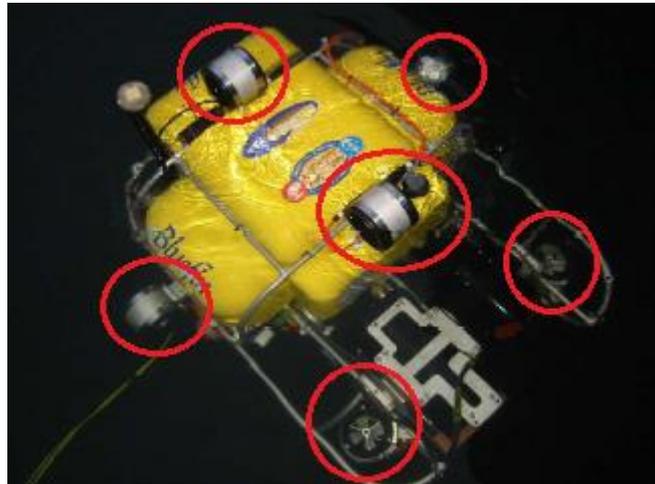
Para essas aplicações apresentadas na seção 3.2, a principal necessidade propulsiva que os AUV's devem ter é conseguir se manter estáveis sob seu eixo mesmo com as incidências de ondas e possíveis efeitos hidrodinâmicos de parede e águas rasas, por estarem demasiado próximos a grandes estruturas (em comparação com seu tamanho), como navios e plataformas offshore.

A partir das três principais aplicações, é necessário selecionar os sistemas propulsivos que forneçam a possibilidade de o AUV flutuar enquanto realiza sua missão. Enquanto o conjunto de hélice convencional e o sistema de propulsão ondulatória (utilizado pelos AUV's biomiméticos que simulam peixes ou serpentes marinhas) apresentam bom desempenho para cobrir grandes distâncias, eles são ineficientes para manter o AUV em um posicionamento dinâmico (parado), uma vez que eles não possuem propulsão para estabilizar os 6 graus de liberdade (jogo, deriva, afundamento, avanço, arfagem e guinada).

Por tanto, é necessário um sistema propulsivo que proporcione o posicionamento dinâmico. Para isso, tanto a propulsão de jato d'água quanto hélices podem suprir essa

necessidade, desde que ambos sistemas possam fornecer empuxo em todos os graus de liberdade. Um exemplo desse conjunto de propulsores é mostrado na Figura 25, onde o AUV possui 8 propulsores bidirecionais, sendo 2 deles a vante próximos aos sonares, 2 nas laterais, 2 na parte superior do AUV e mais 2 a ré do AUV.

Figura 25 – Exemplo de um AUV com sistema de posicionamento dinâmico.



Adaptado de: VAGANAY et al., 2006

3.2.2 Sistema de navegação

Os três sistemas de navegação mencionados na seção 2.3 possuem a capacidade de fornecer com precisão a velocidade e posição relativa do AUV em águas rasas, sendo o critério para usá-los variando de acordo com sua adaptabilidade ao sistema de controle e os dados para alimentar seu sistema. Dentre eles, a navegação inercial, que processa os dados através dos sensores IMU em conjunto com o sensor DVL, é o sistema mais simples e barato de ser implementado, resultando em ser o sistema mais utilizado para pequenos AUV's.

Diferentemente da navegação inercial, a navegação acústica requer o uso de transponders para estimar a posição do AUV, fazendo com que seja mais caro sua aplicação. Entretanto, este sistema é o que apresenta maior precisão e menores erros de cálculo.

Por este motivo, AUV's que possuem missões mais longas ou com maiores profundidades, além de possuírem um orçamento mais robusto, optam por este sistema, variando apenas qual tipo de sinalizadores se adapta melhor às condições de projeto. Por fim, a navegação geofísica requer informações previamente extraídas do ambiente de navegação para serem usadas no método SLAM. Portanto ela requer estudos prévios do ambiente para ser eficiente, o que pode comprometer à missão do AUV, caso a mesma seja realizada em águas desconhecidas.

Em conjunto com os três sistemas acima, a maioria dos AUV's utilizam sonares de varredura lateral para a pesquisa em águas rasas, uma vez que o mesmo abrange uma ampla faixa de visualização, facilitando a localização do veículo subaquático.

3.2.3 Sistema de inspeção

Para inspeção, os sonares de varredura lateral são pouco eficientes, uma vez que não conseguem obter dados com boas resoluções, ficando restrito a identificação da topologia do ambiente subaquático. Dentre os sensores acústicos o mais eficiente é o sonar multifeixe, sendo utilizado para realizar detecções e rastreamento de objetos no solo oceânico. Outro possível uso deste sensor em inspeções em águas rasas pode ser na reconstrução de imagens em 3D.

Entretanto, este sistema ainda é ineficiente para realizar inspeções e manutenção quando comparado aos sensores óticos. Embora eles não possuam grande alcance, sua principal vantagem é proporcionar imagens de altíssima resolução, sendo de grande utilidade industrial para detectar falhas, como rachaduras nas estruturas. Das suas possibilidades de análise em 2D e 3D, a 3D não apresenta boa utilidade para inspeções, uma vez que sua principal vantagem é realizar localização de objetos submersos, sendo um excesso tecnológico para as necessidades da missão.

Inspeções utilizando tecnologias de detecção eletromagnéticas ainda estão no processo de desenvolvimento e aprimoramento, possuindo poucos artigos e documentos sobre suas aplicações e resultados na área de inspeção para manutenção. Entretanto, este tipo de sensor pode possuir grande potencial na utilização industrial para realizar inspeções similares às de ultrassom e identificar rachaduras antes delas se lastrarem para a superfície.

3.2.4 Sistemas de controle

Os sistemas de controle são os mais versáteis para a utilização em um AUV. Isto é resultado que sua principal função é conectar todos os módulos integrantes do AUV e fazer com que eles funcionem em conjunto. Portanto, seus requisitos de utilização são fornecer memória computacional e a inteligência artificial necessária para a realização da missão.

Para missões mais simples, o sistema de controle mais amplamente usado é o PID, uma vez que o mesmo é de fácil aplicação. Já em missões mais complexas, o PID não é recomendado devido a sua complexidade numérica, portanto, para essas ocasiões, os controladores *Fuzzy* são mais indicados. Para inspeções em águas rasas estes dois sistemas fornecem a autonomia necessária para a maioria dos AUV's, mas, caso seja necessário maior poder computacional, ainda é possível usar os dois sistemas em conjunto.

3.2.5 Fonte de energia

Dentre as possibilidades de geração de energia, a utilização de baterias se mostrou a mais eficiente e mais utilizada atualmente. Por conta de a duração das missões em águas rasas serem mais curtas que as de águas profundas, a demanda energética também é menor, possibilitando menor utilização de espaço útil dentro do casco e também menor densidade energética proveniente das baterias.

Como baterias não são biologicamente sustentáveis em visão da sua problemática com a reciclagem, é importante que elas possam ser reutilizadas para evitar seu descarte. Portanto as baterias alcalinas e de lítio primário não são recomendadas para utilização em águas rasas.

Com o objetivo de ter baterias com a maior duração possível, as que apresentaram maiores ciclos de vida útil foram as níquel-zinco, íons de lítio e polímero de lítio, todas com vida útil de aproximadamente 500 vidas úteis (ciclos de vida útil), sendo as mais indicadas para os AUV's de inspeção para manutenção em águas rasas.

3.2.6 Formato do casco

O formato do casco deve atender as necessidades propulsivas para garantir estabilidade posicional. O formato de torpedo por possuir o comprimento expressivamente maior que seu raio, ele não fornece grande estabilidade vertical, mesmo com a adição de hidrofólios para que ele possa pairar.

Os cascos biomiméticos embora possam conseguir manter um posicionamento estável, eles possuem estruturas muito complexas, uma vez que seu principal objetivo é a exploração de ambientes subaquáticos sem perturbar a vida marinha local, possuindo baixa aplicabilidade industrial.

Para um AUV pairar, a forma do casco deve atender apenas as necessidades dos componentes propulsivos de manterem a estrutura parada no seu eixo mesmo sob as incidências dos fatores externos.

Portanto, é recomendado que suas dimensões sejam proporcionais. O AUV esférico possui as dimensões proporcionais ao seu raio, mas no caso de um AUV em formato oval ou prismático, suas partes mais compridas não devem ser muitos maiores que as curtas (similar à estrutura em forma de torpedo), uma vez que essa desproporcionalidade irá demandar de mais força propulsiva nesses setores, aumentando a complexidade dos computadores de bordo.

Na Tabela 5, apresentamos então uma síntese do que foi descrito acima, com as tecnologias sugeridas para as características necessárias a um AUV, na função de inspeção em águas rasas.

Tabela 5 – Quadro resumo com características sugeridas para um AUV de inspeção em águas rasas.

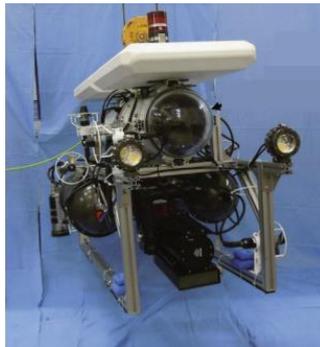
Sistema	Tecnologia Sugerida	Vantagens
Propulsivo	Hélices	Sistema de simples aplicação
	Jato d'água	Menor índice de turbulência e ruído
Navegação	IMU + DVL	Sistema de simples operação e de baixo custo
	Sonar de varredura lateral	Ampla faixa de visualização
Inspeção	Sensores óticos	Imagens de alta resolução
Controle	PID	Sistema de fácil aplicação
	Fuzzy	Maior eficiência para missões mais complexas
Energia	Íons de lítio	Longa vida útil e ocupa pouco espaço
	Polímero de lítio	Maior densidade energética, longa vida útil e formato compacto

Fonte: Autor, 2022.

4 ESTUDO DE CASO

O Objetivo deste trabalho não é realizar o projeto de um AUV, mas identificar as características necessárias para um, na inspeção de estruturas em águas rasas. Usaremos o artigo de PYO (2015), sobre o AUV *Cyclops*, Figura 26, pois se trata de um AUV, dentro das características principais julgadas adequadas, conforme abordado no capítulo anterior, analisando o mesmo, de acordo com as características de inspeção para águas rasas e sendo propostas algumas possíveis melhorias para o seu uso em inspeção para manutenção.

Figura 26 – AUV *Cyclops*.



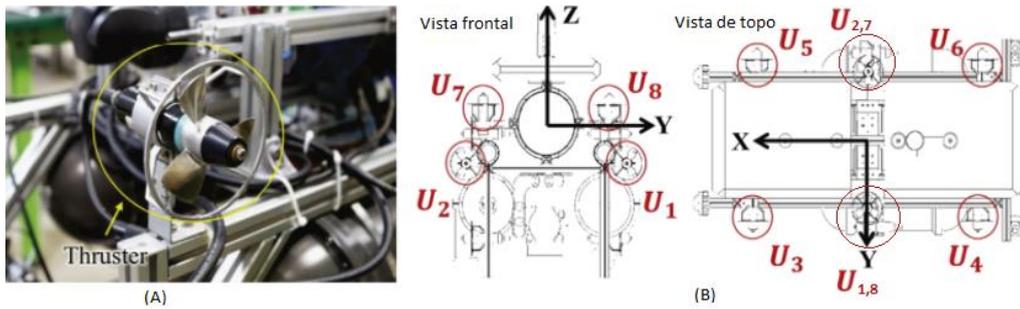
Fonte: PYO et al., 2015.

O *Cyclops* é um veículo submerso autônomo com capacidade de flutuar possuindo um casco simétrico de estrutura aberta que foi desenvolvido para a detecção e varredura do solo marinho em águas rasas, possuindo uma trajetória de navegação retilínea uniforme até a extremidade e sem seguida deslocando-se paralelamente para realizar outra trajetória retilínea, mas no sentido contrário ao anterior, similar ao movimento de um cortador de grama.

Em sua estrutura ele possui dois cilindros (na parte inferior do AUV) que comportam suas baterias, um cilindro central com os computadores de bordo e, na parte superior da estrutura, uma folha de flutuabilidade.

Esta navegação é caracterizada por possuir trajetória uniforme de ir para frente e para trás, sem alterar o ângulo de direção durante a missão. Sua navegação e posicionamento são controlados a partir de um sistema controlador PID e sua alimentação energética é fornecida por um par de baterias de polímero de lítio.

Figura 27 – Propulsores usados no AUV *Cyclops* e sua configuração.



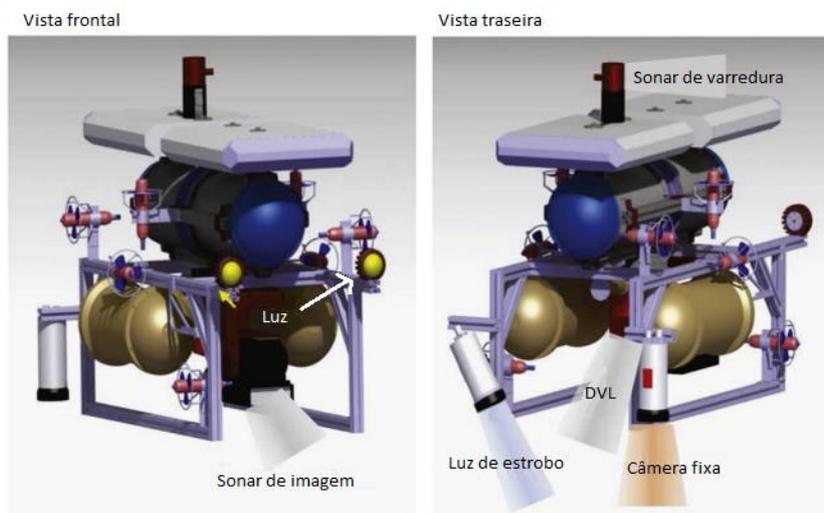
Adaptado de: PYO et al., 2015.

Como mostrado na Figura 27, o sistema propulsivo é composto por 8 propulsores idênticos de baixa potência, onde os propulsores 1 e 2 são utilizados para o movimento de avanço, 3, 4, 5, 6 são para deriva e 7 e 8 são para afundamento, possibilitando uma velocidade máxima de 2 nós. O movimento de deriva possui mais propulsores uma vez que a força de arrasto é maior nessa direção.

Seu sistema de navegação é realizado pelo sistema inercial IMU para regular sua profundidade e DVL para controlar sua posição e velocidade. Para a inspeção subaquática, foram utilizados sensores de imagem óticas, realizando o procedimento de mosaico de imagens para formar uma imagem de alta resolução de uma área mais ampla.

O motivo pelo qual houve a necessidade de usar o método de mosaico de imagens foi pelo curto alcance que os sensores óticos possuem devido à atenuação e a retrodifusão da luz visível na água. Também há a utilização de um sonar de varredura lateral para escanear os arredores do ambiente subaquático. A configuração dos sensores utilizados no AUV *Cyclops* é mostrada na Figura 28.

Figura 28 – Configuração dos sensores usados no AUV *Cyclops*.



Adaptado de: PYO et al., 2015.

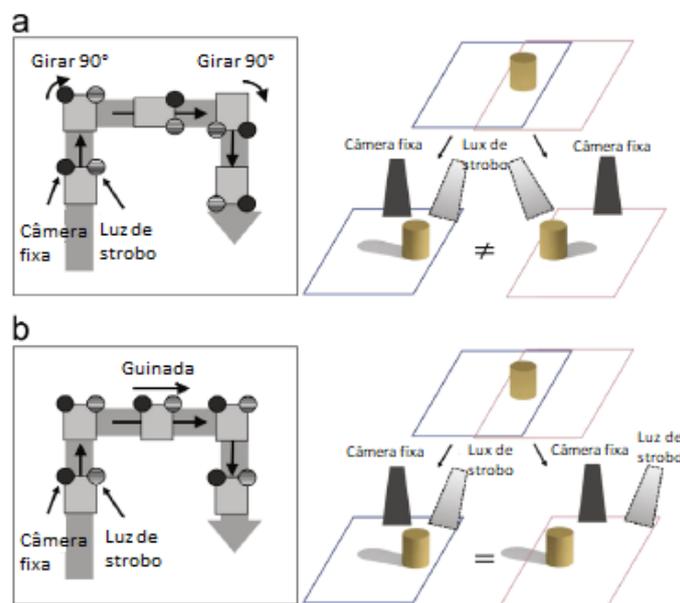
Em suas missões o AUV *Cyclops* necessita obter as imagens homogêneas e sem distorção de perspectiva. Para atingir esses requisitos, o AUV não pode alterar o seu ângulo de direção (ângulo do movimento de guinada) durante a missão.

Para realizar a trajetória de varredura similar a um cortador de grama, os autores realizaram um estudo para duas configurações de navegação. Na primeira, o *Cyclops* gira seu ângulo de proa em 90° e em seguida rotaciona novamente 90° para continuar a operação (Figura 29 (a)).

Entretanto, pela montagem da câmera e da luz estroboscópica nos lados direito e esquerdo, respectivamente, a mudança do ângulo de direção de 180° causa uma rotação na imagem original. Para corrigir essa rotação, o algoritmo necessita girar as imagens em direções opostas antes de juntá-las às imagens correspondentes na linha anterior. Porém, mesmo com este artifício implementado no algoritmo, as direções das sombras nas imagens serão diferentes, resultante da inversão de posição da luz estroboscópica, podendo causar erros e distorções na montagem do mosaico de imagens.

Na segunda configuração, quando o AUV atinge o último ponto da respectiva linha, ele move de posição sem alterar o ângulo de direção (Figura 29 (b)), fazendo com que não haja rotação de imagem e, portanto, também não haja diferença entre as sombras.

Figura 29 – Métodos de navegação com e sem mudança de direção. (a) Rastreamento de caminho com mudança de direção, (b) Rastreamento de caminho sem mudança de direção.



Adaptado de: PYO et al., 2015.

A câmera não se localiza no centro se dá em detrimento que esse é o local do sensor de navegação DVL, para que este seja tratado como o centro de referência para o posicionamento do AUV.

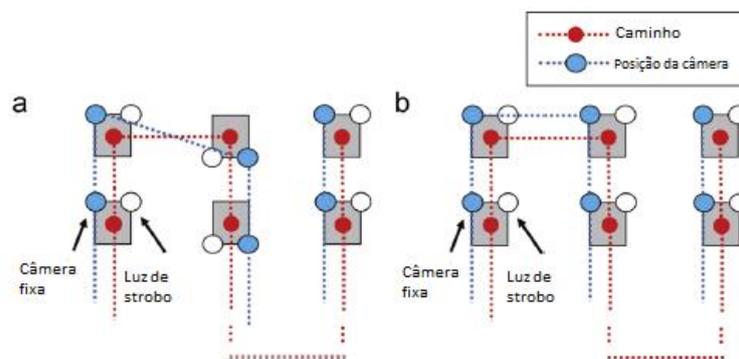
Em virtude dessa descentralização da câmera, quando o *Cyclops* muda de linha de trajetória alterando sua direção, a posição relativa da câmera em relação ao caminho sofre variações nessas mudanças de linhas (Figura 30 (a)), aumentando a complexidade da operação.

Em contraste, quando não há a mudança de direção, as posições relativas são idênticas para todos os pontos da trajetória, simplificando a operação do AUV (Figura 30 (b)).

Outra necessidade para sua operação é a fixação dos ângulos de joga e de arfagem, uma vez que a movimentação nesses sentidos pode causar distorções de perspectiva. Todavia, O *Cyclops* possui boa estabilidade para esses movimentos devido à folha de flutuação na parte superior do AUV e o compartimento das baterias na sua parte inferior.

As análises experimentais que os autores realizaram foram feitas em um tanque de água interno (Figura 31), no qual a missão do *Cyclops* foi de realizar a criação de um mosaico de imagens da bandeira localizada no fundo do tanque seguindo a trajetória, estilo cortador de grama, prevista.

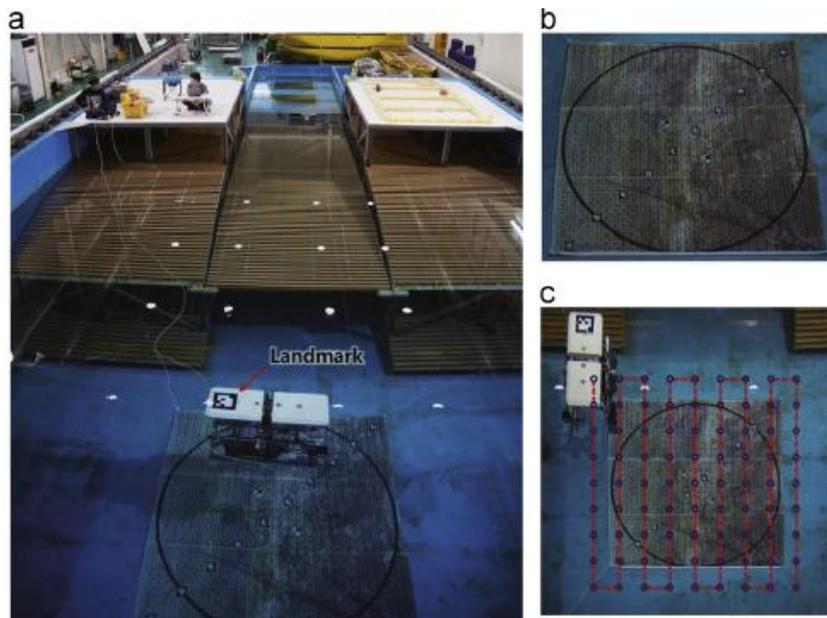
Figura 30 – Posição relativa entre a câmera e o caminho durante a navegação; (a) com mudança de direção de rumo, (b) sem mudança de direção de rumo.



Adaptado de: PYO et al., 2015.

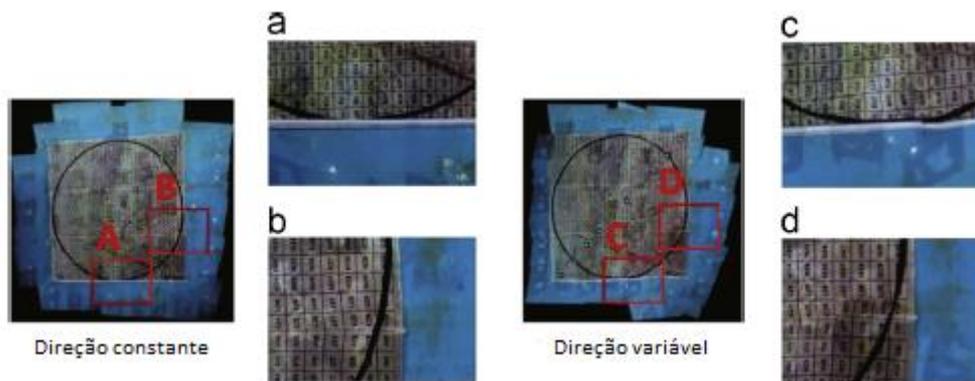
A Figura 32 apresenta os resultados para as duas configurações de navegação, onde é possível notar que na criação do mosaico de imagens, a navegação com direção variável obteve duas inconformidades de junção, enquanto na direção constante não houve esse tipo de erro.

Figura 31 – Configuração do experimento para mosaico de imagens. (a) Ambiente de experimento de mosaico de imagens, (b) Bandeira projetada e impressa, (c) Trajetória do estilo cortador de grama.



Fonte: PYO et al., 2015.

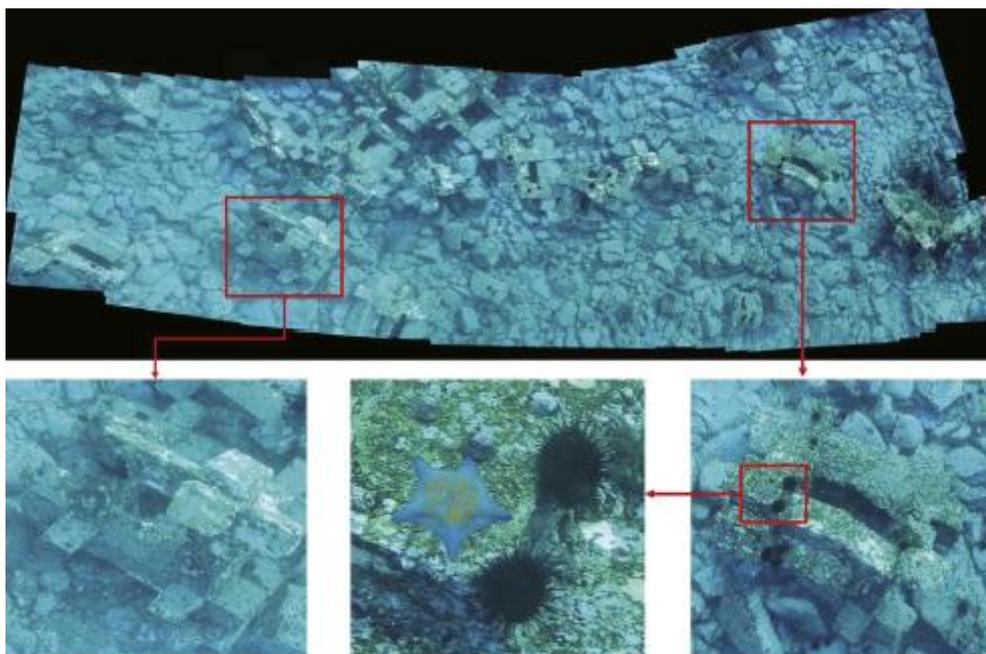
Figura 32 – Resultados do mosaico com imagens ampliadas para verificar a precisão da conectividade.



Adaptado de: PYO et al., 2015.

Por fim, em um teste de mar, o *Cyclops* conseguiu realizar a criação de um mosaico com ótima resolução (Figura 33). Para a construção desse mosaico foi necessário a junção de 253 imagens registradas através da navegação com direção constante.

Figura 33 – Resultados de mosaico de imagens de testes no mar.



Fonte: PYO et al., 2015.

4.1 Análise crítica

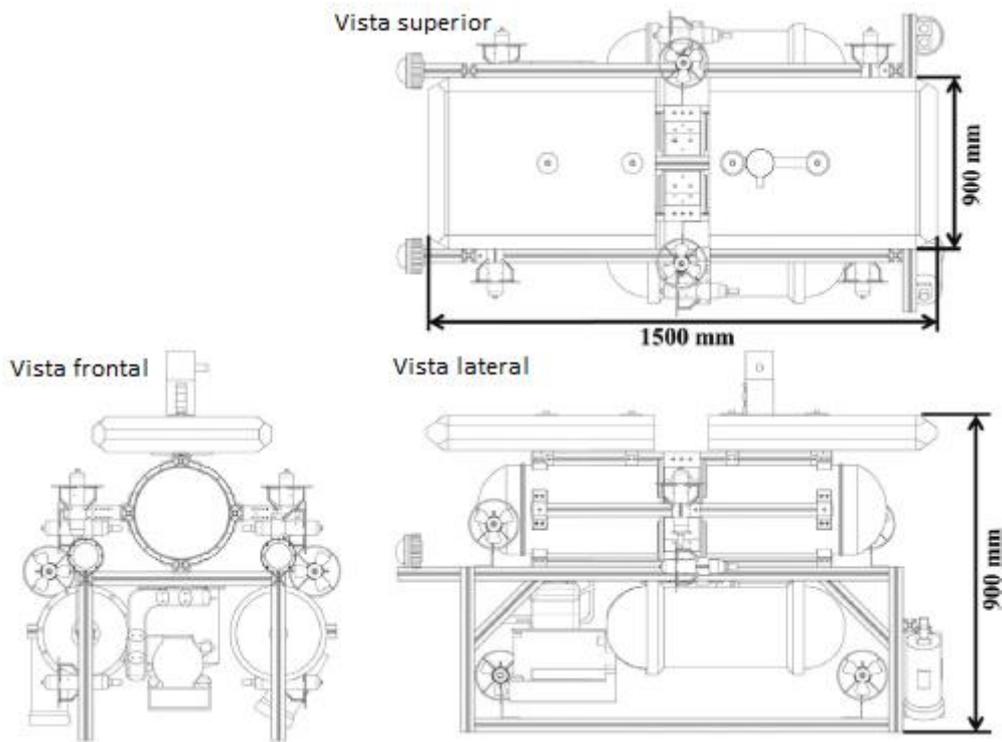
Os componentes do AUV *Cyclops* estão todos em concordância com a seleção realizada na seção 3.2. A forma geométrica aberta do casco fornece a ele uma ótima sustentação para que ele possa flutuar sem ocorrerem erros de captura de imagens resultantes de turbulências ou vibrações. Esta estabilidade é resultante dele possuir um layout de dimensões semelhantes, (comprimento de 1500 mm, largura de 900 mm e altura de 900 mm) onde nenhum dos lados é duas vezes maior que outra seção (Figura 34).

Esta semelhança permite que o sistema propulsivo trabalhe com maior precisão, sem necessidade de maiores potências para um determinado eixo. Para uma maior estabilidade no movimento de deriva, uma possível solução, além da implementação de mais propulsores, seria aumentar a largura do AUV, de forma que fique semelhante ao seu comprimento.

O sistema propulsivo definido pelo conjunto de 8 pequenos propulsores de hélices de baixa potência (Figura 27) conseguem fornecer o posicionamento dinâmico para o AUV realizar sua missão de inspeção em águas rasas.

Este posicionamento dinâmico é fundamental para que as imagens capturadas, ou os dados de pesquisa, possam ser obtidos com maior precisão, uma vez que em movimento, é mais provável que existam distorções nos resultados.

Figura 34 – Layout do AUV *Cyclops*.



Adaptado de: PYO et al., 2015.

Outro acréscimo positivo ao sistema propulsivo foi a implementação de mais dois propulsores na longitudinal do AUV, esse reforço foi necessário devido a essa ser a maior dimensão lateral do *Cyclops*, necessitando de mais força propulsiva para manter o equilíbrio do veículo submerso. A escolha por propulsores idênticos também facilita a configuração do sistema de controle, uma vez que não há diferença de requisitos para acionamento dos mesmos. A substituição da propulsão por hélices para jato d'água seria necessária apenas para evitar distúrbios ao ambiente submarino, porém, como este AUV será utilizado para inspeção para manutenção de estruturas oceânicas, não é fundamental obter essa característica.

O sistema de navegação composto pelo conjunto IMU + DVL é suficiente para realizar o controle da velocidade de locomoção e também garantir a altura necessária para a missão. Entretanto, esse sistema é recomendado apenas para locais onde o fundo do mar esteja próximo à profundidade do AUV, como é no caso de portos, mas em profundidades mais elevadas, como na inspeção de estruturas offshore, este sistema pode apresentar inconsistências na precisão do posicionamento da altitude do AUV, devido à baixa eficiência do sistema IMU para determinar com precisão a profundidade do veículo submerso em águas profundas.

Para solucionar esse problema, é recomendado a utilização de sensores acústicos, baseando-se em transponders situados nas plataformas. Neste novo sistema, o mais eficiente é

o SBL, pois ele utiliza de dois receptores de ondas acústicas, localizados em um único corpo flutuante, e entrega alta precisão no posicionamento do AUV. O sistema LBL também possui alta precisão, mas ele necessita de mais de um corpo flutuante para servir de base para o transponder, o que pode vir a ser um inconveniente para inspecionar plataformas offshore.

A utilização de sensores óticos para a captação de imagens para a construção de um mosaico, atualmente, é o melhor sistema para realizar inspeções tanto em solo submarino quanto em estruturas oceânicas, devido a sua alta resolução, obtida através de um dos três métodos de restaurações de qualidade de imagem.

Ainda que as inspeções eletromagnéticas possam fornecer dados mais valiosos na identificação de falhas ou rupturas nas estruturas navais, esta tecnologia ainda está em desenvolvimento, portanto não possui comprovação de sua eficiência.

O sonar de varredura lateral não oferece ajuda na captação de imagens, mas auxilia na localização do AUV, uma vez que ele fornece a distância entre ele e uma estrutura próxima, fazendo com que a inteligência artificial altere a trajetória para evitar colisões. Este sonar é o mais simples, porém bastante efetivo para a identificação da topologia em volta do AUV.

A impossibilidade de colocar a câmera no centro do AUV, devido que neste local está situado o sensor DVL, acarreta uma dificuldade adicional ao veículo submerso, uma vez que ele não pode rotacionar ao longo do seu eixo sem que existam distorções nas imagens, resultante da inversão do posicionamento da sombra do objeto, como mostrado na Figura 29.

Todavia, existem duas principais possibilidades de solucionar esse problema. A primeira forma, e mais direta, seria aumentar a altura do AUV para que seja possível posicionar os sensores óticos centralizados embaixo no DVL, mas essa solução acarretaria um aumento significativo do volume do AUV, podendo dificultar seu sistema propulsivo.

A segunda forma, mais complexa, porém mais eficiente, trata de deslocar o sensor DVL para uma das extremidades laterais do casco para que o centro fique livre para o sensor ótico. Este procedimento é mais complexo porque necessita que haja uma correção do centro de referência do AUV, no qual sua linha de centro deve ser deslocada de valor igual ao deslocamento lateral do DVL.

Quanto a inspeção de cascos de navios e estruturas offshore, a solução para a implementação dos sensores óticos é mais simples, visto que o AUV não precisa realizar rotações ao longo do eixo para inspecionar a próxima linha, utilizando o sistema de varredura estilo cortador de grama. Dessa forma, os sensores óticos podem se localizar fora da linha de centro do *Cyclops* sem que resulte em distorções de imagens.

No sistema de controle os autores optaram pelo PID, uma vez que este é o mais simples de operar e de fácil aplicação. Como o objetivo inicial do *Cyclops* é apenas de captar imagens do solo oceânico, esta aplicação por possuir baixa complexidade computacional e o PID pode fornecer todo o controle necessário.

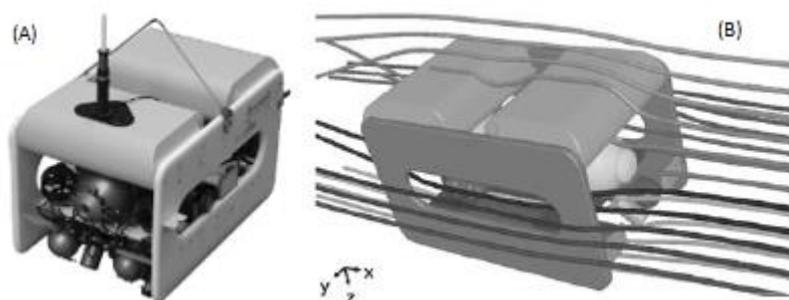
Entretanto, para a adição de inspeção para manutenção de estruturas oceânicas, é possível que a complexidade computacional se eleve. Portanto, é recomendado que seja utilizado o sistema de controle *fuzzy*, ou o conjunto *fuzzy* + PID. Essa é uma solução que garante mais segurança do funcionamento do AUV ao longo dessa nova missão.

Para finalizar os sistemas do *Cyclops*, Pyo et al. (2015) utilizaram um par de baterias a base de polímero de lítio. Esta bateria é a mais recomendada para a operação em águas rasas devido a quantidade elevada de ciclos de vida útil e também por ser a que possui maior densidade energética dentre as baterias que possuem cerca de 500 ciclos de vida útil. Dessa forma é possível utilizar menos volume para alocação das baterias na sua estrutura, assim como possuir maiores intervalos de duração entre seus recarregamentos.

Da parte hidrodinâmica, os autores não realizaram simulações para identificar os coeficientes hidrodinâmicos do AUV. Um dos principais fatores que afetam os coeficientes é a forma do veículo submerso. Na realização desses estudos, normalmente, usam-se sistemas CFD (dinâmica de fluidos computacional) para estimar os coeficientes hidrodinâmicos em AUV's.

Um exemplo desse estudo foi realizado por Tang et al. (2009), no qual eles estimaram os coeficientes de um AUV de casco aberto, similar ao *Cyclops* (Figura 35).

Figura 35 – Fotografia do AUV TUNA-SAND.



Adaptado de: TANG et al., 2009.

No processo de identificação dos coeficientes hidrodinâmicos, Tang et al. (2009) dividiram-no em três etapas: derivação das equações matemáticas do movimento do veículo, determinação dos coeficientes hidrodinâmicos e a solução computacional do sistema de equações.

Além da falta das estimativas dos coeficientes hidrodinâmicos resultantes da forma geométrica, os autores não consideraram as variações dos coeficientes para incidências de ondas, as interações com o fundo do mar ou o efeito de parede. Esses coeficientes afetam diretamente no desempenho dinâmico do AUV, sendo importante possuir seus valores para simular com precisão o desempenho dinâmico do AUV.

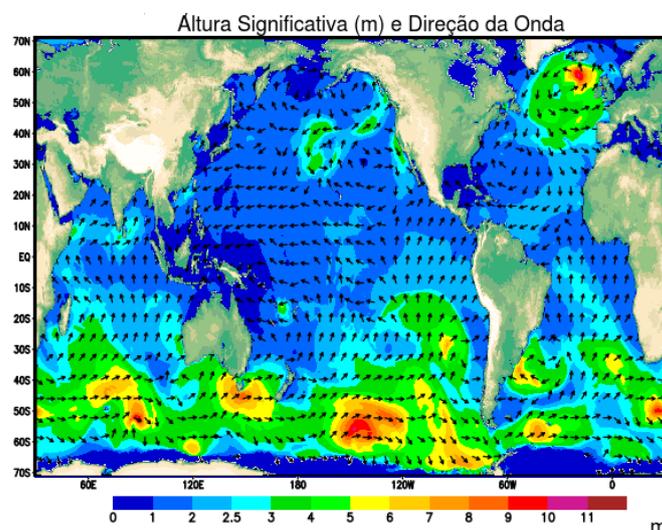
Embora tenha sido realizado o teste de mar e a qualidade das imagens obtidas foram altas, ainda é necessário avaliar como o AUV se comportaria caso houvessem ondas com maiores amplitudes.

Nota-se que, pelo fato de o *Cyclops* ser destinado a pesquisas no solo submarino, ele trabalha com uma certa distância da linha d'água, o que pode ser um fator para não sofrer interferências oriundas das amplitudes das ondas de superfície. Todavia, em uma adaptação deste AUV para realizar inspeções e manutenções em cascos de navios ou plataformas offshore, sua navegação estaria mais próxima à superfície.

Portanto, é essencial uma análise de mar para identificar as amplitudes médias de ondas da região e realizar análises em CFD com o intuito de identificar as oscilações dos coeficientes hidrodinâmicos, como na Figura 18. Para a identificação da altura significativa de onda, é possível utilizar o site www.cptec.inpe.br em sua seção de previsão oceânica, como exemplificado na Figura 36.

Com relação ao efeito de parede, em mar aberto, eles podem possuir pouca ou nenhuma interferência no *Cyclops*, mas para uma operação próxima a um navio, que é uma estrutura de dimensões muito maiores que o AUV, é possível que existam interferências de navegação. Portanto, também é necessário avaliar esse fenômeno através de análises em CFD.

Figura 36 – Exemplo de previsão da altura significativa das ondas.



Fonte: CPTEC/INPE, 2022.

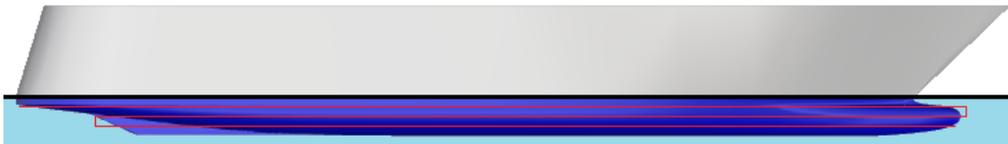
Além da necessidade de realizar as análises computacionais para identificar a real performance do AUV e seu comportamento perante fenômenos de *seakeeping*, para que o *Cyclops* possa realizar tarefas de inspeção para manutenção, são necessárias adaptações no seu sistema de inspeção.

A sua forma geométrica e a escolha das baterias assim como o sistema de navegação, e propulsão são totalmente úteis para esse incremento, havendo necessidade de alteração apenas no sistema de controle, caso o sistema PID não seja suficiente para a nova condição de uso.

Entretanto, os sensores de imagens do AUV estão fixos apontando para o fundo do mar. Para a inspeção de estruturas navais, é necessário que ele ou possua a possibilidade de rotacionar no plano vertical, ou adicionar outro conjunto de sensores para esta função. A opção de rotacionar no plano vertical é mais econômica, uma vez que não precisa da aquisição de outro conjunto de sensores.

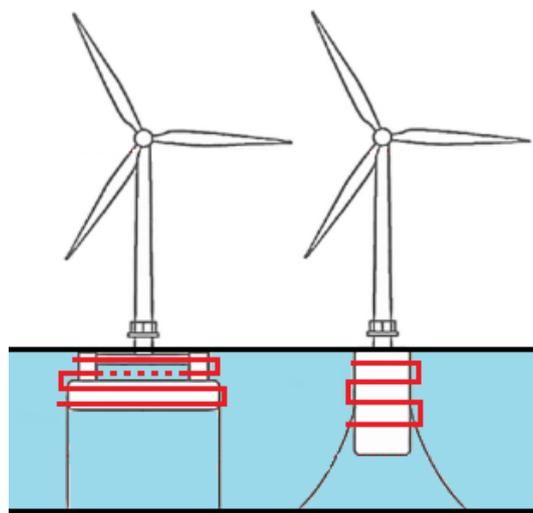
Desta forma, o *Cyclops* poderia adaptar sua navegação padrão cortador de grama para a vertical, onde seria realizada uma varredura do casco do navio e de uma estrutura offshore de forma semelhante à varredura de solo que o AUV fez no fundo do mar, conforme podem ser vistos nas Figuras 37 e 38.

Figura 37 – Em vermelho, exemplo de trajetória vertical no estilo cortador de grama em um casco de navio.



Fonte: Autor, 2022.

Figura 38 – Em vermelho, exemplo de trajetória vertical no estilo cortador de grama para plataformas eólicas offshore.



Adaptado de: LI et al., 2022.

4.2 Proposta de um AUV para inspeção em Águas Rasas

Após reunidas as informações das necessidades de criação e operação de um AUV, aqui será sugerido um projeto conceitual de um AUV para águas rasas, no qual foi levado em consideração toda a revisão de literatura, assim como a análise do AUV *Cyclops*.

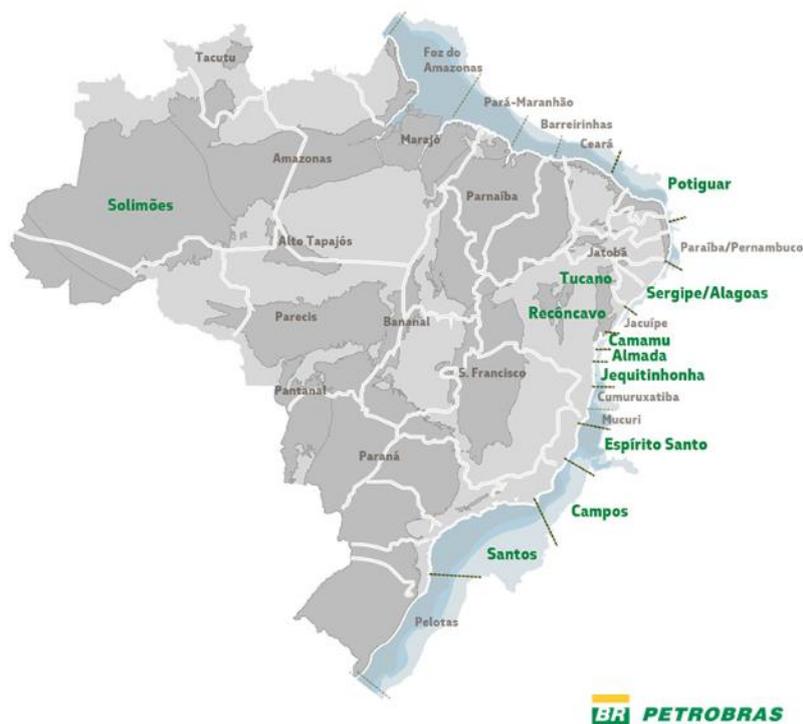
Em primeiro lugar será escolhido uma área de operação específica para que sejam definidos os sistemas de navegação, inspeção, controle e energia. Em seguida será proposto um casco que comporte todos os equipamentos e, por fim, será determinado o sistema propulsivo do AUV.

Dentre as possíveis áreas de atuação, as mais promissoras para a região brasileira são as de inspeção para manutenção em cascos de navios e plataformas offshore devido aos estaleiros e as plataformas de extração de petróleo que o país possui, respectivamente.

Como na região de Pernambuco não há forte atuação na extração de petróleo pela Petrobrás, devido à falta de bacias produtoras (Figura 39), este setor de operação para o AUV não será escolhido.

Entretanto, no porto de Suape, no município de Ipojuca estão localizados dois grandes estaleiros: Estaleiro Atlântico Sul e VARD Promar. Portanto, este AUV será desenvolvido com o intuito de atender às inspeções e manutenções em cascos de navios em regiões portuárias.

Figura 39 – Em verde, bacias produtoras marítimas e terrestres.



Fonte: PETROBRAS, 2022.

Após a definição da área de atuação, é necessário definir os sistemas que estarão localizados dentro do casco do AUV. Este passo é fundamental para poder definir as dimensões principais do veículo submerso. Iniciando pela escolha do sistema de inspeção, foi visto na Tabela 5 que os mais recomendados para utilização em águas rasas são os sensores óticos, por conta de sua alta resolução e captação de imagens para curtas distâncias entre o AUV e o objeto de estudo.

Portanto, para a inspeção visual, será utilizado uma câmera fotográfica subaquática de alta resolução (10 Mega pixels) posicionada na região frontal do AUV, com capacidade de rotacionar para que seja possível capturar imagens das regiões complexas do navio (e.g. região do bojo e do propulsor).

Ainda para o conjunto de inspeção, também é necessário ter luz suficiente para garantir alta qualidade na captação das imagens, para isso serão necessárias duas luzes estroboscópicas posicionadas em simetria com a câmera centralizada entre elas. Esta centralização da câmera e as luzes localizadas em extremidades espelhadas é necessário para evitar que hajam problemas devidos à localização da sombra resultante da utilização de uma fonte de luz, como no caso do AUV *Cyclops*.

Finalizado o sistema de inspeção, será necessário definir o sistema de navegação. Para isso, é necessário garantir que o AUV não irá colidir com o navio, nem com as estruturas portuárias, além de realizar a trajetória de inspeção predeterminada para a missão. Como forma de evitar a colisão, será utilizado um sonar de varredura lateral (675 kHz – 1 MHz), posicionado na parte superior do casco do AUV, de forma similar ao *Cyclops*.

Embora esse sonar possua pouca aplicação para inspeção, ele é um dos melhores sistemas para posicionamento de veículos submersos, pois ele identifica com muita facilidade a distância relativa entre o AUV e o ecossistema ao redor do mesmo.

Já para a realização da trajetória de estudo, será utilizado o conjunto IMU + DVL. O IMU é muito utilizado para estimar o posicionamento vertical dos veículos submersos, já o DVL é amplamente utilizado para determinar a velocidade necessária ao AUV.

Geralmente, existem outras melhores soluções para a estimativa de profundidade do AUV, visto que o IMU apresenta maiores índices de erros quando utilizado em grandes profundidades, entretanto, como as regiões portuárias possuem calado baixo, este sistema de posicionamento, para estas condições, não apresenta riscos operacionais significativos.

Para o sistema de controle, será utilizado o sistema PID, uma vez que não há alta complexidade na movimentação do AUV, visto que ele realizará uma movimentação sistemática similar à movimentação do *Cyclops*.

Para esse sistema de controle, espera-se pode usar o mesmo sistema computacional do *Cyclops*, sendo ele 2 computadores PC – 104 (*Intel Atom* funcionando a 1,66 GHz). Por fim, como os equipamentos são similares e de igual quantidade aos utilizados no *Cyclops*, duas baterias de polímero de lítio 24 V/1,2 Kwh serão suficientes para garantir a energia necessária para a realização da missão com segurança.

Definidos os equipamentos internos ao AUV, será necessário determinar o formato do casco de forma que seja possível comportar os mesmos. Diferentemente do AUV *Cyclops*, este casco possuirá sua geometria fechada, uma vez que simplifica a hidrodinâmica do veículo submerso.

Todavia, ainda será mantido uma geometria paralelepípedica, porém com dimensões menores, possuindo um formato mais compacto. O critério envolvendo esta escolha foi pelo fato de o AUV em desenvolvimento não atuar em profundidades maiores que 20 metros, uma vez que o calado do porto de Suape é de até 20 metros de profundidade (SUAPE, 2020).

Dessa forma, não há muita demanda de controle por pressão de coluna d'água. Como comparação, o AUV *Cyclops* possui profundidade máxima de operação de 100 metros (PYO et al., 2015), trazendo uma pressão hidrostática até 5 vezes maior que o AUV proposto. Desta forma, é possível encontrar mais similaridades de dimensões no AUV desenvolvido por Vaganay et al. (2006) (Figura 25). Portanto, as dimensões de 100 cm de comprimento, 75 cm de largura e 40 cm de altura devem ser suficientes para o desenvolvimento de um modelo preliminar deste AUV.

Para o sistema propulsivo serão necessários 8 propulsores idênticos bidimensionais de baixa potência, similares à configuração dos propulsores na Figura 25. Mesmo este AUV possuindo dimensões menores que o *Cyclops*, ainda é necessário ter potência a mais no movimento de afundamento.

Diferentemente do *Cyclops* que necessitou de mais potência no movimento de deriva, este AUV necessita de mais estabilidade no movimento de afundamento devido à maior influência das ondas nos coeficientes hidrostáticos, resultante da menor profundidade de atuação do AUV.

Finalizado a determinação conceitual da estrutura do AUV é necessário realizar os testes hidrodinâmicos de *seakeeping* para entender como estão ordenadas as forças atuantes no veículo submerso. Desta forma, é fundamental realizar análises em CFD a partir de um esboço em 3D do casco completo do AUV.

Além da análise em CFD dos coeficientes hidrostáticos para a condição de navegação submarina, também é necessário realizar testes para diferentes alturas de ondas e número de

Reynolds, de forma similar a Tian et al. (2019), uma vez que o AUV navegará próximo a superfície e, portanto, a incidência de ondas pode ser um fator de alteração dos coeficientes de arrasto, sustentação e torque, como mostrado nas Figuras 18 a 22. Em conjunto com esse efeito, também há a influência da navegação em águas rasas que, conforme Schlichting (1934), a velocidade de operação do veículo submerso altera a resistência ao atrito incidente (Figura 24), portanto também é necessário a realização desse estudo.

Por fim, também há de ser considerado e analisado o efeito de parede, uma vez que o AUV proposto possui dimensões significativamente menores que o casco do navio e da estrutura portuária. Como mostrado por Leong et al. (2015), o efeito de parede altera a resistência ao avanço, a velocidade e a capacidade de manobras do veículo, criando regiões onde não é viável operar, como mostrado na Figura 23.

Após a realização dos testes mencionados acima e realizadas as integralizações do sistema autônomo interno do AUV, é recomendado a realização de testes em tanque para avaliar o seu funcionamento antes de elaborar o modelo definitivo do AUV para os testes em mar, uma vez que as diferenças entre testes computacionais e reais podem resultar em imprecisões de operação indesejadas no funcionamento do AUV.

Por fim, a Tabela 6 resume todos os componentes julgados necessários para o projeto conceitual de um AUV para sua operação em águas rasas e a Figura 37 mostra um exemplo de uma possível trajetória para a realização da missão deste AUV.

Tabela 6 – Especificações do AUV proposto.

Área de atuação	Inspeção para manutenção de navios no porto de Suape
Dimensões	100 x 75 x 40 cm
Propulsão	8 propulsores bidirecionais
Fonte de energia	2 baterias de polímero de lítio 24 V/1,2 KWh
Sistema de controle	Derivada integral proporcional (PID)
Sistema computacional	2 PC – 104 (<i>Intel Atom</i> funcionando a 1,66 GHz)
Equipamentos	2 luzes estroboscópicas
	1 câmera fotográfica subaquática de alta resolução (10 Mega pixels)
Sensores	1 sonar de varredura lateral (675 kHz – 1 MHz)
	1 unidade de medição inercial (IMU)
	1 registro de velocidade Doppler (DVL)

Fonte: Autor, 2022.

Com a definição dos componentes julgados necessários (Tabela 6), é possível obter uma estimativa de peso e de custo desse AUV. Essas informações são importantes para estudar a viabilidade econômica da operação e também para realizar um planejamento financeiro de um projeto preliminar, tendo como base as mesmas características do AUV proposto.

Como os componentes internos do AUV são bastante similares aos utilizados no *Cyclops*, é possível ter uma aproximação do seu peso comparando-o com o peso do mesmo. A partir desse pressuposto, este AUV não deverá exceder o peso de 210 Kg, uma vez que esse é o peso do *Cyclops* e o mesmo possui maiores dimensões comparadas ao AUV proposto.

Realizando uma busca pelos valores dos dispositivos presentes no AUV proposto, obteve-se a Tabela 7 com o compilado dos orçamentos obtidos. Totalizando um valor estimado de R\$ 121.626,10, para este valor foi utilizada a conversão de moedas datado no dia 15/06/2022, no qual U\$1,00 equivale a R\$5,12. Para a visualização dos componentes vide Anexo A

Tabela 7 – Quadro de custos dos componentes do AUV proposto.

Dispositivo	Quantidade	Valor unitário	Total
Baterias de polímero de lítio	2	R\$ 291,84	R\$ 583,68
Propulsor bidirecional	8	R\$1.024,00	R\$8.192,00
Luz estroboscópica	2	R\$ 3.068,21	R\$6.136,42
Câmera fotográfica subaquática de alta resolução	1	R\$1.428,48	R\$1.428,48
Sonar de varredura lateral	1	R\$12.262,40	R\$12.262,40
Registro de velocidade Doppler	1	R\$ 84.992,00	R\$84.992,00
Computador de bordo	2	R\$4.015,56	R\$8.031,12

Fonte: Autor, 2022.

5 CONCLUSÃO

Os AUV's possuem grandes aplicações para inspeção para manutenção na indústria offshore. Entretanto, esta é uma área de atuação que ainda está em desenvolvimento e não possui soluções sólidas, ainda sendo necessário diversos experimentos para determinar um modelo ideal de AUV para realizar esses tipos de missões.

Este trabalho trouxe uma análise das principais tecnologias que estão sendo aplicadas mundialmente na construção de veículos submersos autônomos, focando nas características mais promissoras para o setor industrial de inspeção para manutenção.

Foi possível perceber que as necessidades de pesquisa em águas rasas diferem principalmente na forma do casco e o sistema propulsivo. Isto se dá, principalmente pela pressão gerada pela coluna d'água e também pela duração das missões, onde as atuações em águas rasas são mais curtas.

As propriedades hidrodinâmicas também se mostraram fundamentais na elaboração de um projeto de AUV, sendo elas o fator determinante para a performance e navegação do veículo.

Portanto, é necessário a realização de experimentos em CFD para obter os coeficientes hidrodinâmicos do AUV. Outro fator que deve ser levado em consideração para o contexto de águas rasas são a incidência de ondas e os efeitos de parede e de fundo do mar.

Também foi possível perceber que as principais dificuldades no projeto de um AUV são sua definição de sistema de inspeção e forma do casco, visto que estes influenciam diretamente na capacidade de concluir a missão e nas propriedades hidrostáticas do veículo submerso.

Outra dificuldade no desenvolvimento de um AUV se dá pelo fato de as informações acerca das suas necessidades não estarem reunidas em uma única fonte, além de não possuir uma análise comparativa entre as mesmas. Tornando a inicialização do projeto preliminar demorada e com grandes possibilidades de escolher sistemas ineficientes ou mais complexos que o necessário.

Portanto, a escolha dos sensores IMU + DVL em conjunto com um sonar de varredura lateral para o sistema de navegação visam simplificar a demanda computacional, fornecida pelo sistema PID, e satisfazer todas as necessidades para a segurança da movimentação do AUV ao longo da missão.

Os equipamentos para a inspeção do casco no navio dados por um par de luzes estroboscópicas e uma câmera de alta resolução são suficientes para a distância de inspeção

entre o AUV e a estrutura da embarcação. As duas baterias de polímero de lítio possuem densidade energética capazes de garantir toda a autonomia necessária da missão.

Para o sistema propulsivo, foi idealizado um arranjo de 8 propulsores de baixa potência idênticos com 4 deles posicionados para suprir a maior demanda do AUV no movimento de afundamento.

Como sugestão para trabalhos futuros, é interessante estudar com maior profundidade métodos de análises em CFD para geometrias de cascos de AUV's não convencionais e considerar a incidência de ondas de superfície e os efeitos de parede e fundo do mar.

Também seria importante estudar sobre mecanismos de inspeção e navegação para os casos em que o objeto de inspeção do AUV está em movimento, além de identificar mais técnicas de mapeamento. Outro ponto importante para esta inspeção é identificar as velocidades máximas que o AUV pode atingir sem perder a qualidade na resolução dos dados.

Por fim, este trabalho pode ser utilizado como base para a criação de projetos preliminares de AUV's, uma vez que apresenta de forma abrangente as necessidades e quais as principais soluções para AUV's de águas rasas e, também, apresenta uma estimativa de valor para um projeto preliminar.

REFERÊNCIAS

ALAM, K.; RAY, T.; ANAVATTI, S. G. **Design and construction of an autonomous underwater vehicle.** *Neurocomputing*, v. 142, p. 16–29, 2014.

ALBIEZ, J. et al. **CSurvey - An autonomous optical inspection head for AUVs.** *Robotics and Autonomous Systems*, v. 67, p. 72–79, 2015.

ALLOTTA, B. et al. **Design of a modular Autonomous Underwater Vehicle for archaeological investigations.** *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2015.

ASHAR, A. U. et al. **Design, kinematic modeling, and implementation of autonomous fish robot for underwater sensing.** *Joint International Conference on Rural Information & Communication Technology and Electric-Vehicle Technology*, 2013.

AUVAC. **Autonomous Underwater Vehicles Database.** Disponível em: <<https://auvac.org/explore-database/>>. Acesso em: 13 jun. 2022.

BI, A. et al. **Combined depth control strategy for low-speed and long-range autonomous underwater vehicles.** *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 8, n. 3, 2020.

BLEIER, M. et al. **SCOUT3D - AN Underwater Laser Scanning System for Mobile Mapping.** *ISPAr*, v. 4218, n. 2/W18, p. 13–18, 2019.

BODENMANN, A.; THORNTON, B.; URA, T. **Generation of High-resolution Three-dimensional Reconstructions of the Seafloor in Color using a Single Camera and Structured Light.** *Journal of Field Robotics*, v. 34, n. 5, p. 833–851, 2017.

BRADLEY, A. M. et al. **Power systems for autonomous underwater vehicles.** *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 26, n. 4, p. 526–538, 2001.

CAMPOS, E. et al. **A nonlinear controller based on saturation functions with variable parameters to stabilize an AUV.** *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, v. 11, n. 1, p. 211–224, 2019.

CARRERAS, M. et al. **Sparus II AUV - A Hovering Vehicle for Seabed Inspection.** *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 43, n. 2, p. 344–355, 2018.

CONG, Y. et al. **Underwater robot sensing technology: A survey.** *Fundamental Research*, v. 1, n. 3, p. 337–345, 2021.

CPTEC/INPE. **Previsão Oceânica.** Disponível em: <<http://ondas.cptec.inpe.br/mapas.php?regiao=global>>. Acesso em: 17 maio. 2022.

FANG, M. C.; CHANG, P. E.; LUO, J. H. **Wave effects on ascending and descending motions of the autonomous underwater vehicle**. Ocean Engineering, v. 33, n. 14–15, p. 1972–1999, 2006.

FITTERY, A. et al. **Omni-Egg: A smooth, spheroidal, appendage free underwater robot capable of 5 DOF motions**. OCEANS MTS/IEEE: Harnessing the Power of the Ocean, 2012.

FOSSSEN, T. I.; FJELLSTAD, O.-E. **Nonlinear modelling of marine vehicles in 6 degrees of freedom**. Mathematical Modelling of Systems, v. 1, n. 1, p. 17–27, 1995.

GU, C.; CONG, Y.; SUN, G. **Three Birds, One Stone: Unified Laser-Based 3-D Reconstruction across Different Media**. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 70, 2021.

GUERNEVE, T.; SUBR, K.; PETILLOT, Y. **Three-dimensional reconstruction of underwater objects using wide-aperture imaging SONAR**. Journal of Field Robotics, v. 35, n. 6, p. 890–905, 2018.

GUPTA, S.; HARE, J.; ZHOU, S. **Cooperative coverage using autonomous underwater vehicles in unknown environments**. OCEANS MTS/IEEE: Harnessing the Power of the Ocean, 2012.

HARDY, T.; BARLOW, G. **Unmanned Underwater Vehicle (UUV) deployment and retrieval considerations for submarines**. International Naval Engineering Conference and Exhibition, 2008.

HARVALD, S. **Resistance and Propulsion of Ships**. United States: Jhon Wiley & Sons. Inc., 1983.

HENDERSON, E.; PANTELAKIS, T.; AN, E. **Energy systems for FAU AUVs [autonomous underwater vehicles]**. IEEE Journal of Oceanic Engineering, p. 5–10, 2003.

HOLLINGER, G. A. et al. **Active planning for underwater inspection and the benefit of adaptivity**. International Journal of Robotics Research, v. 32, n. 1, p. 3–18, 2013.

HOVER, F. S. et al. **Advanced perception, navigation and planning for autonomous in-water ship hull inspection**. International Journal of Robotics Research, v. 31, n. 12, p. 1445–1464, 2012.

ISA, K.; RIZAL ARSHAD, M. **Motion simulation for propeller-driven USM underwater glider with controllable wings and rudder**. International Conference on Instrumentation Control and Automation, p. 316–321, 2011.

JAGADEESH, P.; MURALI, K.; IDICHANDY, V. G. **Experimental investigation of hydrodynamic force coefficients over AUV hull form**. Ocean Engineering, v. 36, n. 1, p. 113–118, 2009.

JUN, B. H. et al. **Development of seabed walking robot CR200**. OCEANS MTS/IEEE Bergen: The Challenges of the Northern Dimension, 2013.

KATO, N. et al. **Control performance of autonomous underwater vehicle “AQUA EXPLORER 1000” for inspection of underwater cables**. IEEE Journal of Oceanic Engineering, p. I/135-I/140, 2002.

KAUR, A.; CORSAR, M.; MA, B. **Application of fieldbus technology to enable enhanced actuator control of automated inspection for offshore structures**. Applied System Innovation, v. 2, n. 3, p. 1–10, 2019.

KELASIDI, E. et al. **Experimental investigation of efficient locomotion of underwater snake robots for lateral undulation and eel-like motion patterns**. Robotics and Biomimetics, v. 2, n. 1, 2015.

KIM, H. J.; LEE, J. **Designing diving beetle inspired underwater robot(D.BeeBot)**. International Conference on Control Automation Robotics and Vision, p. 1746–1751, 2014.

LEONG, Z. Q. et al. **Quasi-static analysis of the hydrodynamic interaction effects on an autonomous underwater vehicle operating in proximity to a moving submarine**. Ocean Engineering, v. 106, p. 175–188, 2015.

LI, C. et al. **An Underwater Image Enhancement Benchmark Dataset and beyond**. IEEE Transactions on Image Processing, v. 29, p. 4376–4389, 2020.

LI, H.; HUANG, C.-G.; GUEDES SOARES, C. **A real-time inspection and opportunistic maintenance strategies for floating offshore wind turbines**. Ocean Engineering, v. 256, p. 111433, 2022.

LI, J. H. et al. **Development of an intelligent autonomous underwater vehicle, P-SURO**. OCEANS IEEE Sydney, 2010.

LI, J. H.; LEE, P. M. **A neural network adaptive controller design for free-pitch-angle diving behavior of an autonomous underwater vehicle**. Robotics and Autonomous Systems, v. 52, n. 2–3, p. 132–147, 2005.

LI, Y.; GUO, S.; WANG, Y. **Design and characteristics evaluation of a novel spherical underwater robot**. Robotics and Autonomous Systems, v. 94, p. 61–74, 2017.

LICHT, S. et al. **Design and projected performance of a flapping foil AUV**. IEEE Journal of Oceanic Engineering, v. 29, n. 3, p. 786–794, jul. 2004.

LIU, G. et al. **A Review of Artificial Lateral Line in Sensor Fabrication and Bionic Applications for Robot Fish**. Applied Bionics and Biomechanics, v. 2016, 2016.

MAKI, T.; URA, T.; SAKAMAKI, T. **AUV navigation around jacket structures II: Map based path-planning and guidance**. Journal of Marine Science and Technology (Japan), v. 17, n. 4, p. 523–531, 2012.

MAYER, L. et al. **The Nippon Foundation-GEBCO seabed 2030 project: The quest to see the world's oceans completely mapped by 2030**. Geosciences (Switzerland), v. 8, n. 2, 2018.

NEMATOLLAHI, A.; DADVAND, A.; DAWOODIAN, M. **An axisymmetric underwater vehicle-free surface interaction: A numerical study**. Ocean Engineering, v. 96, p. 205–214, 2015.

PALOMER, A.; RIDAO, P.; RIBAS, D. **Inspection of an underwater structure using point-cloud SLAM with an AUV and a laser scanner**. Journal of Field Robotics, v. 36, n. 8, p. 1333–1344, 2019.

PAULL, L. et al. **AUV navigation and localization: A review**. IEEE Journal of Oceanic Engineering, v. 39, n. 1, p. 131–149, 2014.

PETROBRAS. **Bacias Petrobras**. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/bacias/>>. Acesso em: 29 maio. 2022.

PYO, J. et al. **Development of hovering type AUV “cyclops” and its performance evaluation using image mosaicing**. Ocean Engineering, v. 109, p. 517–530, 2015.

RANDENI, P. S. A. T. et al. **Numerical investigation of the hydrodynamic interaction between two underwater bodies in relative motion**. Applied Ocean Research, v. 51, p. 14–24, 2015.

SAHOO, A.; DWIVEDY, S. K.; ROBI, P. S. **Advancements in the field of autonomous underwater vehicle**. Ocean Engineering, v. 181, p. 145–160, 2019.

SALUMAE, T.; CHEMORI, A.; KRUUSMAA, M. **Motion Control of a Hovering Biomimetic Four-Fin Underwater Robot**. IEEE Journal of Oceanic Engineering, v. 44, n. 1, p. 54–71, 2019.

SCHLICHTING, O. **Ship resistance in water of limited depth-resistance of sea-going vessels in shallow water**. Jahrbuch der STG, v. 35, p. 127–148, 1934.

SEGOVIA RAMÍREZ, I. et al. **Autonomous underwater vehicles and field of view in underwater operations**. Journal of Marine Science and Engineering, v. 9, n. 3, p. 1–16, 2021.

STUTTERS, L. et al. **Navigation technologies for autonomous underwater vehicles**. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews, v. 38, n. 4, p. 581–589, 2008.

SUAPE. Suape: **Guia Portuário**. Disponível em: <<https://www.suape.pe.gov.br/pt/porto/infraestrutura-portuaria/guia-portuario>>. Acesso em: 29 maio. 2022.

SUN, Y. S. et al. **Thruster fault diagnosis method based on Gaussian particle filter for autonomous underwater vehicles**. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, v. 8, n. 3, p. 243–251, 2016.

TANG, S. et al. **Estimation of the hydrodynamic coefficients of the complex-shaped autonomous underwater vehicle TUNA-SAND**. Journal of Marine Science and Technology, v. 14, n. 3, p. 373–386, 2009.

TIAN, W.; SONG, B.; DING, H. **Numerical research on the influence of surface waves on the hydrodynamic performance of an AUV**. Ocean Engineering, v. 183, p. 40–56, 2019.

VAGANAY, J. et al. **Ship hull inspection with the HAUV: US Navy and NATO demonstrations results**. OCEANS 2006. Anais...2006.

VO, T. Q.; KIM, H. S.; LEE, B. R. **A study on turning motion control of a 3-joint fish robot using sliding mode based controllers**. ICCAS 2010 - International Conference on Control, Automation and Systems, p. 1556–1561, 2010.

WIRTH, S.; CARRASCO, P. L. N.; CODINA, G. O. **Visual odometry for autonomous underwater vehicles**. OCEANS 2013 MTS/IEEE Bergen: The Challenges of the Northern Dimension, 2013.

YU, J.; WANG, C.; XIE, G. **Coordination of Multiple Robotic Fish with Applications to Underwater Robot Competition**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 63, n. 2, p. 1280–1288, 2016.

YU, P.; CHENG, J.; ZHANG, J. **Ship Target Tracking Using Underwater Electric Field**. Progress In Electromagnetics Research M, v. 86, p. 49–57, 2019.

YUH, J. **Design and control of autonomous underwater robots: A survey**. Autonomous Robots, v. 8, n. 1, p. 7–24, 2000.

ZHAO, W. et al. **Development of a flipper propelled turtle-like underwater robot and its CPG-based control algorithm**. Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, p. 5226–5231, 2008.

ZHAO, X. et al. **Improving the performance of an AUV hovering system by introducing low-cost flow rate control into water hydraulic variable ballast system.** *Ocean Engineering*, v. 125, p. 155–169, 2016.

ZHOU, C. et al. **Backward swimming gaits for a carangiform robotic fish.** *Neural Computing and Applications*, v. 23, n. 7–8, p. 2015–2021, 2013.

ANEXO A – Componentes do AUV proposto

Figura 40 – Luz led subaquática para robô 20-28v via AliExpress.



Figura 41 – ExplorerHD 2.0 Underwater ROV/AUV USB Câmera de 10M pixels via DeepWater Exploration.

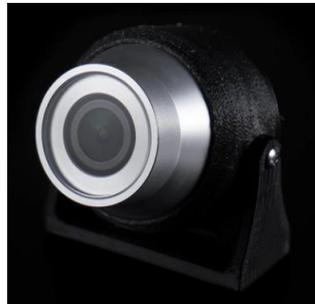


Figura 42 – PCM-3365EW-S3A1E Intel®Atom™ E3825 PC/104-Plus via Advantech Online.



Figura 43 – Propulsor T200 via BlueRobotics.



Figura 44 – DVL A50 via WaterLinked.



Figura 45 – Sonar de Varredura lateral multi-frequência modelo 881^a via Imagenex-.



Figura 46 – Bateria de polímero de lítio 24V via AliExpress.

