

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS - UEA
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA - EST
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

ELIANA BRANDÃO DA SILVA

**CONCEITOS BÁSICOS DE VEÍCULOS SUBAQUÁTICOS NÃO TRIPULADOS E
DESAFIOS DE IMPLEMENTAÇÃO NA REGIÃO AMAZÔNICA**

Manaus– AM

2022

ELIANA BRANDÃO DA SILVA

**CONCEITOS BÁSICOS DE VEÍCULOS SUBAQUÁTICOS NÃO TRIPULADOS E
DESAFIOS DE IMPLEMENTAÇÃO NA REGIÃO AMAZÔNICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Naval da Universidade do Estado do Amazonas como requisito final para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval.

Orientador: Prof. Dr. Jassiel Vladimir Hernández Fontes

Manaus – AM

2022

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.

S586cc Silva, Eliana Brandão da
Conceitos básicos de veículos subaquáticos não tripulados e desafios de implementação na região amazônica / Eliana Brandão da Silva. Manaus : [s.n], 2022.
68 f.: color.; 29 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Naval - Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2022.
Inclui bibliografia
Orientador: Fontes, Jassiel Vladimir Hernández

1. Veículos subaquáticos não tripulados. 2. Exploração submarina. 3. Região Amazônica. 4. Revisão. 5. Desafios. I. Fontes, Jassiel Vladimir Hernández (Orient.). II. Universidade do Estado do Amazonas. III. Conceitos básicos de veículos subaquáticos não tripulados e desafios de implementação na região amazônica

Elaborado por Jeane Macelino Galves - CRB-11/463

ELIANA BRANDÃO DA SILVA

CONCEITOS BÁSICOS DE VEÍCULOS SUBAQUÁTICOS NÃO TRIPULADOS E
DESAFIOS DE IMPLEMENTAÇÃO NA REGIÃO AMAZÔNICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Naval da Universidade do Estado do Amazonas para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval – Escola Superior de Tecnologia – EST, Universidade do Estado do Amazonas – UEA.

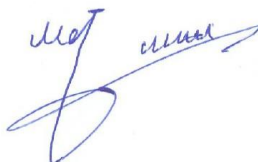
APROVADO EM: 19/05/2022



Prof. Dr. Jassiel Vladimir Hernández Fontes.
Universidade do Estado do Amazonas



Prof. M.Sc. Harlysson Wheiny Silva Maia
Universidade do Estado do Amazonas



Dr. Mojtaba Maali Amiri
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Manaus – AM, 2022

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao professor orientador, que me manteve animada e focada durante o decorrer desta monografia, aos meus amigos e familiares, em particular as minhas mães e meu pai que sempre me proporcionaram as melhores condições de estudos, além de serem meus pilares durante toda a vida, me apoiando mesmo distante e ocupada por longos períodos. E principalmente a Deus, sem ele este trabalho não seria possível.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer a Deus por me permitir ultrapassar todas as dificuldades encontradas durante a realização deste trabalho. Além disto, quero agradecer o apoio da FAPEAM durante minha iniciação científica, que me ajudou a construir minha história acadêmica com pesquisas e projetos.

Aos meus amigos e colegas, especialmente a Victoria e Eduarda por ajudarem e apoiarem ao longo período que me dediquei a esta pesquisa. Aos meus familiares, que sempre estiveram ao meu lado, especialmente as minhas mães, ao meu irmão e a minha cunhada, mesmo nas piores dificuldades nunca deixaram de colaborar aos meus objetivos. Também agradeço ao meu professor orientador Jassiel Vladimir por todos os conselhos e por ter dedicado seu tempo quando precisei, mostrando sempre paciência e carinho. E por fim a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

RESUMO

Grande parte do que existe embaixo da superfície de rios e oceanos ainda permanece inexplorada. Por tal motivo, o uso de tecnologias de exploração subaquática não tripuladas está se tornando cada vez mais relevante em diversas áreas da engenharia, incluindo a Engenharia Naval e Oceânica. Através de dispositivos controlados ou autônomos, é possível explorar regiões antes desconhecidas, assim como realizar atividades industriais e de pesquisa cada vez mais complexas. A necessidade de utilização destas tecnologias para exploração subaquática na região amazônica também é relevante, porém, não existem até agora estudos na região norte do Brasil que colem informações para o entendimento das tecnologias existentes e dos seus princípios básicos de funcionamento. Por tanto, o presente trabalho tem como propósito compilar informações básicas relacionadas com dispositivos subaquáticos não tripulados existentes, considerando tópicos relacionados com Engenharia Naval e Oceânica. Estas incluem os tipos de dispositivos existentes, aspectos propulsivos relevantes, modelagem matemática típica da sua dinâmica e alguns conceitos gerais de estabilidade. Finalmente, algumas limitações e oportunidades existentes para utilizar veículos subaquáticos autônomos nos rios da região amazônica são discutidas. Espera-se que o presente trabalho sirva de base para estudos relacionados com a possível implementação de veículos subaquáticos não tripulados nesta região.

Palavras-chave: Veículos subaquáticos não tripulados; exploração submarina; região amazônica; revisão; desafios; modelagem dinâmica; performance hidrodinâmica.

ABSTRACT

Much of what lies beneath the surface of rivers and oceans remains unexplored. For this reason, the use of unmanned underwater exploration technologies is becoming increasingly relevant in several areas of engineering, including Naval and Ocean Engineering. Through controlled devices, it is possible to explore previously unknown regions as well as carry out increasingly complex industrial and research activities. The need to use these technologies for underwater exploration in the Amazon region is also relevant; however, so far, there are no academic studies in the north region of Brazil that collect information for the understanding of existing technologies and their basic operating principles. Therefore, the present work aims to compile basic information related to existing unmanned underwater devices, considering topics related to Naval and Ocean Engineering. These include the types of existing devices, relevant propulsive aspects, typical mathematical modeling of their dynamics, and general concepts of stability. Finally, the existing limitations and opportunities to use unmanned underwater vehicles in the rivers of the Amazon region are discussed. It is expected that the present work will serve as a basis for studies related to the possible implementation of unmanned underwater vehicles in this region.

Keywords: Unmanned underwater vehicle; submarine exploration; amazon region; review; challenges; dynamic modeling; hydrodynamic performance.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. (a) Principais rios e afluentes da região Hidrográfica Amazônica. Fonte: adaptado de ANTAQ. (b) Parte da bacia do rio Amazonas localizado no estado do Amazonas - Brasil. ... | 17 |
| Figura 2. Exploração subaquática baseada no projeto de Louis Boutan. (a) Transporte realizado em 1894. (b) Procedimento de captura das imagens tiradas em 1898. (c) Exemplo de imagem obtida na captura da Figura 2.b. | 19 |
| Figura 3. Veículo Subaquático Controlado “Poodle”..... | 19 |
| Figura 4. Alteração de volume e pressão conforme o aumento da profundidade. | 20 |
| Figura 5. Alteração da intensidade das cores conforme o aumento da profundidade. | 21 |
| Figura 6. Etapas seguidas para desenvolvimento da pesquisa. Fonte: Autora | 26 |
| Figura 7. Diagrama de classificação dos Veículos Subaquáticos..... | 28 |
| Figura 8. Sistema de um ROV de forma simplificada..... | 28 |
| Figura 9. Tipos de Robôs Rígidos e Robôs Flexíveis. | 33 |
| Figura 10. Exemplos de Robôs flexíveis com garras, barbatanas e pernas. (a) Garras para amostragem biológicas em recifes profundos (GALLOWAT et al, apud ARACRI et al., 2021). (b) Garra com maior força em profundidade (LICHT et al, apud ARACRI et al., 2021). (c) Garra com manipulação ultra suave para estruturas delicadas (SINATRA et al, apud ARACRI et al., 2021). (d) Propulsão direcional usando barbatanas (CHEN et al, apud ARACRI et al., 2021). (e) Robô multimodal utilizando parâmetros híbridos (GIORGIO-SERCHI et al, créditos da foto para Massimo BREGA, apud ARACRI et al., 2021). (f) Robô experimental com formato de peixe (ZHU et al, crédito da foto para Christopher TYREE, apud ARACRI et al., 2021). | 34 |
| Figura 11. Robô bioinspirado em movimentos de um peixe. (a) Barbatanas e movimentos realizados por um peixe. (b) Concepção de um modelo computacional de um BAUV..... | 36 |
| Figura 12. Modelos bioinspirados para enfrentar ambientes terrestres e aquáticos. (a) Modelo hexápode AquaII criado em 2010. (b) Modelo terrestre e aquático CR200 criado em 2013... | 37 |
| Figura 13. Design de um veículo subaquático simplificado do tipo ROV (classe de observação) e seus componentes. | 38 |
| Figura 14. Movimentos principais de um robô subaquático | 39 |
| Figura 15. Representação do metracentro, centro de gravidade e centro de flutuabilidade do veículo subaquático. | 40 |
| Figura 16. Dois tipos básicos de arrasto de um veículo subaquático | 42 |
| Figura 17. Componentes do sistema de arrastos principais de um ROV. | 44 |
| Figura 18. Componentes principais de um propulsor elétrico..... | 45 |

| | |
|--|----|
| Figura 19. Gráfico representativo da eficiência com base na razão entre velocidade de avanço e velocidade de jato. | 46 |
| Figura 20. Conjunto hélice e bocal de Kort..... | 47 |
| Figura 21. Hélice com duto. (a) Hélice canalizada (acelerando). (b) hélice canalizada (desacelerando)..... | 48 |
| Figura 22. Exemplo de Jato de Bomba. (a) Duto com adição de estatores desenho bidimensional (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017). (b) Modelo computacional de um propulsor pump jet (LU et al., 2016). | 49 |
| Figura 23. Referencial inercial {n} e referencial móvel do navio {b}..... | 51 |
| Figura 24. Eixos do sistema móvel e suas direções. Fonte: adaptado de (ANTONELLI, 2006). | 52 |
| Figura 25. Sistema fixo na terra e sistema móvel do veículo subaquático..... | 52 |
| Figura 26. Exemplificação dos eixos fixos na terra e as coordenadas fixas ao sistema móvel do veículo subaquático. | 52 |
| Figura 27. Rotações elementares em torno dos eixos x, y e z no referencial fixo..... | 54 |
| Figura 28. Influência das características físicas do veículo em sua estabilidade. (a) Influência na proporção da dimensão na estabilidade do veículo submerso. (b) Influência da distância entre os propulsores na estabilidade do veículo submerso. | 57 |
| Figura 29. Confluência dos Rios Negro e Solimões, Amazonas, Brasil. | 58 |
| Figura 30. ROV realizando pesquisa arqueológica, utilizando um sistema de navegação acústico (baseado em sinais de som). | 59 |
| Figura 31. Exemplo do uso de tecnologias laser-camara para definir a trajetória de veículos subaquáticos autônomos para monitorar atividades de piscicultura na Noruega. (a) Estação de cultivo de peixes SINTEF-ACE na Noruega. (b) ROV com câmera e tecnologia laser. (c) Mapeamento dos planos e trajetória utilizando dados do sensor acústico e o sistema laser-camara..... | 60 |
| Figura 32. Contornos e regiões de velocidade da correnteza em uma seção transversal do Rio Negro, no estado do Amazonas, localizada na posição da estação de monitoramento Curicuriari. Dados representativos para a época de maior vazão (acima) e menor vazão (embaixo). | 60 |
| Figura 33. Trechos dos rios Negro e Solimões entre os municípios do Amazonas. | 62 |
| Figura 34. Exemplo de aplicação de pesquisa subaquática com um ROV em ambientes extremos. Os avanços na tecnologia de sensores permitem o mapeamento de regiões submersas. | |

(a) Fotos ilustrativas do ROV e da sua operação. (b) Mapeamento da superfície do gelo submerso utilizando tecnologia de sonar.....64

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Aplicações comuns de ROVs de Classe Inspeção..... | 31 |
| Tabela 2. Exemplos de UUVs. | 32 |
| Tabela 3. Nomenclatura dos possíveis movimentos de um ROV. | 38 |
| Tabela 4. Metodologia de projetos. | 41 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANTAQ - Agência Nacional de Transporte Aquaviários

AUV - *Autonomous Underwater Vehicle*

BAUV - *Biomimetic Autonomous Underwater Vehicle*

CB – Centro de flutuabilidade

CG – Centro de Gravidade

CNTP - Condições Normais de Temperatura e Pressão

DOF – *Degrees Of Freedom*, ou seja, graus de liberdade

GM – Altura metacêntrica

M – Metacentro

UV - *Underwater Vehicles*

UUV – *Unmanned Underwater Vehicles*

UXO – Munição não detonada (*Unexploded ordnance*)

ROV - *Remotely Operated Underwater Vehicle*

LISTA DE SÍMBOLOS

- A – Área característica
- C_A – matriz das forças centrípedas e de Coriolis adicional
- C_{CR} – matriz das forças centrípedas e de Coriolis do corpo rígido
- C_d – Coeficiente de arrasto
- D_L e D_Q – matriz de forças devido ao atrito / matriz de arraste linear e quadrático
- E_I e T_I – empuxos e torques inerciais
- E_C e T_C – empuxos e torques causados pelo cabo umbilical
- E_{GB} e T_{GB} – empuxos e torques de restauração, gerados pela interação entre os efeitos de gravidade e de flutuação
- E_H e T_H – empuxos e torque de arraste hidrodinâmico
- E_P e T_P – empuxos e torques resultantes di conjunto de propulsores
- g - Aceleração da gravidade
- $G(\eta)$ – matriz das forças restauradores e gravitacionais / vetor força-momento de restauração do ROV (peso/flutuação)
- l – um comprimento característico do corpo
- M – matriz de inércias
- M_A - matriz da inércia adicional
- M_{CR} – matriz das inércias do corpo rígido;
- V – velocidade do fluido
- \dot{v} – aceleração de translação e rotação do ROV no sistema móvel
- v – velocidade referenciada ao próprio veículo
- ∇ - Volume de fluido deslocado pelo veículo
- ε – vetor das perturbações devidas à dinâmica do cabo e à correnteza marinha ($\dot{\eta}_c$).
- η_1 e η_2 – posição e orientação referenciada ao sistema fixo
- μ – viscosidade dinâmica
- $\nu = \mu/\rho$ – viscosidade cinemática
- ρ - densidade da água
- τ_{PRO} – vetor de força-momento aplicado pelos propulsores

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1. Justificativa | 23 |
| 1.2. Objetivos | 23 |
| 1.2.1. Objetivo geral | 23 |
| 1.2.2. Objetivos específicos | 23 |
| 1.3. Estrutura do trabalho | 24 |
| 2. METODOLOGIA | 24 |
| 3. TIPOS DE VEICULOS SUBAQUÁTICOS E APLICAÇÕES | 27 |
| 4. NOÇÕES BÁSICAS DE MOVIMENTO E ELEMENTOS NECESSÁRIOS PARA PROJETO | 37 |
| 5. PROPULSÃO | 41 |
| 5.1. Tipos de arrasto | 41 |
| 5.2. Conceitos básicos de hélice | 45 |
| 5.3. Bocal de kort | 47 |
| 6. MODELAGEM DINÂMICA DO VEÍCULO SUBAQUÁTICO | 49 |
| 6.1. Equações de movimento | 54 |
| 6.2. Características físicas e eficiência do veículo | 55 |
| 6.2.1. Simetria do veículo e matriz de inércia | 55 |
| 6.2.2. Estabilidade e forma | 57 |
| 7. DISCUSSÕES | 58 |
| 8. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS | 64 |
| 9. REFERÊNCIAS | 66 |

1. INTRODUÇÃO

A exploração subaquática tem relevância em muitas áreas da engenharia, principalmente devido à necessidade de exploração e monitoramento de recursos naturais bem como o desenvolvimento de atividades industriais. Veículos subaquáticos podem ser utilizados para realizar diversos tipos de missões, tais como: levantamento do nível do fundo do mar, inspeção de oleodutos, manutenção de cabos, monitoramento de estruturas *offshore*, reparo e inspeção naval, assim como coleta de levantamentos biológicos, entre outras. Estas missões podem ser realizadas por veículos com ou sem tripulação, mas ao se colocar tripulação em tais missões pode acarretar um enorme custo financeiro; além do risco aos envolvidos, por estarem em ambiente hostil. Tal custo operacional diário pode ser superior a ~8000 € (ANTONELLI, 2006). Além disso, A exploração subaquática apresenta dificuldades ao ser realizada por seres humanos, pois apresenta diversos fatores adversos a serem considerados, tais como diminuição da temperatura, aumento da pressão e redução de oxigênio. Desta forma, há uma necessidade de estudar ferramentas que ofereçam soluções para que as atividades de exploração, manutenção e operação subaquáticas possam ser realizadas preservando o ambiente estudado e procurando a melhor eficiência possível sem colocar em risco os seres humanos envolvidos.

Os veículos subaquáticos não tripulados (*Unmanned Underwater Vehicles – UUV*) são ferramentas indispensáveis que permitem adentrar em regiões submersas de forma segura, suportando os fatores naturais do ambiente, que muitas vezes podem ser desconhecidos e perigosos em regiões ainda não exploradas; além de possibilitar a transmissão de imagens ou sinais de diversos tipos de sensores para análises instantâneas ou posteriores.

Embora a pesquisa submarina tenha sido considerada normalmente para atividades oceânicas (VERFUSS et al., 2019; WYNN et al., 2014), outros tipos de ambientes que poderiam ser explorados são os corpos de água de rios. Um exemplo é a Bacia Amazônica, Figura 1, a mais extensa do planeta, possuindo cerca de 25.000 km de rios navegáveis. Esta região apresenta uma rede de rios e afluentes como mostra a Figura 1(a), e uma área de 6.1 milhões de quilômetros quadrados repartido em 6 países, além do Brasil. Inclusive, a região possui em seu território uma parte do rio Amazonas, Figura 1b, considerado o segundo rio mais extenso do mundo, conforme dados da Agência Nacional de Transporte Aquaviários (ANTAQ, 2013).

poucas pesquisas científicas relacionadas e dispositivos subaquáticos instalados podem ser encontrados (ANTAQ, 2013; MORGADO; PORTUGAL; MELLO, 2013).

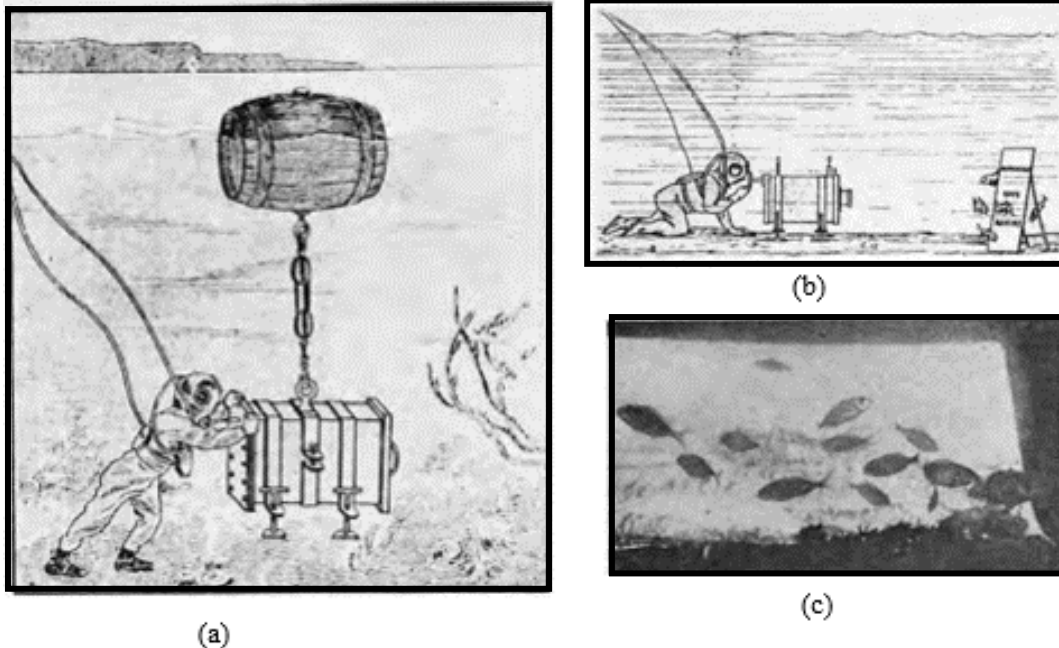
Em um século onde há uma crescente demanda mundial por bens naturais, incluindo algumas riquezas naturais que podem entrar em escassez, o centro da atenção internacional tem sido direcionado para regiões com abundância desses recursos. Porém, deve-se descobrir mais formas de encontrar tais produtos com segurança e sustentabilidade, visando novas alternativas que não afetem a natureza local e incentivando a criação de procedimentos de implementação e normas de conservação (DORNELES; VENTURA; ALMEIDA, 2021). Para isto, o planejamento contendo o estudo do local assim como os métodos de exploração contendo visualizações e medições instantâneas e controladas, pode transformar a região subaquática em uma resposta a futuros problemas energéticos e minerais. É por isto que o presente trabalho visa estudar os conceitos básicos de tecnologias subaquáticas não tripuladas. Conceitos relevantes relacionados com os tipos de dispositivos e seu funcionamento, considerando aspectos de Engenharia Naval, assim como as limitações e possibilidades de implementação na região amazônica, foram o centro de atenção do presente estudo.

1.1. Revisão literária

O interesse na exploração subaquática tem sido visto como inspiração para vários pesquisadores. A adversidade e os desafios envolvidos em se manter submerso para pesquisar diversos fenômenos físicos e descobrir novos recursos naturais possibilitou a procura de soluções com objetivo de tornar mais acessíveis estas atividades (CAPOCCI et al., 2017; WYNN et al., 2014). Uma das soluções apresentada inicialmente foi por meio da fotografia subaquática, pois captando um instante desejado possibilitaria uma análise detalhada posteriormente, permitindo assim a integridade do cenário e diminuindo o tempo da exploração em uma época na qual não se tinham as capacidades fotográficas atuais (REBIKOFF, 1967)

A captura de imagens subaquáticas e seus autores pioneiros têm sido documentados, provavelmente, desde 1893, quando Louis Boutan começou a projetar uma câmera de caixa simplificada para mergulho e captura visível do ambiente, alterando e adaptando seu projeto ao longo de seu estudo. A evolução de seu estudo observa-se na Figura 2a, a qual mostra a caixa mergulhada em 1894; tão pesada que teve que ser suspensa por um barril, usado como um flutuador. Já na Figura 2b, ilustra-se a instalação e a maneira como foram realizadas as primeiras capturas subaquáticas desejadas. Por último, na Figura 2c, pode-se observar um exemplo do resultado obtido em 1898 (REBIKOFF, 1967).

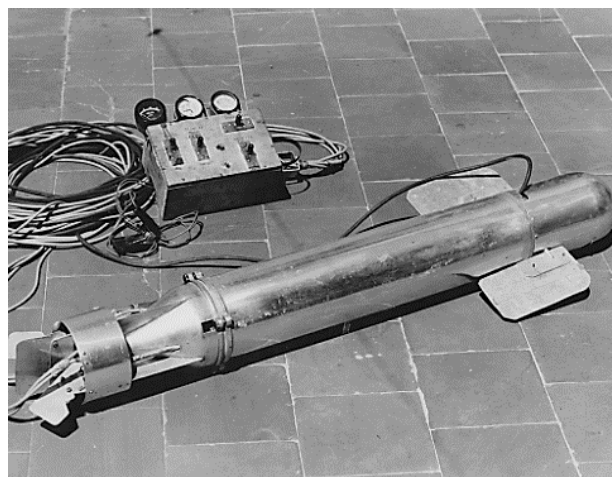
Figura 2. Exploração subaquática baseada no projeto de Louis Boutan. (a) Transporte realizado em 1894. (b) Procedimento de captura das imagens tiradas em 1898. (c) Exemplo de imagem obtida na captura da Figura 2.b.



Fonte:(REBIKOFF, 1967). Imagens usadas com a licença CC BY Creative Commons.

Outra contribuição significativa na exploração subaquática foi realizada por Dimitri Rebikoff, quando apresentou o desenvolvimento do primeiro veículo subaquático controlado, chamado “Poodle”. Datado em 1953, o artefato foi considerado como o primeiro veículo subaquático teleguiado, tendo formato de torpedo e possuindo propulsão, como pode ser visto na Figura 3 (MOLLAND, 2008; REBIKOFF, 1967).

Figura 3. Veículo Subaquático Controlado “Poodle”.



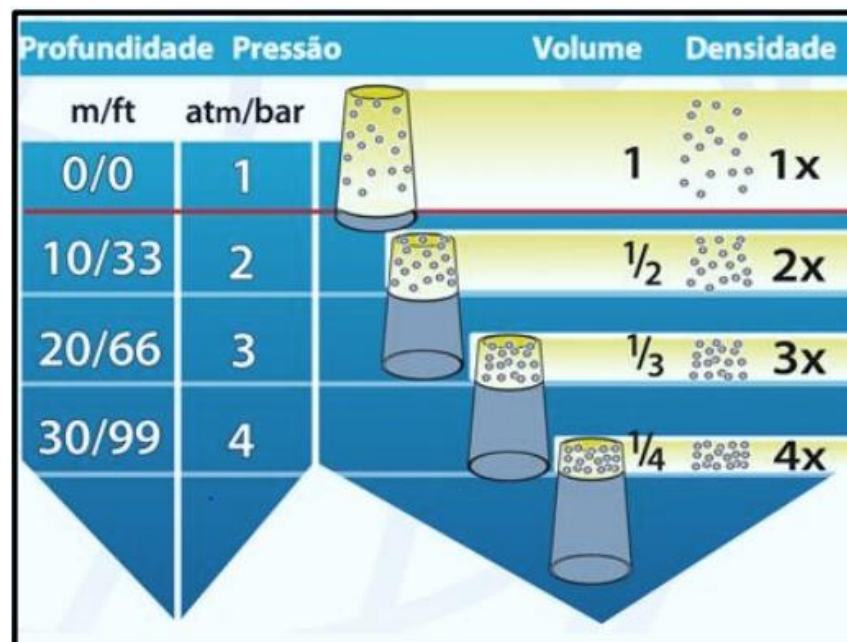
Fonte: adaptado de Dimitri Rebikoff (apud “Fundação Rebikoff-Niggeler”, 2018). Imagem usada com a licença CC BY Creative Commons.

Conforme as Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP), o ser humano vive a uma pressão atmosférica de $\sim 1,033 \text{ Kg/cm}^2$ na superfície do mar, porém quando mergulha

a pressão sobre o indivíduo aumenta, acrescentando-se o valor de aproximadamente 1 atm a cada 10 metros de profundidade. A partir disto, os efeitos da pressão podem ser diretos ou indiretos aos indivíduos. Os diretos são aqueles resultantes da ação mecânica da pressão sobre as células e espaços corporais, tendo como consequências o barotrauma, que pode ser causada pelos efeitos das mudanças de pressão nos espaços do corpo contendo gás (HAMILTON-FARRELL; BHATTACHARYYA, 2004), e a embolia traumática pelo ar, pois o ar contido nos pulmões fica bloqueado (CASTRO, 2019). Já os efeitos indiretos, ou secundários, são devidos às alterações fisiológicas produzidas em decorrência das pressões parciais dos gases absorvidos pelo organismo, que são processos bioquímicos e biofísicos (QUEIROZ et al., 2018).

O ser humano possui 5 sentidos: visão, olfato, paladar, tato e audição, porém em um ambiente aquático, estando em condições adversas, suas habilidades se reduzem, o que normalmente permite a utilização de poucos sentidos, ainda assim, com certa deficiência. (QUEIROZ et al., 2018). Além disto, outra diversidade encontrada explica-se com a Lei de Boyle, como mostrado na Figura 4, onde o volume ocupado por um gás é inversamente proporcional à sua pressão. Desta forma, caso um mergulhador faça uma inspiração de 5 litros de ar comprimido a 10 metros de profundidade, ao realizar a subida sem exalar o gás inspirado, deverá chegar na superfície com o dobro de volume em seus pulmões, acarretando como consequência uma sobrepressão pulmonar (QUEIROZ et al., 2018).

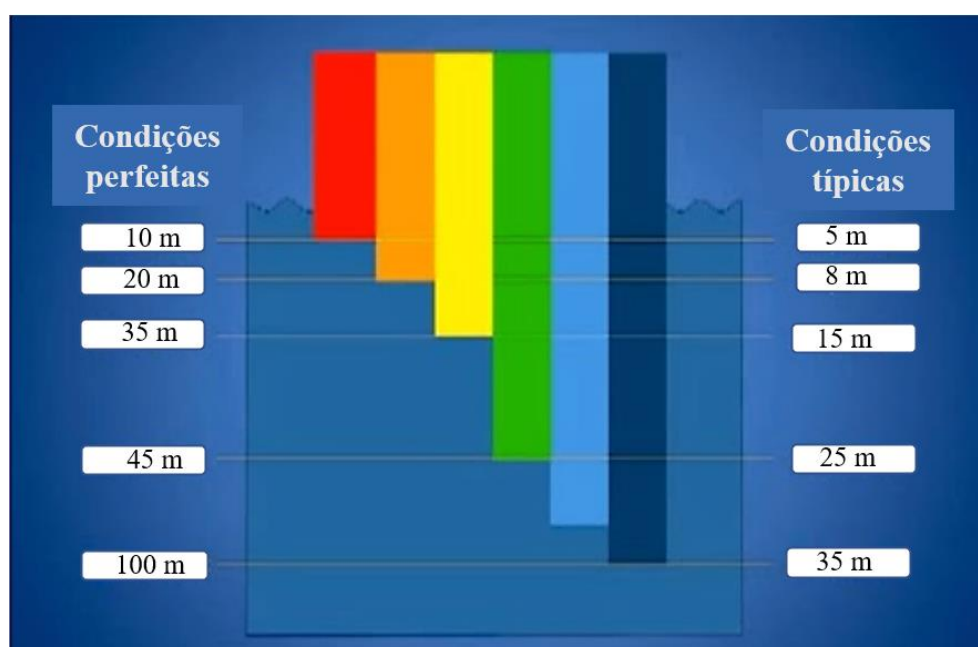
Figura 4. Alteração de volume e pressão conforme o aumento da profundidade.



Fonte: adaptado de (QUEIROZ et al., 2018). Imagem usada com a licença CC BY Creative Commons.

Outro aspecto interessante relacionado com a exploração submarina são os efeitos da profundidade nas cores visíveis. Quanto maior a profundidade, a água influencia as cores de um objeto, como pode ser visto na Figura 5. Isto acontece porque a luz branca é composta por um espectro de cores, sendo estes: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, anil e violeta. A partir disto quanto mais profundo é o ambiente líquido mais as cores individuais do espectro são absorvidas. Devido à absorção da luz pelas moléculas de água, observa-se que as imagens ficam mais escuras quando a profundidade aumenta. Em ambientes de água do mar, por exemplo, a cor vermelha desaparece na profundidade de 3m, a laranja em 5m e a amarelo em 10m (BASU; SS; ARI, 2017; QUEIROZ et al., 2018).

Figura 5. Alteração da intensidade das cores conforme o aumento da profundidade.



Fonte: adaptado de (BASU; HARSHA; ARI, 2017). Esta imagem foi adaptada para o português usando uma licença CC BY Creative Commons.

Além da variação das cores com a profundidade, quando há grande quantidade de partículas em suspensão na água, ela é considerada turva, o que dificulta a luz a penetrar no ambiente. Consequentemente, a visibilidade é reduzida por essa turbidez. Já para efeitos sonoros a água se torna um condutor mais eficiente, pois a água é em torno de 800 vezes mais densa que o ar, movendo o som aproximadamente quatro vezes mais rápidas. Ou seja, a velocidade do som é aproximadamente igual a 1450 m/s na água e 343 m/s à 20°C no ar (QUEIROZ et al., 2018).

Para revisão bibliográfica foram selecionados livros e artigos publicados que possuíssem informações sobre modelagem dos veículos submersos e seus principais elementos para a realização de suas tarefas. Sendo as principais obras resumidas nos parágrafos a seguir.

De maneira resumida, (FOSSEN, 2011) apresenta seus novos resultados sobre a modelagem, hidrodinâmica, orientação e navegação de embarcações marítimas. Já (ANTONELLI, 2018) possui um conteúdo exclusivo para o estudo de veículos subaquáticos, suas modelagens, seu controle dinâmico, possíveis estratégias de detecção de falhas e tipos de controles. Também, inclui informações sobre o controle e a interação dos sistemas de veículo-manipulador subaquático. Enquanto (MOLLAND, 2008) é uma fonte completa para estudos em engenharia naval e sua arquitetura, reunindo vários trabalhos dos principais escritores do mundo na área, compreendendo do básico até tópicos mais avançados em projeto, construção e operação de navios. O capítulo 10 dessa fonte (*Underwater vehicles*) contém uma introdução e história sobre os veículos subaquáticos. Além disto apresenta seu design e componentes principais, mostrando sua classificação, sua noção de estabilidade e dimensionamento. Assim também, são tratados alguns estudos sobre arrasto, a influência do cabo no movimento dos veículos operados remotamente (ROV, *Remote Operated Vehicles*), o sistema de controle do veículo e sua propulsão.

Foram revisados artigos que consistiam em revisões acerca do conteúdo do presente trabalho. Desta forma, os principais lidos foram: (HE; WANG; ALI, 2020a), que apresenta uma revisão sobre veículos subaquáticos operados remotamente (ROV) e suas diferentes aplicações, oferecendo uma breve introdução dos veículos não tripulados. Eles compilaram pesquisas e publicações sobre os tópicos de projetos desses robôs, mostrando também uma avaliação de alguns trabalhos recentes sobre sistemas subaquáticos, tendo como objetivo ajudar futuros pesquisadores com uma revisão do campo dos ROVs e seus possíveis desenvolvimentos futuros. No trabalho de (CAPOCCI et al., 2017) foi realizada uma revisão dos veículos operados remotamente (ROV, *Remote Operated Vehicles*) da classe de inspeção. Foram apresentadas suas classificações, categorizando por tamanho e capacidade, assim como suas aplicações. As formas e design de um ROV, incluindo sua flutuabilidade, materiais estruturais, características hidrodinâmicas, assim como a telemetria do ROV e suas tecnologias de operação foram discutidas.

Alguns trabalhos de conclusão de curso também foram pesquisados, tendo entre estes o estudo feito por (GOULART, 2007), que aborda a modelagem da dinâmica do veículo submarino de operação remota desenvolvido pelo GSCAR da COPPE/UFRJ para inspecionar dutos de adução em barragens de usinas hidrelétricas, apresentando procedimentos experimentais e teóricos. (VAZ, 2015) apresentou a criação de ambiente virtual para a simulação da dinâmica de um ROV, possibilitando então a análise de configurações de

propulsores. Sendo apenas um primeiro passo, tendo objetivo de aperfeiçoar em trabalhos futuros. E por fim, (BUELONI, 2016) apresentou um modelo cinemático para um ROV de baixo custo, concebido a partir de tubulação de PVC em uma plataforma *open source*. Inicialmente apresentou os tipos de veículos e sua história. Subsequentemente, discutiu tópicos relacionados com cinemática, sistemas de coordenadas, variáveis de estado, assim como dinâmica e suas equações de movimentos.

1.1. Justificativa

Segundo o conhecimento atual da autora, não há materiais acadêmicos publicados sobre a classificação e funcionamento de dispositivos modernos que permitam a realização de exploração subaquática autônoma, discutindo limitações e oportunidades de aplicação na região hidrográfica da Amazônia. Desta forma, os estudos ficam extremamente limitados à capacidade humana de exploração e a serviços locais simplificados. Sendo que a realização de mergulho para qualquer atividade subaquática se torna perigoso quando não é realizado corretamente, colocando em risco a vida de quem o pratica (GOZZER, STEFANIA, 2018). A pesquisa nesta área pode contribuir em um melhor aproveitamento de riquezas naturais e desenvolvimento de atividades industriais, incluindo as relacionadas com Engenharia Naval, tais como inspeção e reparo. Tais atividades poderiam ser desenvolvidas de forma eficiente e sustentável, sem prejudicar o ecossistema presente por meio de aplicações planejadas e monitoradas. Uma alternativa de solução seria o uso de veículos subaquáticos não tripulados de observação e de trabalho, já que sua utilização ultrapassaria a limitação humana, podendo alcançar e monitorar regiões remotas por mais tempo e com mais eficiência que outros métodos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Integrar conceitos básicos de classificação e funcionamento de veículos subaquáticos não tripulados, discutindo as possibilidades de aplicação na bacia amazônica e apresentando material teórico suficiente para o projeto de um protótipo simples.

1.2.2. Objetivos específicos

- Revisar estudos relacionados com veículos subaquáticos (UV - *Underwater Vehicles*) desenvolvidos no âmbito internacional, possibilitando conhecer seus conceitos básicos de aplicação e operação.

- Apresentar e descrever as classificações mais comuns de veículos submersos, discutindo seus conceitos básicos de funcionamento.
- Discutir conceitos de funcionamento dos veículos submersos relevantes na Engenharia Naval e Oceânica, tais como: hidrostática, propulsão, modelagem dinâmica e estabilidade.
- Discutir as limitações e possibilidades de implementação de veículos subaquáticos na região amazônica.

1.3. Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado como segue: O Capítulo 2 descreve a metodologia utilizada na pesquisa e o Capítulo 3 aborda sobre os tipos de veículos submersos e suas possíveis aplicações. Subsequentemente, o Capítulo 4 desenvolve sobre as noções básicas e elementos necessários para iniciar as análises desses veículos. No Capítulo 5 é descrita a propulsão incluindo os tipos de arrasto e os elementos necessários para superá-los. Logo, no Capítulo 6, tem-se a modelagem dos movimentos realizados pelo veículo (dinâmica), neste também tem uma explicação sobre a influência de seu formato em sua estabilidade. Finalmente, o Capítulo 7 apresenta uma discussão sobre tudo o que foi abordado, incluindo as limitações possibilidades de aplicação de veículos subaquáticos na região amazônica, terminando no Capítulo 8 com as conclusões.

2. METODOLOGIA

O presente estudo foi realizado em sete etapas principais (Figura 6), tendo como objetivo principal a coleta de informações necessárias para entender os princípios de funcionamento de dispositivos subaquáticos e entender as possíveis aplicações nos rios da região amazônica. Com relação à Figura 6, as atividades realizadas são descritas como segue:

(1) Pesquisa. Procura de artigos, livros e notícias sobre história, aplicações e avanços de veículos subaquáticos, recolhendo informações necessárias para documentar os tópicos planejados. Para isto, foram pesquisados artigos em editoriais de revistas internacionais como Elsevier (Scimedirect.com), Springer, Wiley, MDPI, Frontiers, entre outras. Para obter alguns dos artigos relacionados com o tópico de pesquisa, foi utilizada a plataforma Periodicos CAPES (<https://www-periodicos-capes-gov-br>). Também, foram consultadas informações disponíveis em sites web, tais como relatórios técnicos, notícias, projetos em andamento, sites de empresas, entre outras. Grande parte da pesquisa foi obtida por meio de literatura de livre acesso, sob a

licença Creative Commons (CC BY; https://creativecommons.org/licenses/?lang=pt_BR). Para a busca dos artigos, foram utilizadas palavras em inglês como: “underwater vehicle”, “submarine exploration device”, “AUV”, “ROV”, “AUV/ROV review”, entre outras.

(2) Tradução. Já que a maioria dos estudos considerados para a pesquisa estão em inglês, foi necessária a utilização de ferramentas de tradução para continuar o desenvolvimento da pesquisa. Para isto, foi utilizado o Google Translator (<https://translate.google.com.br/>); assim como dicionários em inglês para esclarecimento de termos específicos, tais como o *Merriam-Webster Dictionary* (<https://www.merriam-webster.com/>) e o *Cambridge Dictionary* (<https://dictionary.cambridge.org/>).

(3) Determinação de tópicos. Havendo muitos artigos interessantes sobre veículos subaquáticos, as informações foram adaptadas para melhor explicação, conectando autores diferentes e complementando suas pesquisas, direcionando a estrutura do texto para os objetivos almejados. O método de escolha da literatura foi baseado em aqueles artigos que possuíam informações básicas de veículos subaquáticos, tais como: história, primeiros modelos, modelos mais utilizados no mercado, aplicações e, por fim, os parâmetros que devem ser analisados para fins de construção. Observou-se que os formatos e tarefas realizadas por cada veículo se diferenciavam; porém, alguns elementos básicos em sua estrutura foram utilizados constantemente.

Os assuntos utilizados para filtrar estes artigos foram: tipos de veículos subaquáticos, aplicações usuais, design, cálculos de estabilidade e manobra, estabilidade, tipos de arrastos e propulsão.

(4) Desenvolvimento teórico. Nesta etapa, as informações selecionadas com os assuntos desejados foram filtradas e descritas para a construção do texto. Observaram-se os itens mais abordados, considerados importantes para os autores dos artigos e livros estudados, considerando as tarefas mais realizadas por esses veículos, assim como os passos a serem seguidos com intuito de projetar um veículo subaquático e as considerações que devem ser levadas para adaptá-los e assim torná-los eficientes nos ambientes desejados. Para selecionar dados sobre a região hidrográfica amazônica utilizou-se o (ANTAQ, 2013), relatório realizado pela ANTAQ onde se encontram informações sobre a bacia amazônica, um estudo e análise das hidrovias, informações sobre os rios, suas extensões e principais características.

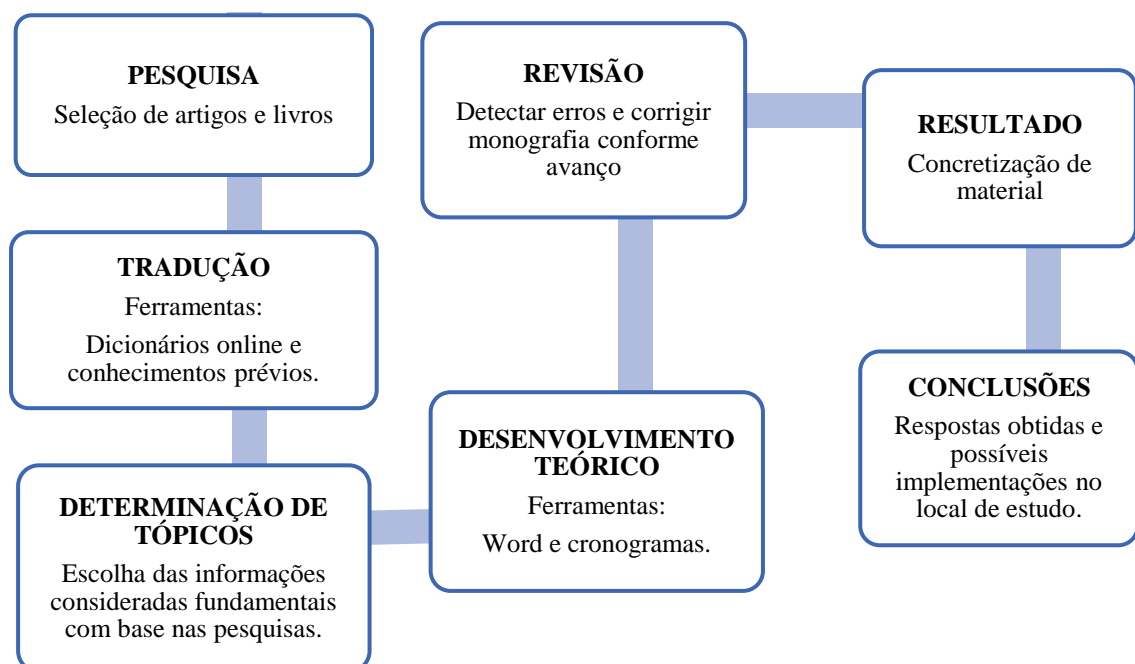
(5) Revisão. Nesta etapa são traduzidas e adaptadas as informações encontradas, utilizando sempre que possível imagens a serem implementadas no texto conforme as explicações no decorrer do conteúdo. O procedimento nesta etapa foi feito constantemente. Para adaptar as

imagens e os textos, foram selecionadas as figuras mais didáticas, adaptando e traduzindo suas legendas e indicações, utilizando as ferramentas citadas no item 2 desta seção. Para editar as imagens foram utilizadas duas ferramentas: Inkscape (<https://inkscape.org/pt-br/>) e PowerPoint (<https://www.microsoft.com/pt-br/microsoft-365/powerpoint>). Estas ferramentas foram utilizadas para substituir os itens, legenda ou indicações, que estavam em inglês para português, deixando então as figuras prontas para serem utilizadas como demonstrativo dos textos.

(6) Resultado. Nesta etapa foram documentados os conteúdos considerados importantes para um estudo primordial, os quais sem este conhecimento pode não haver sucesso na construção de um veículo subaquático. Estes itens foram discutidos finalmente para o ambiente desejado, os rios da bacia amazônica, avaliando limitações e possibilidades. Com a teoria estudada e considerando as principais dificuldades que podem ser encontradas neste ambiente pode haver um futuro de exploração e aplicação destas ferramentas na região.

(7) Conclusões. Nesta etapa foram descritas, de maneira simplificada, as descobertas e informações mais importantes encontradas.

Figura 6. Etapas seguidas para desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Autora

3. TIPOS DE VEÍCULOS SUBAQUÁTICOS E APLICAÇÕES

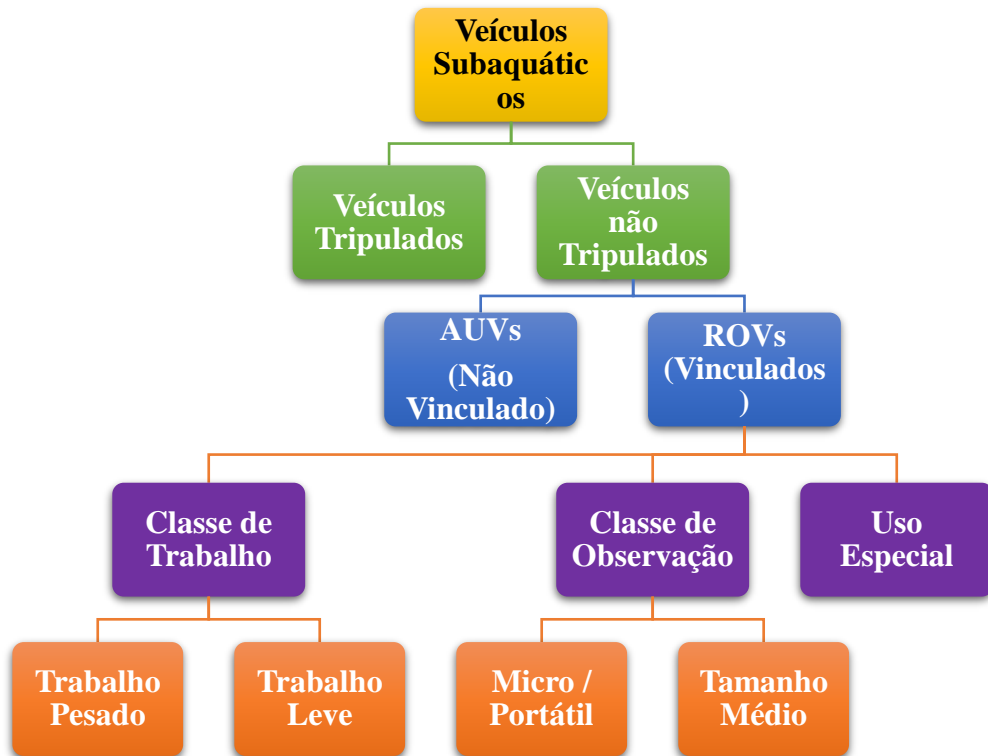
Os veículos subaquáticos podem ser classificados de acordo com sua operação, tipo de controle e seu tamanho, não havendo limites visíveis para seus alcances na pesquisa. Com a possibilidade de se expor a ambientes perigosos e realizar diversas atividades de exploração subaquática, praticamente impossíveis para os seres humanos, este tipo de tecnologias estão tendo uma grande relevância em diversas áreas da engenharia nos últimos anos. Nesta seção são apresentados os tipos de veículos subaquáticos mais comuns, descrevendo várias das aplicações que eles realizam. A seção 3.1 mostra uma classificação geral dos veículos subaquáticos segundo a necessidade ou não de tripulação. Subsequentemente, é apresentada uma classificação alternativa na seção 3.2, considerando tecnologias mais modernas as quais permitem classificar os veículos subaquáticos como robôs rígidos e flexíveis.

3.1. Classificação geral de veículos subaquáticos e aplicações

Conforme a Figura 7, a primeira forma de classificação dos veículos subaquáticos é com relação à necessidade de tripulação. Têm-se os veículos tripulados, que só podem submergir acompanhados de seres humanos, e os não tripulados, que são veículos subaquáticos com tecnologia para se manter em navegação sem precisar de uma tripulação contida (CAPOCCI et al., 2017; MOLLAND, 2008).

De acordo com o Plano Diretor de Veículos Subaquáticos Não Tripulados da Marinha dos EUA (LANDAY III et al., 2004), um submarino ou veículo subaquático não tripulado pode ser definido como um submersível autopropelido com operação totalmente autônoma (pré-programada ou com controle de missão adaptável em tempo real), ou sob o mínimo controle de supervisão, não estando amarrado, exceto, possivelmente, por uma ligação de dados, como um cabo de fibra óptica. Ainda conforme o plano diretor, algumas das possibilidades dos UUVs (*Unmanned Underwater Vehicles*) para contribuir com as necessidades navais derivam das suas vantagens operacionais, tais como: Autonomia, têm independência de operação por longos períodos e custo reduzido, por serem conduzidos por uma infraestrutura compacta, ao invés de plataformas tripuladas; Redução de Risco, eliminam o risco entre os envolvidos na missão; Discrição, operando totalmente submerso e com baixa influência no meio externo.

Figura 7. Diagrama de classificação dos Veículos Subaquáticos.

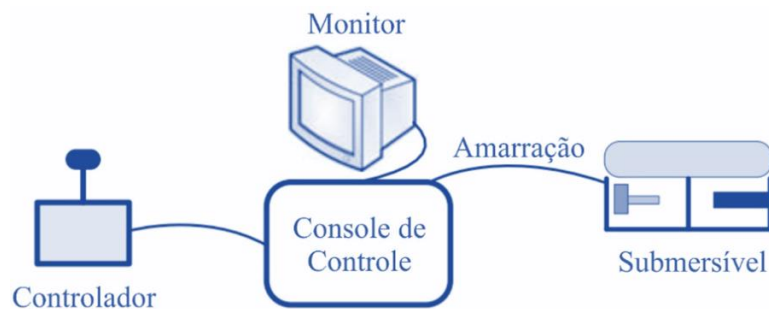


Fonte: (CAPOCCI et al., 2017; MOLLAND, 2008). Esta classificação foi adaptada para o português usando uma licença CC BY Creative Commons.

Seguindo a Figura 7, a partir destes veículos não tripulados há dois subgrupos: os autônomos, chamados de AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*), e os controlados remotamente, conhecidos como ROV (*Remotely Operated Underwater Vehicle*).

Os veículos operados remotamente (leia-se ROV a partir de agora) são veículos subaquáticos controlados e conectados por meio de um cabo a um operador que pode estar em um submarino ou acima da superfície da água. Suas conexões são realizadas para que o operador tenha total controle aos movimentos do veículo, dando energia e informações durante o uso. Estes veículos possuem sistemas com base na ligação entre o operador e o submersível como se indica na Figura 8 (MOLLAND, 2008).

Figura 8. Sistema de um ROV de forma simplificada.



Fonte: adaptado de (MOLLAND, 2008).

Ainda conforme (MOLLAND, 2008), por outro lado, os veículos autônomos (leia-se AUV a partir de agora) não têm dependência a um controlador por meio de cabo. Os AUVs possuem um sistema inteligente e de energia próprio, independente ao meio externo. Portanto, suas operações são desenvolvidas contando com sua capacidade de tomada de decisão e sua programação. A diferença principal dos AUVs com os ROVs é o fato de não haver amarração, podendo receber e processar informações em suas operações sem precisar de cabo. Não sendo apresentado outra forma de classificação do modelo autônomo, mas quanto os ROVs, estes podem ser classificados em 3 categorias: (i) Classe de Trabalho, (ii) Classe de Observação e (iii) Uso Especial (Figura 7):

- (i) Os ROV da Classe de trabalho são comumente utilizados em operações destinadas à manutenção, instalação e reparo subaquático. Normalmente, eles apresentam garras mecânicas que dão liberdade para manusear ferramentas e transportar os itens desejados; além de manobrar conforme necessidade do operador, consertando sua posição e movimento de acordo com cada missão (CAPOCCI et al., 2017).
- (ii) Já nos ROV de Classe de Observação, o objetivo principal consiste em coletar dados do ambiente. Além de contar com propulsores para manobras delicadas, eles possuem câmeras que dão ao seu operador imagens instantâneas da região, úteis para consultas posteriores. (CAPOCCI et al., 2017)
- (iii) Os ROV de Uso Especial são projetados para fins específicos, ou seja, sua construção é realizada e programada para atender missões pré-definidas. Um exemplo é um sistema ROV de enterro de cabos, o qual é projetado para enterrar os cabos de telecomunicações. (MOLLAND, 2008)

É importante mencionar que muitos dos ROVs que desenvolvem operações na indústria de Engenharia Naval podem ser classificados na classe de Trabalho leve ou pesado (Figura 7), tendo sua maior aplicação na indústria offshore de petróleo e gás. Geralmente, conforme descreve (CAPOCCI et al., 2017), este tipo de veículos pesam de 100 kg a 1500 kg, podendo operar em profundidades de até 3.000 m. Eles são usados principalmente para trabalhos como limpeza e perfuração. Além disto, cabe mencionar que ainda conforme o autor os ROVs de Trabalho Pesado podem pesar até 5.000 kg e atingir profundidades de até 6.000 m, operando principalmente em atividades como perfuração de apoio e construção.

Os ROVs da Classe de Observação normalmente são menores do que os da Classe Trabalho, sendo divididos conforme seu tamanho (micro/portátil e médio, Figura 7). Os ROVs

de tamanho médio pesam geralmente entre 30 kg e 120kg, já os de tamanho micro, ou também nomeados de portáteis, podem pesar entre 3kg e 20kg (CAPOCCI et al., 2017).

Para delimitar qual classe de veículo utilizar é necessário apontar seu objetivo. Estas ferramentas possuem um grau de investimento diferenciado, portanto quanto mais específica for a atividade a ser desenvolvida, mais custo-benefício poderá ser obtido. Poderiam ser classificados como os fatores mais importantes a serem levados em consideração: posição e orientação, superfície de controle e forma do veículo. Definindo estes parâmetros, poderia se iniciar o processo de escolha do projeto mais acessível financeiramente e mais adaptado ao problema estudado.

No processo de escolha, pode ser necessário descrever a região onde vai ser exposto o veículo, incluindo provavelmente os possíveis desafios. Depois, supostamente necessitaria saber o grau de capacidade de carga necessária e, por fim, a necessidade de autonomia durante o processo.

Quando se trata das aplicações dos veículos subaquáticos, não há ideias fixas, pois adaptações a diferentes ramos de atuação são totalmente possíveis, podendo então atingir um amplo mercado e operar em ambientes perigosos e inalcançáveis para seres humanos. Para exemplificação, as principais aplicações de um ROV da Classe Observação são listadas na Tabela 1 (CAPOCCI et al., 2017). Nota-se que estes dispositivos podem ter aplicações para monitoramento e inspeção nos ramos ambiental, de segurança, geração hidroelétrica, aquicultura, militar, energias, petróleo, busca e resgate, arqueologia, etc.

Em destaque, têm-se a indústria offshore e ambiental. Nelas, a tendência de procura de minérios submersos é indiscutível, tendo em vista que o leito dos oceanos é a região menos explorada do planeta. Ao mesmo tempo, podendo ser rica em recursos naturais para o mercado global, também deve-se atentar aos impactos ambientais resultantes de sua exploração ou extração. Portanto, a pesquisa antes e durante a qualquer atividade operacional, como perfuração, construção e implantação de dutos, deve ser realizada.

Estas atividades são normalmente repetidas e realizadas em longo período de operação por esses veículos, sendo que eles ainda possuem capacidade de processamento necessário para captar imagens subaquáticas e realizar manipulação de dados a partir de sensores instalados com eficiência elevada, o que mergulhadores não conseguiriam realizar por conta das limitações naturais de um ser humano, como descrito na seção 1.1. Embora o uso de veículos subaquáticos não tripulados leve à questão econômica de seu uso, é possível atingir maiores alcances de região, maior tempo de operação e sem risco à vida. Portanto, estas máquinas se

tornam a solução perfeita para exploração, apesar de demandarem uma grande dedicação intelectual e financeira em suas etapas de projeto e construção.

Tabela 1. Aplicações comuns de ROVs de Classe Inspeção.

| Aplicação | Exemplos |
|--|--|
| Segurança | Inspeções de casco, pesquisas de munições não detonadas (UXO – <i>Unexploded Ordnance</i>), detecção de contrabando |
| Ciências | Investigação do fundo do mar, estudos da vida marinha, água e amostragem de sedimentos |
| Engenharia Naval e Oceânica, Petróleo e gás offshore | Inspeção de tubulação e estrutura, detecção visual de vazamento, operações de acompanhamento de mergulhador. Há também a possibilidade em aplicações adicionais como: Inspeção de embarcações e sistemas flutuantes e ancorados. Controle de qualidade estrutural da parte submersa de estruturas (por exemplo, corrosão e solda). |
| Energia renovável do oceano | Inspeção de estrutura |
| Energia Nuclear | Inspeção e operação em áreas que causam perigo aos seres humanos |
| Busca e resgate | Operações de busca e resgate |
| Arqueologia | Mapeamento de área, acompanhamento de mergulho |
| Engenharia Civil | Monitoramento da estrutura de pontes e pieres, inspeção de fundações |

Fonte: Estendido de (CAPOCCI et al., 2017)

Os desenhos (*designs*) de um veículo subaquático normalmente seguem padrões que facilitam as manobras, sendo adaptados conforme a região de estudo. Alguns exemplos de veículos não tripulados são listados na Tabela 2 (HE; WANG; ALI, 2020a).

Modelos de veículos de Classe de Observação normalmente possuem câmera, sensores e alguns fabricantes oferecem a possibilidade de implantação de mais sensores caso necessário. Os Modelos de Classe de Trabalho, além das câmeras, possuem geralmente garras ou braços mecânicos, tendo atuadores que permitam o manuseio de equipamentos e até mesmo permitindo atividades mais complexas.

Tabela 2. Exemplos de UUVs.

| Veículo Subaquático | |
|---|---|
|  | <p>ROV de Observação</p> <p>Fonte: (HE; WANG; ALI, 2020b)</p> |
|  | <p>ROV de Trabalho</p> <p>Fonte: (HE; WANG; ALI, 2020b)</p> |
|  | <p>AUV em formato de ‘missel’</p> <p>(“International Submarine Engineering LTD - Products”, 2020)</p> |

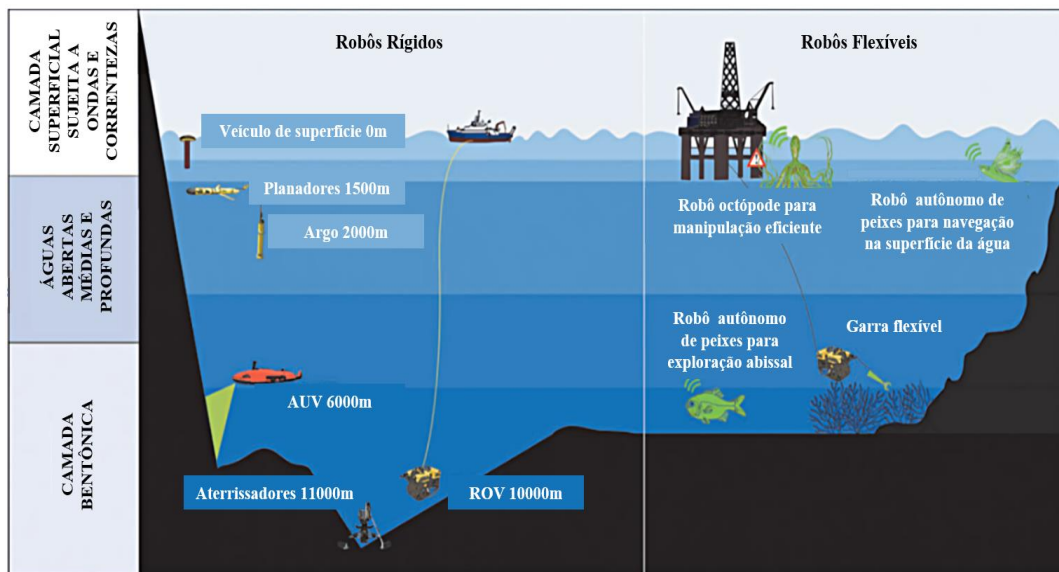
Fonte: (HE; WANG; ALI, 2020b; “International Submarine Engineering LTD - Products”, 2020). Estas imagens foram usadas com uma licença CC BY Creative Commons.

Em muitas situações, além do sistema mecânico, é necessário implementar um investimento no sistema de navegação para aumentar a capacidade, já que para atividades específicas a navegação deve ser extremamente precisa. Um meio para alcançar estes recursos seria por meio da instalação de um Giroscópio de fibra óptica com base na inércia do sistema de navegação (INS – *Inertial Navigation System*), que calcula a posição, orientação e velocidade do veículo por meio de computador, sensor de movimento e de rotação (HE; WANG; ALI, 2020b). Também se vê ideal a implementação de um bom sistema de controle, para levar as informações desejadas reduzindo o tempo e o custo financeiro da aplicação.

Como mostrado na Figura 9, há outra forma de classificar os veículos subaquáticos: robôs rígidos e robôs flexíveis. A figura também mostra diversos tipos de veículos subaquáticos, AUVs e ROVs, incluindo as possíveis faixas de profundidade nas quais podem

operar: camada superficial sujeita a ondas e correntezas, águas abertas intermediárias e profundas e camada bentônica. Os robôs rígidos são estruturas rígidas, com movimentos limitados, enquanto os robôs flexíveis possuem um grau de manobra mais amplo para manuseio e controle de ferramentas. Em alguns destes dispositivos, é possível encontrar braços com sucção para fixar objetos. Outros veículos podem ser aplicados para pesquisa considerando o animal do habitat estudado, sem interferir com o ambiente em questão, simulando movimentos próprios deles.

Figura 9. Tipos de Robôs Rígidos e Robôs Flexíveis.



Fonte: Adaptado de (ARACRI et al., 2021). Esta imagem foi adaptada e traduzida para o português usando uma licença CC BY Creative Commons.

Atualmente nas aplicações marítimas, a maioria dos dispositivos são da categoria de robôs rígidos. Ainda na Figura 9, destacam-se aplicações potenciais onde os robôs flexíveis podem ser usados; muitas vezes em condições de operação onde seria menos adequado utilizar os robôs rígidos. Por exemplo, os dispositivos autônomos AUVs, planadores (*gliders*), de deriva (*drifters*) e flutuadores tipo Argo (*argo floats*), (ver robôs rígidos na Figura 9), têm vida útil de bateria limitada (até 180 dias). Além disto, os veículos planadores (*gliders*), de deriva (*drifters*) e flutuadores tipo Argo (*argo floats*) são limitados à superfície ou até 2km de profundidade, e alguns AUVs no mundo podem atingir 6.000 m de profundidade tendo que seguir um caminho predeterminado. Já nos ROVs, observa-se a necessidade de serem amarrados, precisando ser operados remotamente de maneira constante. Por estes motivos, os robôs flexíveis podem ser utilizados quando for necessária a exploração profunda de longa distância, onde ainda há limitações de tecnologias atualmente disponíveis. O lado direito da Figura 9 mostra exemplos de robôs com garras para amostragem de recifes de corais e algumas

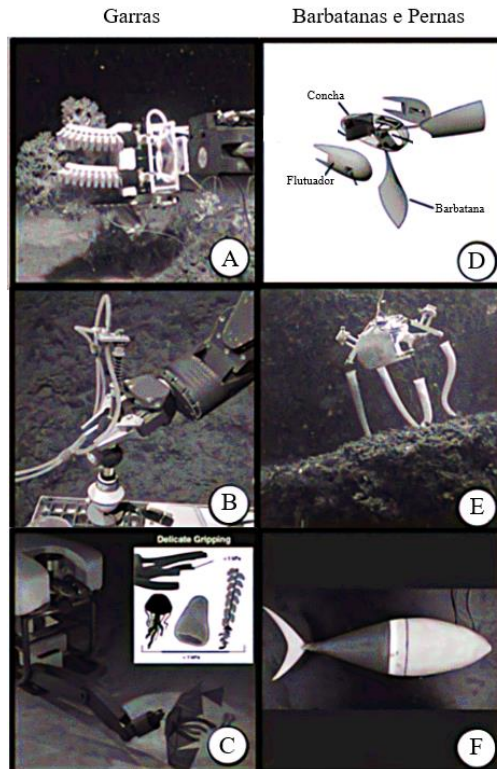
possíveis futuras aplicações de robôs flexíveis, todos representados em verde. Estas aplicações abrangem a exploração bentônica (como exemplo, robô autônomo de peixes), navegação em águas perturbadas de superfícies e operações de reparo próximo à superfície para plataformas offshore (ARACRI et al., 2021).

Os veículos subaquáticos podem ser utilizados em diversos ramos de pesquisa, como exemplo no ramo ambiental e de aquicultura (Tabela 1), porém ainda há restrições tecnológicas que podem impedir a exploração de lugares provavelmente mais hostis do que os atuais conhecidos. A produção ou o projeto de um robô flexível ou o estudo aprimoramento dos atuais robôs rígidos pode fornecer uma abordagem nova e provavelmente mais eficiente do que os padrões atuais, considerando possíveis soluções aos desafios atuais encontrados.

Com relação aos robôs flexíveis, há modelos existentes que estão sendo utilizados para exploração e coleta de amostras delicadas, como pode ser visto nas Figuras 10a-10f, tendo em mente que sua operação possui um grau de flexibilidade adequado para cada missão determinada. Também há moldagem de barbatanas e membros (Figuras 10d-10f) que podem estabilizar o movimento de um robô seja rígido ou flexível, permitindo sua locomoção; assemelhando-se em alguns casos com animais do habitat de estudo que seria um exemplo de biomimetismo, onde existe uma tentativa de imitar a natureza.

É importante mencionar que vários dos desafios mais conhecidos nos mares também podem ser vistos nos rios, incluindo a dificuldade nas viagens de longa distância perto do fundo e as manobras precisas nestes ambientes onde existe a interação com correntezas de água.

Figura 10. Exemplos de Robôs flexíveis com garras, barbatanas e pernas. (a) Garras para amostragem biológicas em recifes profundos (GALLOWAT et al, apud ARACRI et al., 2021). (b) Garra com maior força em profundidade (LICHT et al, apud ARACRI et al., 2021). (c) Garra com manipulação ultra suave para estruturas delicadas (SINATRA et al, apud ARACRI et al., 2021). (d) Propulsão direcionada usando barbatanas (CHEN et al, apud ARACRI et al., 2021). (e) Robô multimodal utilizando parâmetros híbridos (GIORGIO-SERCHI et al, créditos da foto para Massimo BREGA, apud ARACRI et al., 2021). (f) Robô experimental com formato de peixe (ZHU et al, crédito da foto para Christopher TYREE, apud ARACRI et al., 2021).



Fonte: Adaptado de (ARACRI et al., 2021). Imagens usadas e traduzidas para o português com a licença CC BY Creative Commons.

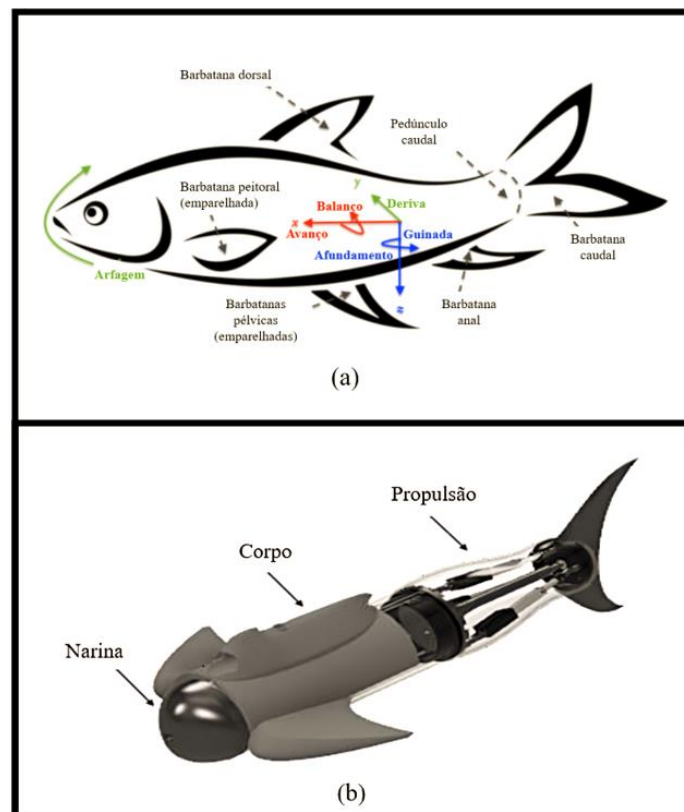
As informações contidas nos próximos 4 parágrafos tiveram como referência o trabalho de (ARACRI et al., 2021).

Algumas características peculiares dos robôs flexíveis que estão surgindo conforme o avanço da robótica poderiam abordar e resolver tais desafios. Além disto, a análise de um *design* bioinspirado (*bioinspired*), ou seja, inspirado, por exemplo, em animais ou objetos naturais encontrados em algum ambiente específico, pode permitir que os veículos alcancem maior propulsão eficiente, aproveitando os efeitos de hidroelasticidade, tornando-os capazes de navegar em distâncias próximas ao fundo. Além disto, essa estratégia inspirada na natureza pode fornecer habilidades de manobras em ambientes complexos. Com sensores flexíveis, seria possível transformar esses veículos em uma rede de sensores autopropulsores. Também, o uso de materiais biodegradáveis os pode tornar totalmente descartáveis, minimizando seu impacto no meio ambiente.

Os sistemas propulsivos tradicionais para AUVs possuem deficiências, que dependendo das missões se tornam prejudiciais. Como exemplo cabe mencionar a invasão ao meio aquático que pode interferir na pesquisa do ambiente, gerando ruídos e danos ao ecossistema. Além disso, pode-se consumir mais energia e existe a limitação de ter um vetor propulsor unidirecional. Esta última característica restringe a manobrabilidade do veículo.

Algumas pesquisas para tornar as explorações feitas por dispositivos subaquáticos mais eficientes têm sido feitas utilizando os chamados BAUV (*Biomimetic Autonomous Underwater Vehicle*, (APARICIO-GARCÍA et al., 2020)), o que traduzido seria “Veículo Subaquático Autônomo Biomimético”, ou seja, dispositivos inspirados no estudo de estruturas da natureza e suas funções, aprendendo soluções eficientes e com pouco impacto para o meio ambiente. Conhecer estruturas que se movimentem de forma natural nesses ambientes pode trazer soluções mais práticas e confiáveis, pois para estas regiões possivelmente desconhecidas aos seres humanos os animais de seu habitat possuem vantagens inimagináveis. Na Figura 11 a seguir, observa-se um modelo esférico baseado em movimentos de um peixe, empregando um mecanismo paralelo para manipular a posição de uma barbatana caudal. Com esta tecnologia, é possível operar um sistema propulsivo através de diferentes tipos de natação, como exemplo, vertical como um atum e horizontal como um golfinho. Além disto, é possível a utilização de orientações intermediárias da aleta, ou seja das superfícies estendidas, o que pode aumentar a manobrabilidade do veículo e consequentemente possibilitar movimentos mais complexos.

Figura 11. Robô bioinspirado em movimentos de um peixe. (a) Barbatanas e movimentos realizados por um peixe. (b) Concepção de um modelo computacional de um BAUV.



Fonte: Adaptado de (APARICIO-GARCÍA et al., 2020). Esta imagem foi adaptada para o português usando uma licença CC BY Creative Commons.

Outros exemplos, podem ser observados na Figura 12. Na Figura 12a, tem-se o robô subaquático hexápode *Aqua II*, que utiliza patas para se locomover em terra ou até mesmo para natação, podendo alcançar uma profundidade de 120 pés. Já na Figura 12b, observa-se o robô subaquático *CR200*, capaz de caminhar, tendo como seu objetivo de criação a inspeção de navios naufragados (RABELO, 2015).

Figura 12. Modelos bioinspirados para enfrentar ambientes terrestres e aquáticos. (a) Modelo hexápode AquaII criado em 2010. (b) Modelo terrestre e aquático CR200 criado em 2013.



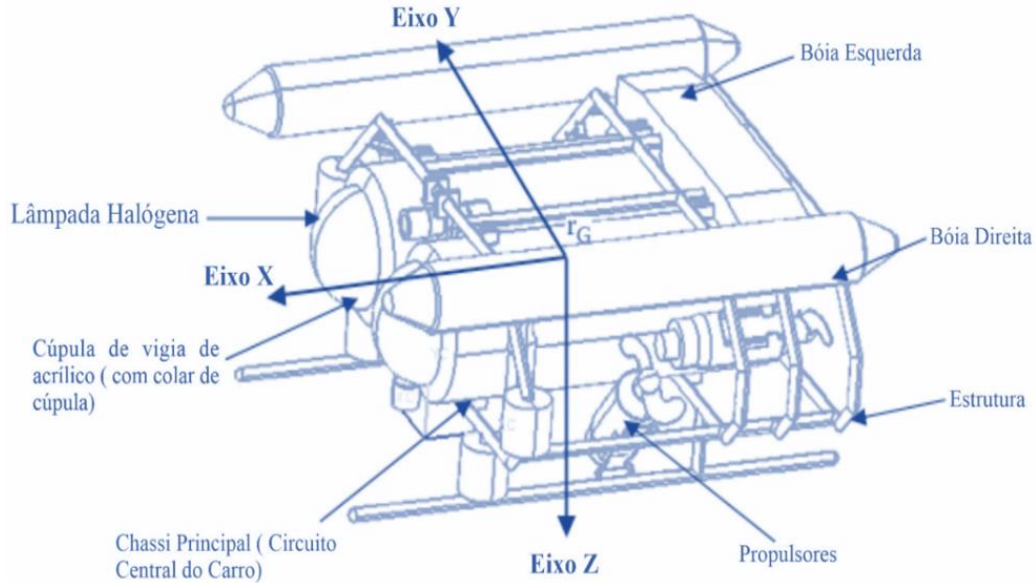
Fonte: adaptado de (RABELO, 2015).

4. NOÇÕES BÁSICAS DE MOVIMENTO E ELEMENTOS NECESSÁRIOS PARA PROJETO

Os veículos subaquáticos apresentam alguns itens necessários para sua construção e implementação, como pode ser visto na Figura 13. Por exemplo, precisam ter uma estrutura de suporte, com chassi; têm que ser à prova d'água, protegendo tudo que está em seu interior, principalmente os circuitos eletrônicos; precisam de boias que auxiliem em sua navegação; requerem lâmpadas halógenas (e provavelmente de outros tipos) para propiciar um campo de visão; precisam de partes em acrílico para permitir a visibilidade da câmera instalada; entre outras características.

Por se tratar de veículos submarinos, submetidos à pressão da coluna de água, a estrutura deve suportar a mudança de pressão conforme o aumento da profundidade, além de ter que permitir as manobras usuais sem afetar sua estabilidade. Para isto, tem-se em mente que os veículos ao navegar em água possuem 6 graus de liberdade que envolvem sua translação e rotação, o que precisa ser analisado em sua navegação. Estes movimentos são normalmente nomeados como mostrado na Tabela 3.

Figura 13. Design de um veículo subaquático simplificado do tipo ROV (classe de observação) e seus componentes.



Fonte: adaptado de (CHIN, 2013).

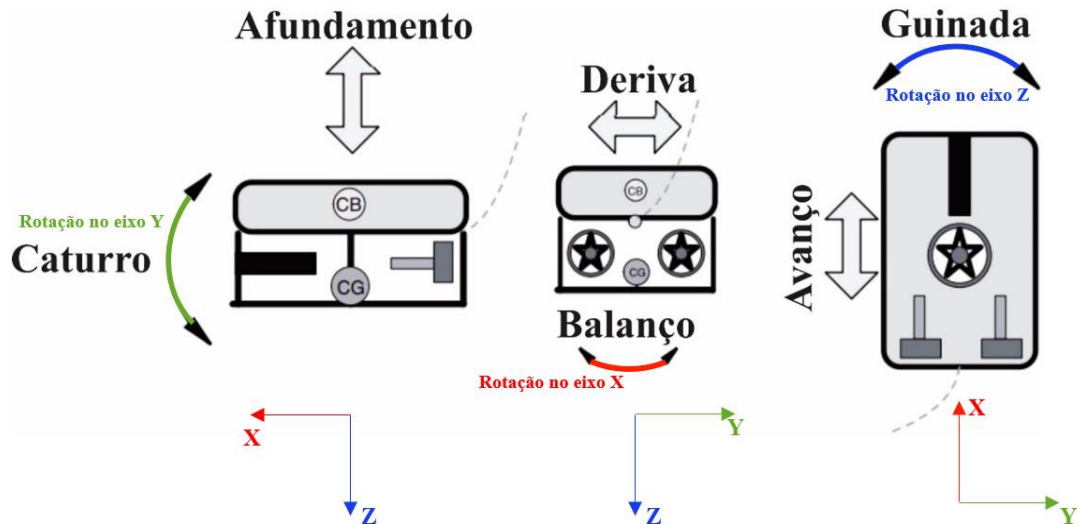
Tabela 3. Nomenclatura dos possíveis movimentos de um ROV.

| Eixo | Inglês | Português |
|------------------------|---------------|-------------------|
| Movimento em direção x | <i>Surge</i> | Avanço |
| Rotação sobre o eixo x | <i>Roll</i> | Balanço / Jogo |
| Movimento em direção y | <i>Sway</i> | Deriva |
| Rotação sobre o eixo y | <i>Pitch</i> | Caturro / Arfagem |
| Movimento em direção z | <i>Heave</i> | Afundamento |
| Rotação sobre o eixo z | <i>Yaw</i> | Guinada |

Na Figura 14 a seguir, é descrito conforme planos 2D (bidimensionais) como seriam esses movimentos. Quando o veículo submerso se movimentar nos diferentes planos formados

entre os eixos, cada movimento deve ser analisado de maneira acoplada ou desacoplada. Vale ressaltar que o eixo que falta na indicação de cada plano é onde ocorre o movimento de rotação.

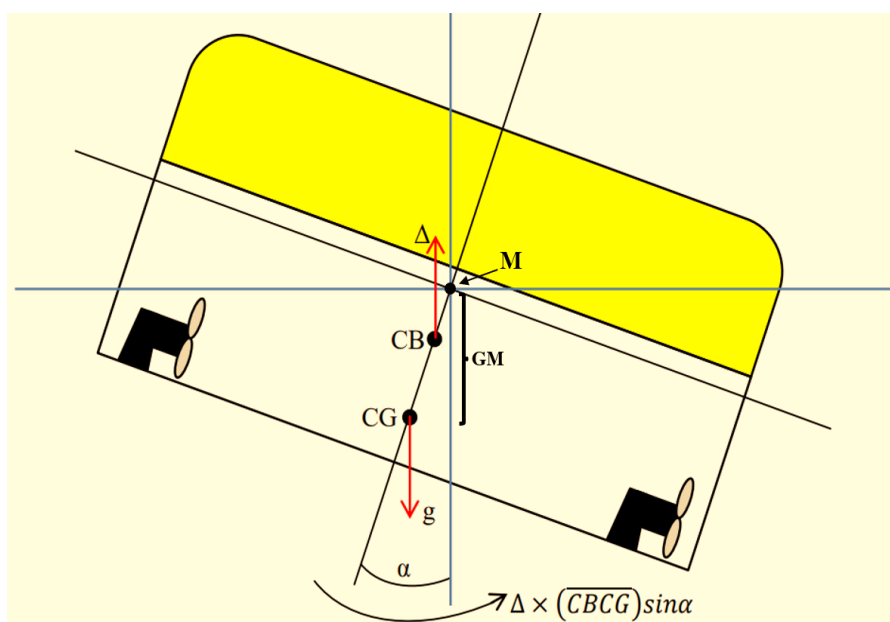
Figura 14. Movimentos principais de um robô subaquático



Fonte: adaptado de (MOLLAND, 2008).

A condição de flutuabilidade típica é ilustrada na Figura 15. Observa-se a vista transversal de um veículo subaquático onde está localizado o centro de gravidade (CG). O CG representa o ponto em que todo o peso está centrado. Por outro lado, o centro de flutuabilidade (CB) remete ao princípio de Arquimedes, sendo o ponto em que todas as forças de empuxo da água estão centradas. A localização e os valores do CG e CB estão relacionados à forma, ao peso e ao volume do veículo. O ponto onde o CB intersecta a linha central do objeto é denominado metacentro, indicado por M ainda na Figura 15, e sua distância vertical a partir do centro de gravidade (CG) é denominada de altura metacêntrica (normalmente escrita como GM). O equilíbrio do corpo flutuante em águas calmas, sem a influência de ondas nem correntezas, é determinado exclusivamente pela interação entre o peso do corpo, agindo para baixo através de seu CG, e o resultado das forças de empuxo, que são iguais em magnitude, ou seja, possuindo a mesma intensidade em relação ao peso do corpo e atuando para cima por meio do CB. Estas duas forças devem passar pelo mesmo eixo vertical, caso contrário o corpo não estará em equilíbrio. Geralmente, o CB deve estar localizado acima do CG, senão o corpo irá girar até obter um alinhamento vertical (AMORIM, 2020; CAPOCCI et al., 2017; MOLLAND, 2008).

Figura 15. Representação do metacentro, centro de gravidade e centro de flutuabilidade do veículo subaquático.



Fonte: Adaptado de (CAPOCCI et al., 2017).

Na projeção e desenho de veículos subaquáticos, a criatividade se torna essencial, tendo que só selecionar um procedimento de análise. Conforme (NORTON, 2013), é apresentar um formato de metodologia de projetos que pode ser visto na Tabela 4, possuindo dez etapas. A primeira etapa, identificação da necessidade, normalmente consiste em uma exposição vaga e parcialmente definida. Depois, na etapa 2 é realizada a pesquisa de suporte, incluindo o desenvolvimento das informações, sendo necessário definir e compreender completamente o problema. A terceira etapa consiste na definição de objetivos, estabelecendo as metas de maneira mais realista do que a primeira etapa. Na quarta etapa, são especificadas as tarefas, ocorrendo a criação de um conjunto de especificações de tarefas e atividades de forma detalhada, onde se fecha o problema e se limita seu alcance.

Já na quinta etapa, chamada de etapa de síntese ou de concepção e invenção, ocorre uma busca de alternativas de projetos, o quanto for possível, sem considerar nesta etapa seu valor ou qualidade, onde é possível gerar o maior número possível de soluções criativas. Na sexta etapa, chamada etapa de análise, as soluções anteriores são avaliadas e consideradas como aceitas, rejeitadas ou modificadas. Na etapa 7 (seleção), a solução mais promissora é selecionada. Após isto, o projeto é detalhado na etapa 8. Na etapa 9, protótipo e teste, é feita e testada a construção real do projeto, e, por fim, na etapa 10, se realiza a fabricação do veículo (NORTON, 2013).

Como em várias metodologias de desenho de tecnologias, este formato de metodologia pode precisar de iteração entre as diversas etapas ao longo de todo o processo, havendo diversas combinações possíveis e repetidas entre as etapas. Ou seja, não se deve projetar algo em forma linear; um retorno a etapas anteriores se faz necessário. Geralmente são seguidas três etapas para frente e duas ou mais para trás até que se encontre a solução mais ideal possível (NORTON, 2013).

Tabela 4. Metodologia de projetos.

| | |
|---|--|
| 1 – Identificação da necessidade | Exposição parcialmente definida e vaga do problema. |
| 2 – Pesquisa de suporte | Desenvolvimento das informações. |
| 3 – Definição dos objetivos | Exposição do problema de modo mais real. |
| 4 – Especificações de tarefas | Especificações que delimitam o problema, delineando o seu alcance. |
| 5 – Síntese | Busca por todas as alternativas possíveis, sendo chamada também de etapa de concepção ou invenção. É onde acontece também a estimativa de valor qualitativo. |
| 6 – Análise | Consiste em analisar as soluções da etapa anterior, aceitá-las, rejeitá-las ou modificá-las. |
| 7 – Seleção | Selecionar a alternativa mais adequada. |
| 8 – Projeto detalhado | Etapa onde os croquis são desenhados, os fornecedores são especificados, disponibilidade de materiais e especificações de planos de fabricação. |
| 9 – Protótipo e teste | Primeira construção do projeto real. |
| 10 – Produção | Manufatura em massa e onde se observa se a decisão trouxe resultados satisfatórios. |

Fonte: (NORTON, 2013; RABELO, 2015)

5. PROPULSÃO

5.1. Tipos de arrasto

As informações contidas nesta seção foram obtidas de (MOLLAND, 2008).

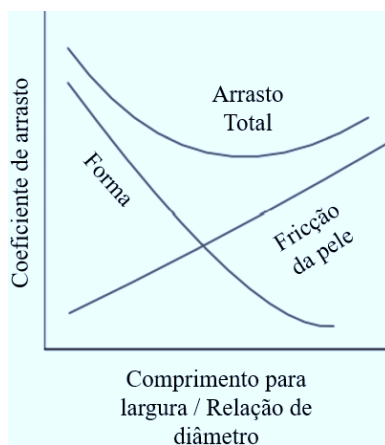
É possível destacar dois tipos básicos de arrasto em relação a todos os veículos e corpos subaquáticos: *skin friction drag* (traduzido como arrasto de atrito da superfície do veículo) e *form drag* (traduzido como arrasto da forma).

1 – Arrasto de atrito da superfície do veículo (*skin friction drag*): este é criado pelas forças de atrito entre a superfície externa do veículo submarino e a água. Nesta situação, o arrasto de cisalhamento viscoso de água fluindo tangencialmente sobre a superfície da pele contribui para a resistência do veículo. Sendo assim, em certos volumes de casco de veículo deseja-se reduzir a área de superfície tanto quanto possível. Além disto, necessita-se de uma superfície lisa, evitando aspereza e descontinuidades, e ter uma forma que varia lentamente para que nenhum gradiente de pressão adverso possa ser criado.

2 – Arrasto da forma (*form drag*): este é criado quando a água é movida para fora dando espaço ao corpo do veículo. Enquanto houver uma pressão acumulada sobre a proa do veículo submerso, a recuperação de pressão correspondente na popa é reduzida, resultando em uma resistência líquida na direção do movimento. No entanto, este arrasto de forma pode ser minimizado variando lentamente as seções ao longo de um corpo longo, sendo assim, tendendo um corpo em forma de agulha.

Na Figura 17 a seguir, o gráfico encontrado em (MOLLAND, 2008) representa a relação entre o coeficiente de arrasto descritos anteriormente e a variação do valor da razão entre o comprimento para largura / relação de diâmetro.

Figura 16. Dois tipos básicos de arrasto de um veículo subaquático



Fonte: adaptado de (MOLLAND, 2008).

Conforme pode ser observado na Figura 17, o autor apresenta uma relação de aspecto considerada ótima, onde o arrasto total formado pelo arrasto de forma e o atrito da pele são minimizados. Mas além disto, pode ser importante levar em consideração a praticidade de construir um veículo subaquático econômico, o que possivelmente atrapalha na obtenção do design considerado perfeito.

Com relação ao arrasto de atrito, um fator importante e determinante da condição de escoamento em torno de um corpo e seu efeito relativo de viscosidade do fluido pode ser avaliado por meio do “Número de Reynolds”. Este número expressa de forma adimensional

uma razão entre forças de inércia e forças viscosas em um fenômeno hidrodinâmico, e permite analisar a transição do fluxo laminar para a área turbulenta que ocorre em um ponto crítico do valor do número de Reynolds. O número de Reynolds pode ser calculado como segue:

$$Re = \rho V l / \mu = V l / \nu \quad (1)$$

sendo:

ρ – densidade do fluido [kg/m^3]

V – velocidade do fluido [m/s]

μ – coeficiente de viscosidade ou viscosidade dinâmica, definida como uma medida de resistência do fluido que está sendo deformado [kg/ms]

$\nu = \mu/\rho$ – viscosidade cinemática, é a relação entre viscosidade dinâmica pela densidade [m^2/s]

l – um comprimento característico do corpo [m]

Além disto, um fator adicional que pode ser considerado é a rugosidade da superfície do corpo, o que aumentará o arrasto de atrito.

Já para a curva arrasto de forma, uma variação em uma equação dinâmica pode ser utilizada para sua simulação. Em um ROV, há dois componentes que causam o arrasto típico, dificultando a saída do propulsor do veículo, que são: o arrasto de amarração e o arrasto do veículo. Os propulsores do veículo devem produzir um impulso suficientemente maior que o arrasto produzido pela corda e pelo veículo. Sabendo que o arrasto do sistema é uma medida mensurável e derivado por fatores hidrodinâmicos que incluem tanto o arrasto do veículo quanto da corda, o arrasto produzido por um ROV é baseado na seguinte fórmula:

$$\text{Arrasto do veículo} = \frac{1}{2} \rho A V^2 C_d \quad (2)$$

sendo:

ρ – densidade da água

A – Área característica na qual C_d , coeficiente de arrasto, é adimensionalizado. Para um ROV, A é definido como a área da seção transversal do veículo.

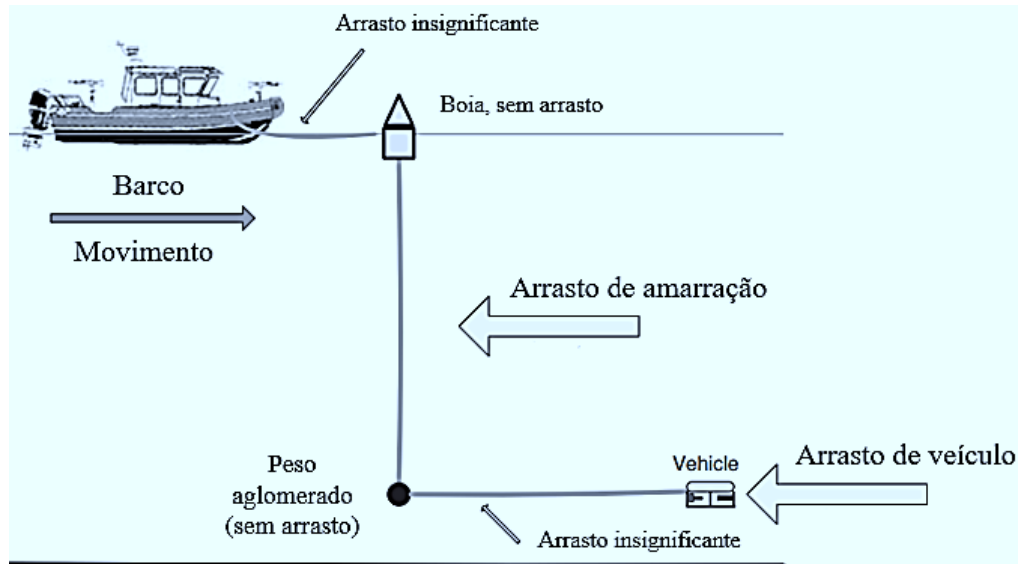
V – Velocidade em pés por segundo – (1 nó = 1,689 pés/segundo = 0,51 metros/segundo)

C_d – Coeficiente de arrasto adimensional, variando de 0,8 a 1 quando baseado na área da seção transversal do veículo.

O total de arrasto do sistema é igual a soma do arrasto do veículo com o arrasto da amarração como pode ser observado na Figura 18. Para o cálculo do arrasto de amarração, a área característica A (2) é calculada como o diâmetro do cabo em polegadas dividido por 12,

vezes o comprimento perpendicular ao fluxo. Já para o C_d , este valor pode variar conforme a carenagem do cabo. Mais detalhes podem ser encontrado em (MOLLAND, 2008).

Figura 17. Componentes do sistema de arrastos principais de um ROV.



Fonte: adaptado de (MOLLAND, 2008).

A partir disto, o sistema total de arrasto, sendo v o do veículo e u do cabo, pode ser definido como:

$$Arrasto\ Total = \frac{1}{2}\rho A_v V^2 C_{dv} + \frac{1}{2}\rho A_u V_u^2 C_{du} \quad (3)$$

Já para o cálculo da potência necessária para impulsionar um ROV, ela é calculada multiplicando seu arrasto e sua velocidade como segue:

$$Potência = Arrasto \times \frac{V}{550} \quad (4)$$

A constante no valor de 550 na equação (4) é um fator de conversão que transforma pés-libra/segundos em cavalo-vapor.

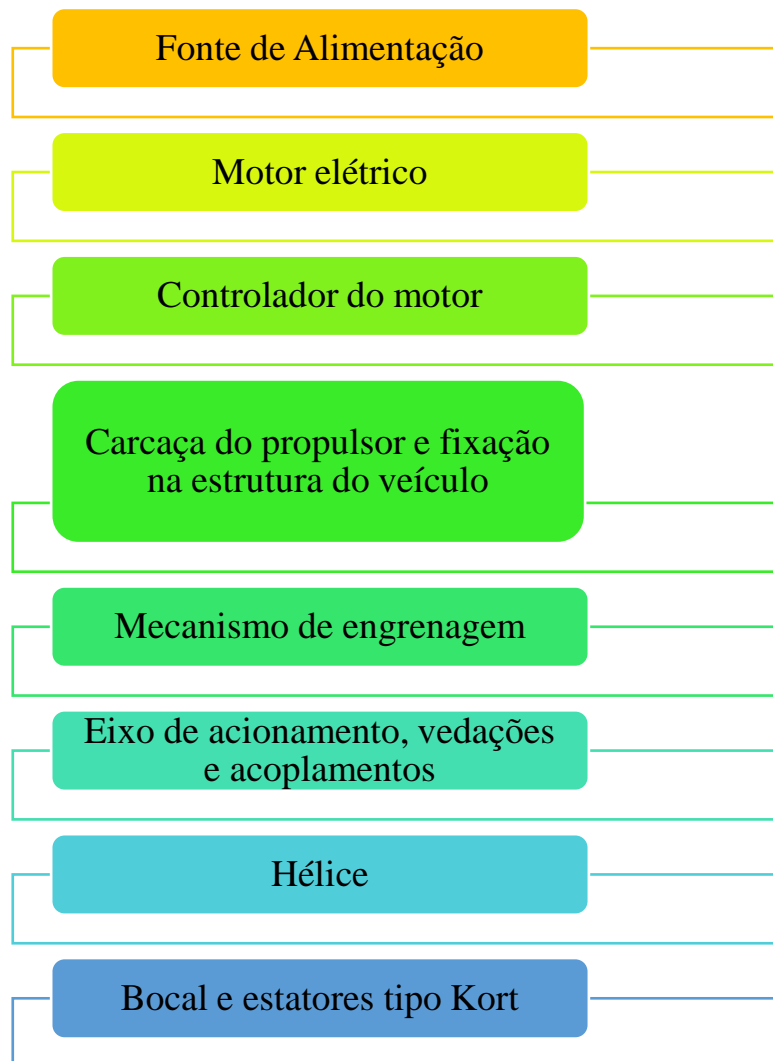
Vale ressaltar que todos os ROVs são sistemas lentos, desta forma, devem utilizar hélices que maximizem a potência em baixas velocidades, a fim de superar o arrasto total, sendo considerados como rebocador.

O sistema propulsivo de um ROV pode ser de três tipos: jato elétrico, hidráulico e duto propulsivo, adequando-se conforme for o tamanho do veículo e seu tipo de trabalho, mas em alguns casos, o local da tarefa pode influenciar na escolha do propulsor. Este sistema propulsivo é composto por dois ou mais propulsores que impulsionam o veículo possibilitando sua navegação para o local desejado, devendo ser posicionado de forma que permita uma manobrabilidade adequada/

Existem diversas opções de posicionamento para propulsores com objetivo de permitir vários graus de manobrabilidade. O arranjo utilizando três propulsores permite apenas frente/trás/guinada; já para o de quatro propulsores há também a translação lateral. O arranjo de cinco propulsores permite que todos os quatro propulsores horizontais empurrem em qualquer direção horizontal, de maneira simultânea.

Um projeto do propulsor elétrico subaquático deve ser composto por alguns componentes principais como lista a Figura 18 (MOLLAND, 2008):

Figura 18. Componentes principais de um propulsor elétrico.



Fonte: (MOLLAND, 2008)

5.2. Conceitos básicos de hélice

Um dos componentes de sistemas de propulsão mais comuns é o hélice, que consiste de um corpo giratório que projeta um movimento e vetoriza a água na direção aposta. Muitos hélices são projetados possuindo uma eficiência maior em uma direção do que na outra. Além disto,

eles têm uma velocidade nominal de máxima eficiência, que se espera estar próxima à velocidade normal de operação do veículo. Algumas hélices são projetadas para aplicações de velocidade, já outras para aplicações que requerem potência. Portanto, para sua seleção deve se saber o objetivo operacional do veículo em mente. (MOLLAND, 2008)

Vale ressaltar que todos os dispositivos de propulsão trabalham com o princípio de transmissão de impulso a um fluido de trabalho, conforme as leis de movimento de Newton (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017):

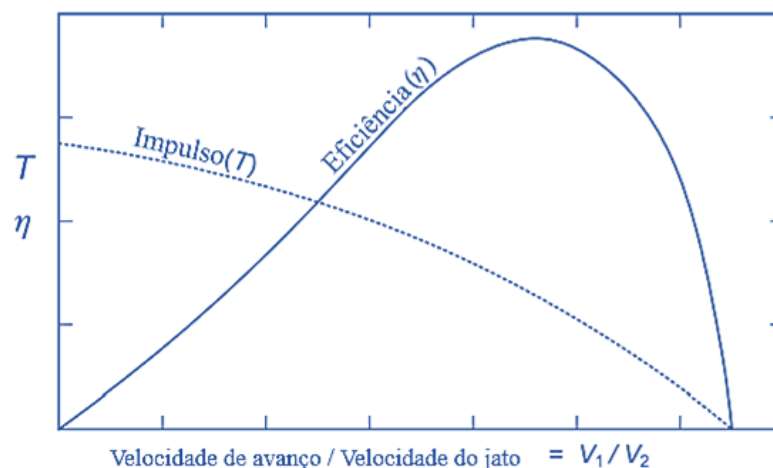
- a) A força que atua é igual à taxa de variação do momento produzido;
- b) Ação possui a mesma intensidade e é oposta a reação;

Suponha-se que o fluido que passa pelo dispositivo tenha uma velocidade aumentada de V_1 para V_2 pelo dispositivo, e o fluxo de massa por unidade de tempo através do dispositivo seja \dot{m} . Logo, o empuxo (T) produzido é dado pela taxa de mudança de impulso (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017):

$$T = \dot{m}(V_2 - V_1) \quad (5)$$

A tendência da eficiência da propulsão e as características gerais de um dispositivo de propulsão é basicamente descrito na Figura 19. Conforme a equação anterior, quando $V_1 \rightarrow V_2$, o empuxo tende a zero ($T \rightarrow 0$). Desta forma, quando a razão (Velocidade de avanço/velocidade do jato) = V_1/V_2 aumenta, o empuxo diminui. Existindo duas situações limites (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017):

Figura 19. Gráfico representativo da eficiência com base na razão entre velocidade de avanço e velocidade de jato.



Fonte: adaptado de (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017). Esta imagem foi adaptada para o português usando uma licença CC BY Creative Commons.

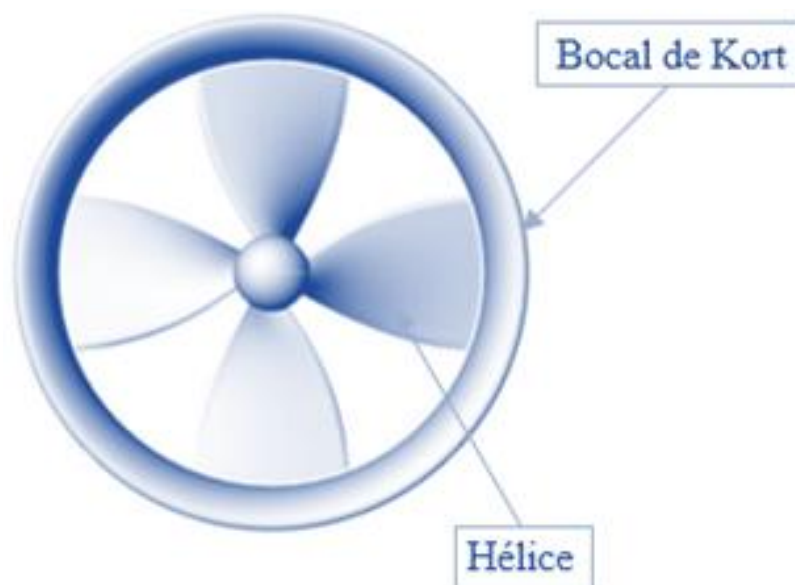
Sabendo que o cálculo de potência útil é $P = TV_1$. No primeiro caso, quando $V_1 = V_2$, o impulso é igual a zero, não tendo saída de potência útil, tendo a eficiência igual a 0. Já no

segundo caso, tem-se que $V_1 = 0$, embora tenha empuxo máximo, nenhum trabalho útil está sendo realizado. Mas entre essas duas condições, a eficiência η atinge um valor máximo para um valor da razão V_1/V_2 . Desta forma, deseja-se projetar uma propulsão que opere o mais próximo possível da condição de máxima eficiência. (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017).

5.3. Bocal de Kort

Outro item bastante comum no projeto do sistema propulsivo de veículos subaquáticos é um bocal ou tubulão que é colocado ao redor da hélice. Um tipo de bocal conhecido recebe o nome de bocal de Kort (Figura 20), recebendo este nome após a extensa pesquisa realizada por Kort no desenvolvimento destes dutos. Também podendo ser encontrado com o nome de tubulão, este objeto que envolve as pás da hélice ajuda na redução da quantidade de vórtices gerados à medida que a hélice gira em altas velocidades. Além disso, reduz a incidência de ingestão de objetos estranhos no propulsor e pode modificar a direção e velocidade do escoamento, melhorando a eficiência na propulsão (GHOSE; GOKARN, 2004; MOLLAND, 2008; MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017; VASCONCELOS, 2012).

Figura 20. Conjunto hélice e bocal de Kort

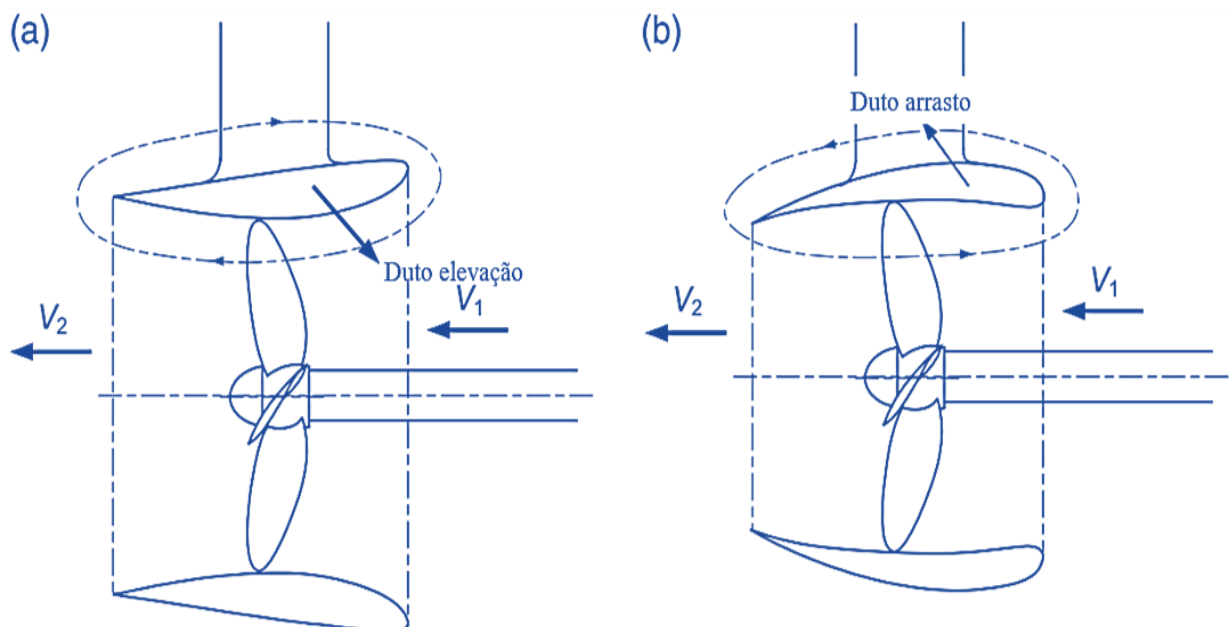


Fonte: adaptado de (VASCONCELOS, 2012).

Estes dutos em hélices são de dois tipos: de aceleração, que aumentam o fluxo de entrada para hélice, e os de desaceleração, que reduzem a velocidade do fluxo. O primeiro é frequentemente chamado de bico de Kort, e o segundo pode ser encontrado com o nome de jatos de bomba (*pump jet*), especialmente quando combinado com pás ou “estatores” (GHOSE; GOKARN, 2004)

Como pode ser visto na Figura 21a, a hélice com duto de aceleração fornece maior eficiência em condições de alta carga de impulso, com o impulso do duto aumentando o impulso do hélice melhorando a eficiência da propulsão. Na Figura 21 (b), no caso de duto de desaceleração, esse reduz a velocidade do fluxo dentro do duto. Este tipo de duto pode causar perda de eficiência e impulso, beneficiando o aumento da pressão, diminuindo a velocidade na hélice para reduzir a cavitação e sua irradiação de ruído associada. Exemplos de aplicações comuns deste tipo de duto são aplicações militares e de pesquisa, onde é requerido minimizar o ruído causado pelo propulsor (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017).

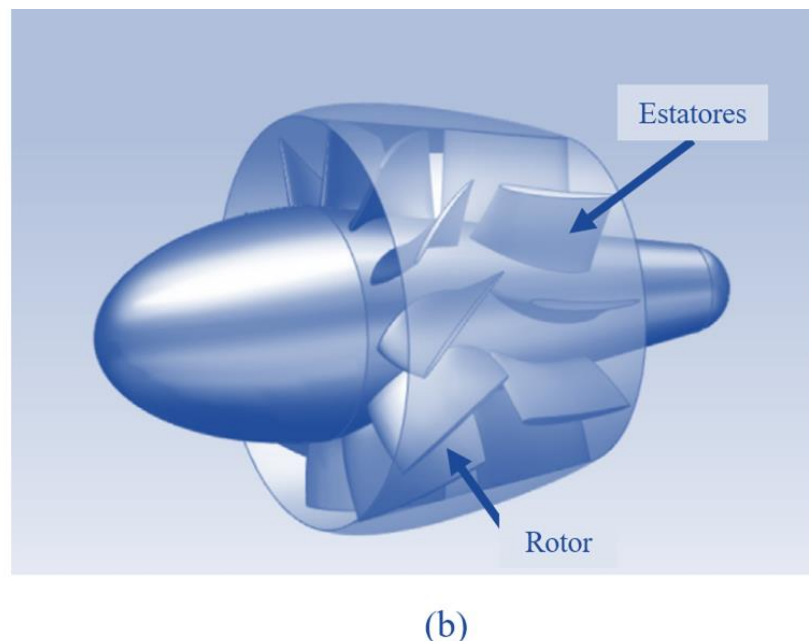
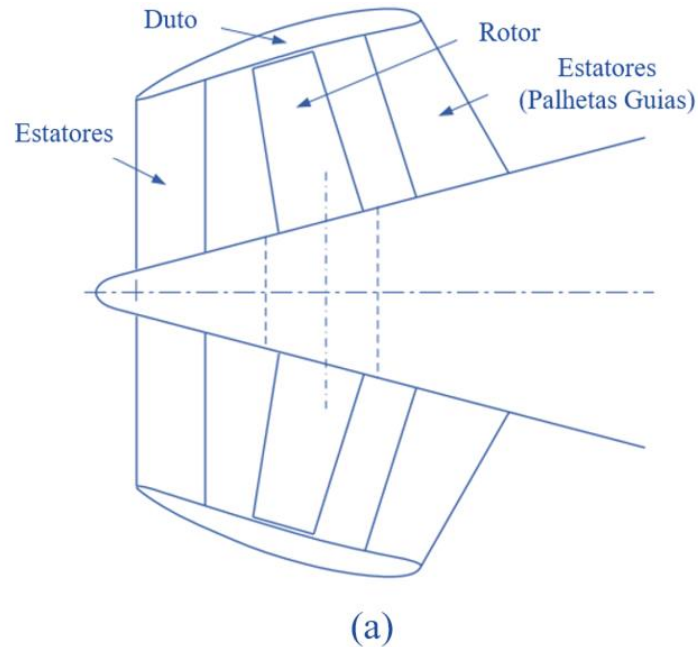
Figura 21. Hélice com duto. (a) Hélice canalizada (acelerando). (b) hélice canalizada (desacelerando)



Fonte: adaptado de (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017).

Na Figura 22, encontra-se um duto do tipo desaceleração, um jato de bomba, possuindo pré-turbilhão ou palhetas guias e estatores pós turbilhão, tendo tipicamente cerca de 15 a 20 pás de rotor e de 15 a 20 estatores, sendo que possui um número diferente de pás e estatores em cada fileira, sendo normalmente restrito a navios militares. Na Figura 22 (a) tem-se um exemplo da disposição das pás de estatores e do rotor, dentro do duto de desaceleração e na Figura 22 (b) um desenho tridimensional realizado de forma computacional mostrando a distribuição entre as pás (LU et al., 2016; MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017).

Figura 22. Exemplo de Jato de Bomba. (a) Duto com adição de estatores desenho bidimensional (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017). (b) Modelo computacional de um propulsor pump jet (LU et al., 2016).



Fonte: adaptado de (LU et al., 2016; MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017)

6. MODELAGEM DINÂMICA DO VEÍCULO SUBAQUÁTICO

Uma embarcação em alto mar está exposta ao vento, ondas e correntes e seus movimentos, considerando-a como um corpo rígido, ocorrem em 6 graus de liberdade (6DOF,

Degrees Of Freedom), que é um conjunto de deslocamentos e rotações, avaliados de maneira conjunta ou independente, que determinam completamente o deslocamento, posição e orientação da embarcação. As equações de movimento podem ser derivadas usando as equações de Newton-Euler ou de Lagrange que são usadas para modelar a dinâmica de navios, embarcações de alta velocidade, veículos subaquáticos e estruturas flutuantes operando sob ou na superfície da água (FOSSSEN, 2011).

Para modelar as forças e momentos externos que agem em uma embarcação marítima é necessário conhecer as seguintes abordagens:

Teoria das manobras (*maneuvering theory*): estudo de um navio se movimentando com velocidade positiva constante U em águas calmas. Na teoria de manobras, considera-se que os coeficientes hidrodinâmicos são independentes da frequência, ou seja, sem excitação das ondas. O modelo de manobras será em seu modo mais simples uma representação linear, enquanto as representações não lineares podem ser derivadas utilizando métodos como arrasto de fluxo cruzado, amortecimento quadrático ou expansões em série de Taylor. (FOSSSEN, 2011)

Teoria de navegação ou de comportamento no mar (*seakeeping theory*): onde os movimentos de navios, em velocidade zero ou constante em ondas, podem ser analisados usando teoria de navegação, na qual os coeficientes hidrodinâmicos e as forças das ondas são calculados em função da frequência de excitação da onda, usando geometria do casco e distribuição da massa. Estes modelos são normalmente derivados dentro de uma estrutura linear, enquanto a extensão para a teoria não linear é um campo de pesquisa importante. (FOSSSEN, 2011)

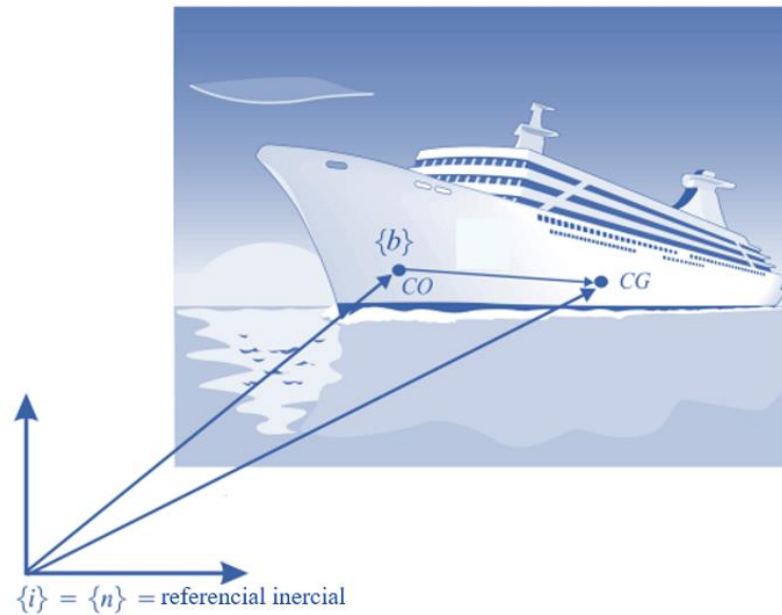
Para veículos subaquáticos operando abaixo da zona afetada pelas ondas, a frequência de excitação das ondas não afeta a massa hidrodinâmica e os coeficientes de amortecimento. Desta forma, a modelagem subaquática é geralmente feita com coeficientes hidrodinâmicos constantes semelhantes a um navio de manobra. (FOSSSEN, 2011)

É necessário estudar o movimento de corpos rígidos, incluindo aspectos hidrodinâmicos e hidrostáticos, normalmente expresso em um referencial fixo ao corpo, podendo ter a cinética de corpo rígido expressa em uma configuração vetorial de acordo com (CHIN, 2013; FOSSSEN, 2011):

$$M_{CR}\dot{v} + C_{CR}(v)v = c \quad (6)$$

No qual M_{CR} é a matriz de massa do corpo rígido, C_{CR} é a matriz de Coriolis de corpo rígido e centrípeta devido a rotação de $\{b\}$ em torno do referencial inercial $\{n\}$, como mostrado na Figura 23. $v = [u, v, w, p, q, r]$ é o vetor velocidade generalizada expresso em $\{b\}$ e $\tau_{CR} = [X, Y, Z, K, M, N]$ é um vetor generalizado de forças e momentos externos expresso em $\{b\}$.

Figura 23. Referencial inercial $\{n\}$ e referencial móvel do navio $\{b\}$.



Fonte: adaptado de (FOSSSEN, 2011).

Um corpo rígido é descrito pela sua posição e orientação tendo como referência o espaço tridimensional, ou seja, utilizando as coordenadas dos eixos X, Y e Z, que é supostamente fixo à terra e inercial medidas em m. Para determinar o vetor das coordenadas da posição do veículo em um referencial à terra, pode-se utilizar $\eta_1 \in \mathbb{R}^3$:

$$\eta_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (7)$$

Nota-se necessário lembrar que no eixo x, ou seja, no eixo longitudinal, tem-se positivo à frente, no eixo y, ou eixo transversal, tem-se positivo à direita, e por fim, no eixo z, eixo vertical, tem-se positivo para baixo o que pode ser exemplificado na Figura 24 (VAZ, 2015)

A partir disto pode-se resumir os sistemas de coordenadas como segue (GOULART, 2007), separadas entre coordenadas do sistema móvel, Figura 24, e sistema fixo, Figura 25 :

O_m – Origem do Sistema móvel (fixo em relação ao ROV).

X_m – Eixo longitudinal, positivo à frente, (fixo em relação ao ROV).

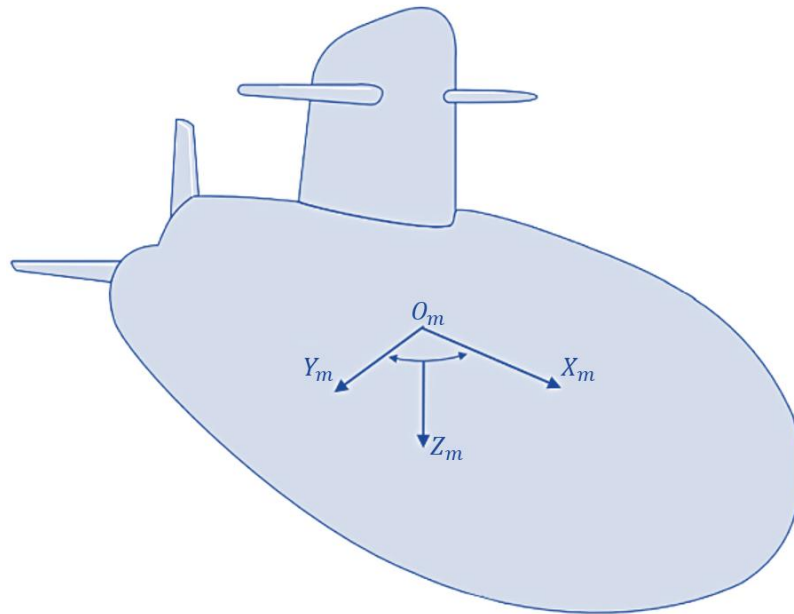
Y_m – Eixo transversal, positivo à direita, (fixo em relação ao ROV).

Z_m – Eixo vertical, positivo para baixo (fixo em relação ao ROV).

O – Origem do sistema (fixo em relação à Terra).

X, Y e Z - eixos (fixos em relação à Terra).

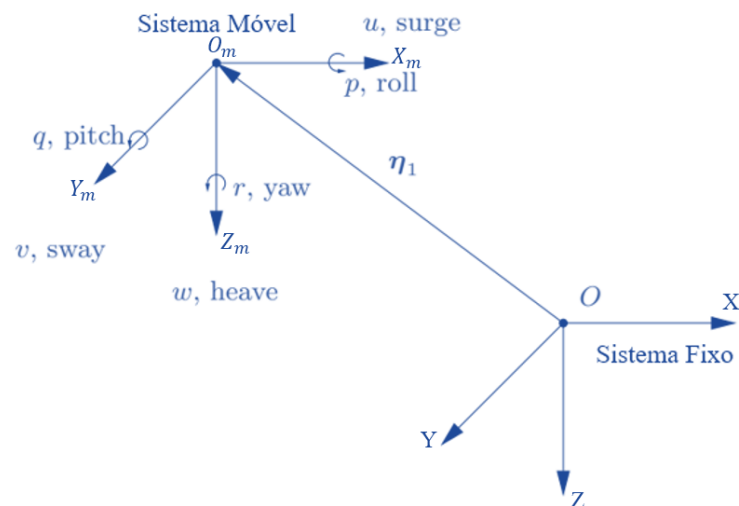
Figura 24. Eixos do sistema móvel e suas direções.



Fonte: adaptado de (ANTONELLI, 2006).

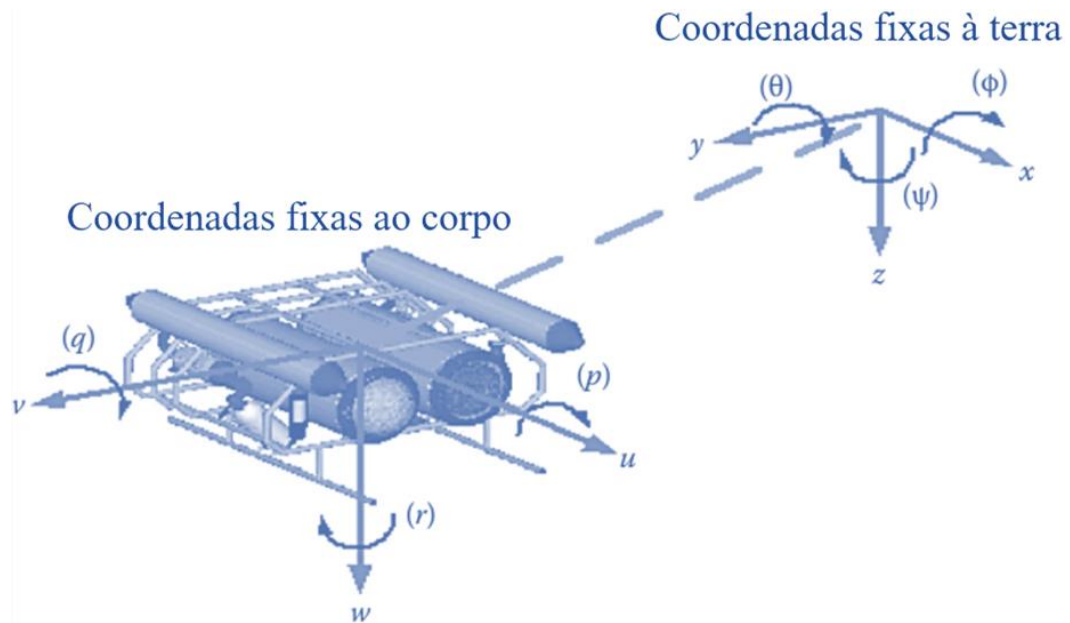
Já na Figura 25, podem-se analisar os dois sistemas, o sistema móvel que representa o veículo submerso e seus movimentos e o sistema fixo, tendo na Figura 26 a representação dos eixos em um modelo usual. Os movimentos realizados pelo veículo têm coordenadas tanto no sistema móvel quanto no sistema fixo, portanto as análises devem levar em consideração estes dois sistemas.

Figura 25. Sistema fixo na terra e sistema móvel do veículo subaquático



Fonte: adaptado de (ANTONELLI, 2006).

Figura 26. Exemplificação dos eixos fixos na terra e as coordenadas fixas ao sistema móvel do veículo subaquático.



Fonte: adaptado de (CHIN, 2013).

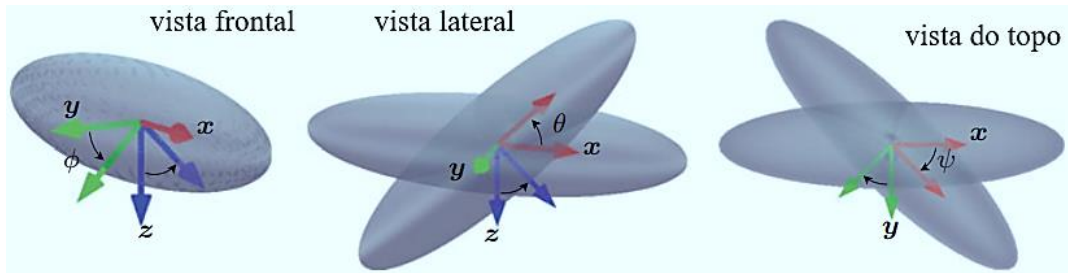
Além da posição e orientação, a inclinação faz parte da descrição de como o corpo rígido, neste estudo sendo um veículo subaquático, está no espaço. A partir disto, duas formas diferentes de representação podem ser introduzidas conforme (ANTONELLI, 2018): ângulos de Euler e parâmetros de Euler ou quaternion. Ainda conforme o autor, nas nomenclaturas marinhas, são utilizados os ângulos de Euler, enquanto que em diversas estratégias de controle o uso de quaternion são realizadas para evitar as singularidades ou dificuldade na representação que possa surgir ao usar os ângulos de Euler.

Para a inclinação, o vetor de coordenadas dos ângulos de Euler a um referencial fixo na terra pode ser definido como $\eta_2 \in \mathbb{R}^3$:

$$\eta_2 = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \quad (8)$$

Este vetor representa as rotações realizadas nos eixos, desta forma, tem-se o valor dos ângulos de jogo (*roll*) referente a rotação no eixo x , arfagem (*pitch*) referente a rotação no eixo y e, por fim, o ângulo de guinada (*yaw*) referente a rotação no eixo z . Figura 27, encontra-se um representação das rotações elementares em torno dos eixos x , y e z , dado em radianos.

Figura 27. Rotações elementares em torno dos eixos x, y e z no referencial fixo.



Fonte: (ANTONELLI, 2018).

Logo, tem-se o vetor de posição e inclinação do veículo subaquático ao centro da terra de acordo com (ANTONELLI, 2018; CHIN, 2013; FOSSEN, 2011; VAZ, 2015) como:

$$\eta = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} \text{ no qual: } \eta_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \text{ e } \eta_2 = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \quad (9)$$

sendo η_1 posição do veículo em metros e η_2 a sua orientação em radianos.

Podendo ter como representação das velocidades lineares e angulares a derivada em relação ao tempo dos vetores anteriores, ou seja, de acordo com (CHIN, 2013; VAZ, 2015) como:

$$\dot{\eta} = \begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} \text{ no qual: } \dot{\eta}_1 = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} \text{ e } \dot{\eta}_2 = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \text{ (sistema fixo)} \quad (10)$$

Estas velocidades serão representadas em metros por segundo e em radianos por segundo e em relação ao sistema móvel são (VAZ, 2015):

$$v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}, \quad v_1 = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}, \quad v_2 = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \text{ (sistema móvel)} \quad (11)$$

6.1. Equações de movimento

Dois modelos dinâmicos para ROV podem ser utilizados para simular os movimentos como destaca (GOULART, 2007), o primeiro é:

$$\dot{v} = M^{-1} \begin{bmatrix} E_H + E_{GB} + E_P + E_C - E_I \\ T_H + T_{GB} + T_P + T_C - T_I \end{bmatrix} \quad (12)$$

sendo:

\dot{v} – aceleração de translação e rotação do ROV no sistema móvel;

M – matriz de inércias;

E_H e T_H – empuxos e torque de arraste hidrodinâmico [N e Nm];

E_{GB} e T_{GB} – empuxos e torques de restauração, gerados pela interação entre os efeitos de gravidade e de flutuação [N e Nm];

E_P e T_P – empuxos e torques resultantes do conjunto de propulsores [N e Nm];

E_C e T_C – empuxos e torques causados pelo cabo umbilical [N e Nm];

E_I e T_I – empuxos e torques inerciais [N e Nm];

No segundo modelo, a dinâmica do ROV pode ser descrita como:

$$M_{CR}\dot{v} + C_{CR}(v) = -M_A\dot{v} - C_A(v)v - D_L v - D_Q v|v| + G(\eta) + \tau_{PRO} + \varepsilon \quad (13)$$

sendo (GOULART, 2007; VAZ, 2015):

M_{CR} – matriz das inércias do corpo rígido;

C_{CR} – matriz das forças centrípedas e de Coriolis do corpo rígido;

M_A – matriz da inércia adicional;

C_A – matriz das forças centrípedas e de Coriolis adicional;

D_L e D_Q – matriz de forças devido ao atrito / matriz de arraste linear e quadrático;

$G(\eta)$ – matriz das forças restauradores e gravitacionais / vetor força-momento de restauração do ROV (peso/flutuação);

\dot{v} – aceleração referenciada ao próprio veículo

v – velocidade referenciada ao próprio veículo;

η_2 – posição referenciada ao sistema fixo;

τ_{PRO} – vetor de força-momento aplicado pelos propulsores;

ε – vetor das perturbações devidas à dinâmica do cabo e à correnteza marinha ($\dot{\eta}_c$).

Conforme (FOSSSEN, 2011) deve se observar que na equação (13) o vetor de velocidade do veículo v é medido tomando relação a velocidade do fluido na qual ele esteja navegando. Logo, pode-se considerar um correnteza com velocidade constante.

6.2. Características físicas e eficiência do veículo

6.2.1. Simetria do veículo e matriz de inércia

No estudo para parametrização das matrizes da seção anterior, pode-se encontrar dificuldades, necessitando de equações relativamente complexas dependendo da forma do veículo. Podendo ser utilizados ferramentas computacionais, como realizado nos trabalhos de (CHIN, 2013; VAZ, 2015). Nestes trabalhos, estima-se os valores gerados pela massa do veículo e sua influência em cada eixo.

Vale ressaltar que conforme (FOSSEN, 2002, 2011), a matriz de inércia M , equação (12) é uma matriz com dimensão de 6×6 . Mas, com base na característica física do veículo subaquático, pode haver simplificação em sua forma, ou seja, a possibilidade de desprezar os termos menos significativos. Ou seja, a forma do veículo, mais especificamente a sua simetria, a matriz M pode ser simplificada, podendo ser rescrita das seguintes formas, reduzindo a quantidade de termos a serem calculados (FOSSEN, 2011; GOULART, 2007):

1. Matriz de massas para veículos com simetria no plano xy (simetria base/topo):

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & 0 & 0 & 0 & m_{61} \\ m_{21} & m_{22} & 0 & 0 & 0 & m_{62} \\ 0 & 0 & m_{33} & m_{43} & m_{53} & 0 \\ 0 & 0 & m_{43} & m_{44} & m_{45} & 0 \\ 0 & 0 & m_{53} & m_{54} & m_{55} & 0 \\ m_{61} & m_{62} & 0 & 0 & 0 & m_{66} \end{bmatrix} \quad (14)$$

2. Matriz para veículos com simetria no plano xz (simetria entre os bordos)

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & m_{13} & 0 & m_{51} & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 & m_{42} & 0 & m_{62} \\ m_{31} & 0 & m_{33} & 0 & m_{53} & 0 \\ 0 & m_{42} & 0 & m_{44} & 0 & m_{46} \\ m_{51} & 0 & m_{53} & 0 & m_{55} & 0 \\ 0 & m_{62} & 0 & m_{64} & 0 & m_{66} \end{bmatrix} \quad (15)$$

3. Matriz para veículos com simetria no plano yz (simetria proa/popa)

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 & 0 & m_{51} & m_{61} \\ 0 & m_{22} & m_{23} & m_{42} & 0 & 0 \\ 0 & m_{32} & m_{33} & m_{43} & 0 & 0 \\ 0 & m_{42} & m_{43} & m_{44} & 0 & 0 \\ m_{51} & 0 & 0 & 0 & m_{55} & m_{56} \\ m_{61} & 0 & 0 & 0 & m_{65} & m_{66} \end{bmatrix} \quad (16)$$

4. Matriz para veículos com simetria no plano xz e no plano yz (simetria entre bordos e entre proa/popa)

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 & 0 & m_{51} & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 & m_{42} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{42} & 0 & m_{44} & 0 & 0 \\ m_{51} & 0 & 0 & 0 & m_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{66} \end{bmatrix} \quad (17)$$

5. Matriz de massas para veículos com simetria no plano xz , no plano yz e no plano xy (simetria entre bordos, proa / popa e entre base/topo)

$$M = \text{diag} \{m_{11}, m_{22}, m_{33}, m_{44}, m_{55}, m_{66}\} \quad (18)$$

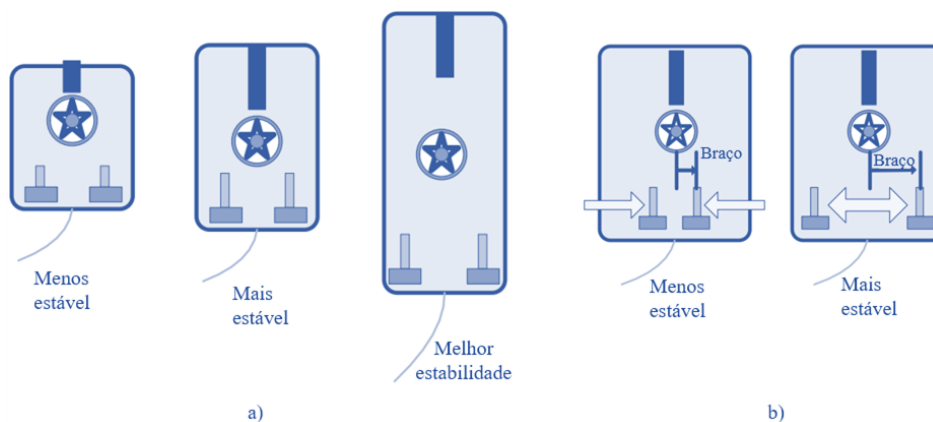
6.2.2. Estabilidade e forma

Esta seção foi desenvolvida com base nas informações contidas em (MOLLAND, 2008).

Segundo o autor da obra, nos veículos remotos de classe de observação, normalmente quanto maior for seu tamanho mais estabilidade este possui, o que significa maior facilidade em controlar. Desta forma, quanto menor a estabilidade estática mais problemas de controle devem ocorrer.

Além disto, ainda com base no autor, as características de projeto afetam a estabilidade do veículo submarino ao longo do eixo variável como pode ser analisado na Figura 28. A ‘proporção de aspecto’ (ou seja, o comprimento médio total do veículo versus largura média total do veículo) determina a estabilidade do casco do veículo assim como a colocação do propulsor. Por exemplo, a maioria dos projetistas de submarinos de ataque, para uso militar, utilizam a relação de aspecto 7:1 como a ideal para a relação manobra-estabilidade. Mas para o ROVs, a proporção ideal e a colocação do propulsor dependerão das estipulações de velocidade máxima do veículo, junto com a necessidade de manobra em espaços confinados. Na Figura 28(a), é possível observar a comparação na proporção de aspecto, na medida que esta proporção é alterada também haverá uma alteração em sua estabilidade, podendo favorecer ou prejudicar nas manobras do veículo. Enquanto da Figura 28(b), a distribuição da propulsão também acarretará em alterações na estabilidade, tornando o veículo mais ou menos estável, sendo mais estável aquele com melhor distribuição, que conforme a figura seria com o valor da distância, denominada braço (*arm*), maior.

Figura 28. Influência das características físicas do veículo em sua estabilidade. (a) Influência na proporção da dimensão na estabilidade do veículo submerso. (b) Influência da distância entre os propulsores na estabilidade do veículo submerso.



Fonte: adaptado (MOLLAND, 2008).

7. DISCUSSÕES: DESAFIOS PARA IMPLEMENTAÇÃO NA REGIÃO AMAZÔNICA E POSSÍVEIS SOLUÇÕES

Nos capítulos anteriores, foram descritos alguns conceitos básicos de veículos subaquáticos. O presente capítulo considera esses conceitos para discutir possíveis limitações e oportunidades para utilizar veículos subaquáticos na região amazônica.

Embora os corpos de água da região amazônica possuem características específicas e diferentes das águas do mar, os parâmetros gerais devem ser seguidos no projeto e construção de veículos subaquáticos para exploração nessas áreas. Há quatro pontos que podem ser destacados para os futuros estudos: a *turbidez do ambiente*, a *correnteza dos rios*, a *diferença de dimensões dos canais* e a *biodiversidade*, a qual precisa ser conservada.

Turbidez do ambiente. Como exemplo, na Figura 29 pode ser observado o ponto de turbidez das águas, na região do chamado “Encontro das águas”. Nota-se a união de dois rios, Rio Negro e Rio Solimões, com cores e características diferentes na região do Amazonas, Brasil. Desta forma, um veículo subaquático nesta região deverá enfrentar a dificuldade na variação de cor e turbidez. Para isto, pode ser importante desenvolver um veículo com fator de segurança para sua visibilidade, levando em consideração os ambientes mais hostis da região de estudo.

As águas do Rio Negro são negras por possuir grande quantidade de ácidos húmicos, possuindo um pH ácido (<5) e temperatura anual média em torno de 30°C, mas Rio Solimões possui águas brancas devido ao volume de sedimento em suspensão, tendo pH igual a 7, sua temperatura varia em torno de 29°C. (NASCIMENTO, 2016)

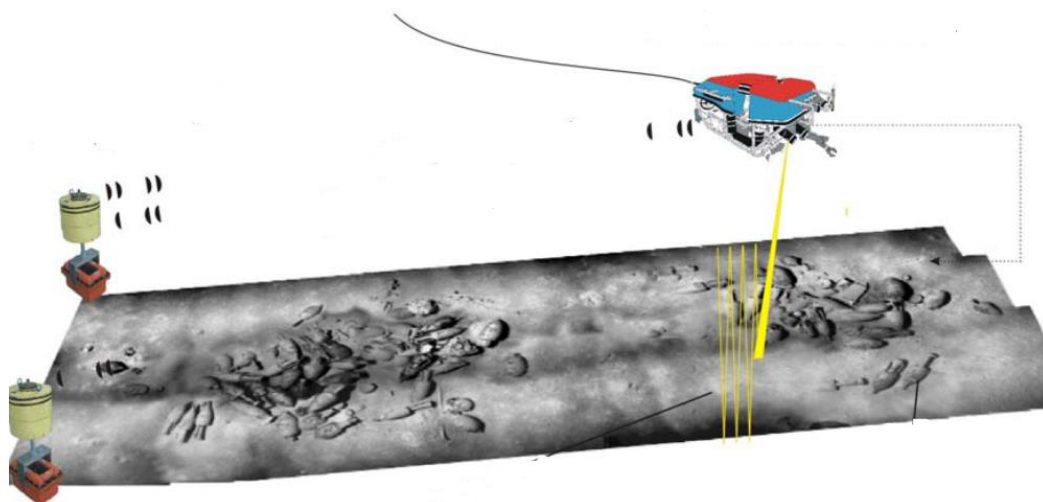
Figura 29. Confluência dos Rios Negro e Solimões, Amazonas, Brasil.



Fonte: (NASCIMENTO, 2016). Imagem usada com a licença CC BY Creative Commons.

Devido às possíveis limitações de captura de imagens nestas regiões, algumas alternativas têm sido baseadas em tecnologias de sensores e sistemas de navegação baseados em sinais de som (acústicos) para manter a posição e de identificar de objetos. Um exemplo de navegação de um ROV utilizando um sistema de navegação acústico é mostrado na Figura 30. Essa aplicação é muito utilizada em exploração arqueológica (FOLEY AND MINDELL, 2002), onde utilizam técnicas de micro batimetria para determinar a forma do fundo e objetos.

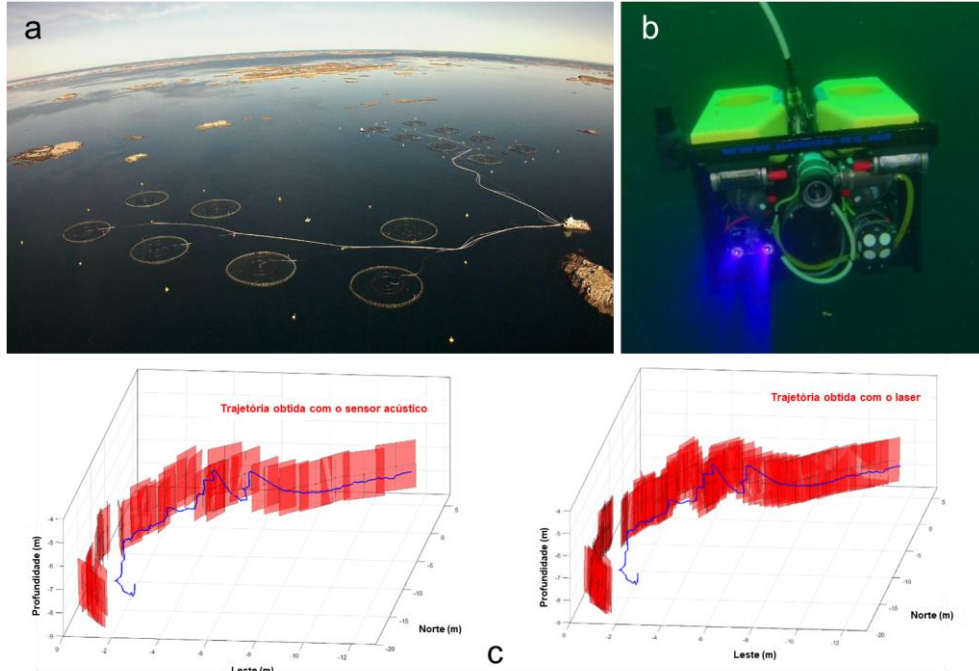
Figura 30. ROV realizando pesquisa arqueológica, utilizando um sistema de navegação acústico (baseado em sinais de som).



Fonte: (FOLEY; MINDELL, 2002). © David Mindell, MIT DeepArch.

Pesquisa mais recente tem demonstrado o uso de tecnologias baseadas em triangulação laser-câmera para estimativa de posição e permitir o seguimento de trajetória para veículos subaquáticos. Recentemente, (BJERKENG et al., 2021) testou esta tecnologia em um ROV para monitoramento de piscicultura em um laboratório de cultivo de peixes na Noruega (Figura 31a). Os dados 3D de triangulação a laser (Figura 31b) foram comparados experimentalmente com dados de um velocímetro acústico Doppler (DVL), como mostrado na Figura 31c. Foi demonstrado que o sistema é comparável em desempenho a um DVL para medições de distância e pose angular e que a triangulação a laser é promissora como um sensor de alcance de curta distância para veículos autônomos a um baixo custo em comparação com sensores acústicos.

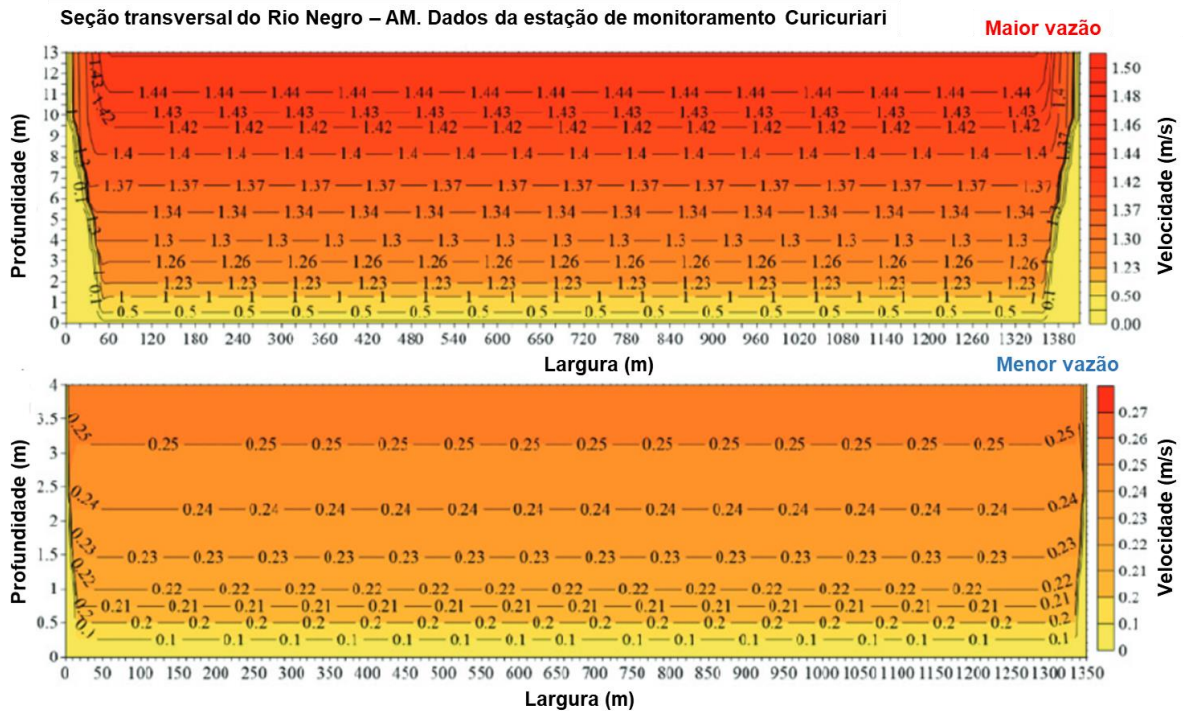
Figura 31. Exemplo do uso de tecnologias laser-camara para definir a trajetória de veículos subaquáticos autônomos para monitorar atividades de piscicultura na Noruega. (a) Estação de cultivo de peixes SINTEF-ACE na Noruega. (b) ROV com câmera e tecnologia laser. (c) Mapeamento dos planos e trajetória utilizando dados do sensor acústico e o sistema laser-camara.



Fonte: Adaptado de (BJERKENG et al., 2021). As imagens foram parcialmente modificadas, utilizando a licença CC BY Creative Commons (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Correnteza dos rios. O segundo ponto, tem-se a questão da correnteza variável dos rios. Na região amazônica a profundidade e boca dos rios é variável pois não têm seções cimentadas. Além disso, as atividades de transporte com embarcações geram ondas que causam erosão. Os próprios rios possuem uma velocidade que influencia contribuindo ou dificultando o movimento de um corpo em sua região, ainda no exemplo da Figura 29. Os trechos do rio Solimões e do Rio Negro possuem velocidade diferentes, a velocidade média do primeiro é de $1,25 \text{ m/s}$, já no curso inferior do Rio Negro tem-se uma velocidade média em torno de $0,4 \text{ m/s}$. (NASCIMENTO, 2016). A Figura 32, mostra uma representação aproximada da distribuição de velocidades de uma seção transversal do Rio Negro nas épocas de maior e menor vazão. Esses dados foram obtidos de medições tomadas na estação de monitoramento Curicuriari, no norte do Estado do Amazonas. Mais detalhes podem ser encontrados em (CRUZ; BLANCO; BRASIL JUNIOR, 2019).

Figura 32. Contornos e regiões de velocidade da correnteza em uma seção transversal do Rio Negro, no estado do Amazonas, localizada na posição da estação de monitoramento Curicuriari. Dados representativos para a época de maior vazão (acima) e menor vazão (embaixo).



Fonte: (CRUZ; BLANCO; BRASIL JUNIOR, 2019). As imagens foram adaptadas para o português usando uma licença CC BY Creative Commons.

Diferença das dimensões dos canais. Como introduzido anteriormente, outra característica importante é a diferença da forma do canal ao decorrer dos rios, como pode ser visualizado na Figura 33, um exemplo que pode ser identificado é o canal entrelaçado, divisões e conexão de canais que contornam barras de sedimento aluviais, apresentando sinuosidade. As definições simples de tipos de canais, seja retilíneo, medrante e entrelaçado podem ser difíceis de aplicar em grandes rios, pois, estes rios são dominados por padrões “*anabranching*”, ou seja, multicanais que apresentam uma diversidade de grupo de rios aluviais, possuindo canais múltiplos e interconectados, separado por ilhas que dividem seu fluxo (NASCIMENTO, 2016).

A partir disto, tem-se a possível necessidade de um sistema com bastante estabilidade, manobrabilidade e comunicação rápida, ou seja, o controle e ação do veículo deve suprir a diversidade dos canais em tempo hábil, para que evite a colisão com a diversidade de flora e fauna da região amazônica. Então, é preciso realizar manobras adequadas conforme a sua utilização, sem prejudicar a pesquisa ou causar danos ao veículo projetado nem ao ambiente.

Nesta região um veículo autônomo aparenta ser mais difícil de se aplicar, pois antes de programá-lo se torna necessário o estudo detalhado das regiões onde se aplicará, para determinar os movimentos e sensores necessários. É importante mencionar que existem poucas batimetrias feitas na região amazônica (FILHO et al., 2019) o que complica ainda mais a definição das áreas de atuação. Desta forma, a primeira solução que se torna aceitável para fazer essa exploração seja a utilização de um ROV, um veículo controlado para que o operador pilote

e desenvolva o estudo, pois a falta de informações e dados de fácil acesso nestas regiões é uma limitante. A partir disto, é preciso primeiramente possuir estes dados por meio de, por exemplo, um ROV de observação.

Figura 33. Trechos dos rios Negro e Solimões entre os municípios do Amazonas.



Fonte: adaptado de Google Earth. Imagem usada com a licença CC BY Creative Commons.

Biodiversidade. Por fim, a biodiversidade na região amazônica é um dos aspectos mais importantes a considerar, pois é bem sabido que existem áreas de conservação ambiental assim como uma variedade imensa de espécies de flora e fauna. Na região é possível encontrar diversas espécies de peixes e outros tipos de animais, então um veículo subaquático pode causar impactos negativos ou incomodar as espécies do ambiente. Um ROV de observação, por exemplo, poderia ter aspectos negativos pois possivelmente causará ruídos, causando interferência no ambiente. Embora os AUV sejam tecnologicamente mais avançados que os ROVs, estes podem apresentar limitações que dificultam sua utilização na implantação dos rios, pois dependem de energia própria além de uma inteligência artificial suficientemente adequada para enfrentar os ambientes complexos pelos quais podem executar suas tarefas. Então na primeira visão de possibilidades em resolver esta exploração da forma mais adequada, pode ser necessário trabalhar em etapas.

Sendo a primeira etapa o recolhimento de dados, por meio de um ROV de observação, tais como micro-batimetrias de regiões específicas (ver Figura 30 acima). Após recolher os dados mais importantes, a segunda etapa seria por meio de observação de um AUV, que diminuiria o ruído e outros aspectos negativos, podendo ser menor e com estabilidade mais adequada. Após isso, a solução final seria por meio dos dados obtidos e aspectos observados, desenvolvendo um BAUV - *Biomimetic Autonomous Underwater Vehicle*, inspirado nos próprios animais encontrados, com a intenção de diminuir significativamente seu aspecto

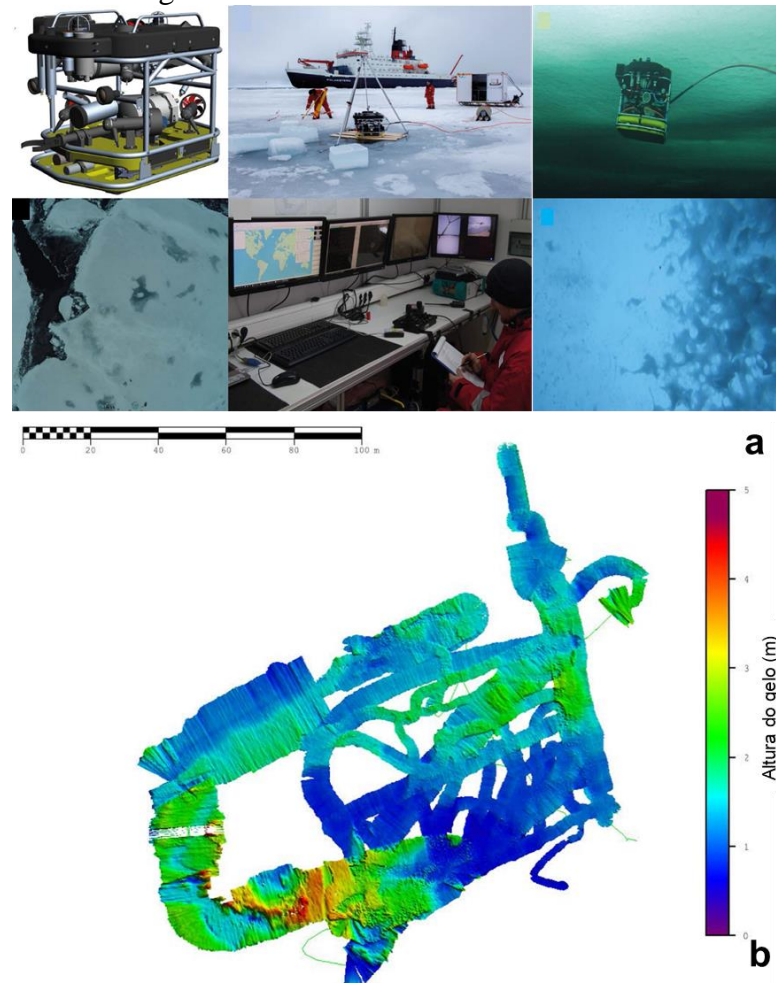
negativo e apresentar ferramentas futuras para as mais variadas aplicações na exploração daquele ambiente.

A modelagem da dinâmica do veículo subaquático é essencial para o desenvolvimento de um simulador deste mecanismo no ambiente desejado (VAZ, 2015). A partir disto, nota-se que uma possível solução para implementar o melhor veículo nesta área seja primeiramente modelá-lo através de simulador de manobras, incrementando as formulações padrões quanto à dinâmica do corpo do veículo e o fluido pelo qual ele esteja navegando. Com a ajuda de computação gráfica pode-se simular o ambiente e manobras que o veículo deverá realizar nas suas operações.

A investigação das melhores condições de estabilidade encontra-se conforme abordada no capítulo 6. Um veículo que possua simetria entre os eixos principais, reduzindo a complexidade de suas manobras e efeitos causados. Além de ser desejado um equilíbrio na distribuição dos pesos, causados pelos equipamentos internos e os propulsores. Além disto, se torna extremamente necessário o projeto de tubulão, para otimizar a propulsão e proteger também os hélices. Pode ser necessário também sensores extras por conta da coloração das águas e os minerais que nelas se encontram. Tem-se a possibilidade de que simples câmeras ou lanternas não possam ser suficientes. Ou seja, alternativas para melhorar a eficiência de um simples veículo remoto tradicional seriam utilizar teorias com base na natureza local, ou até mesmo veículos bioinspirados já existentes como base. Também, poderiam ter sensores de turbidez para elevar e diminuir a potência da lanterna quando for necessário; lâmpadas de diversos tipos de luz, ou até mesmo sensores de som ou laser para auxiliar no controle, já que a velocidade do som, como visto anteriormente, é amplificada em regiões aquáticas, o que facilita a utilização de sensores de distância com base sonora.

Para finalizar a presente discussão, a Figura 34 apresenta um exemplo de ROV, equipado com diversos tipos de sensores, adequado para realizar pesquisas de exploração em ambientes extremos. Nesse caso, veículo foi desenvolvido para a pesquisa em ambientes polares extremos embaixo de água congelada durante uma campanha de pesquisa no ano 2016, no Ártico (Figura 34a). Um sistema modular permite a operação de diversos sensores por 3 operadores. O veículo está equipado com sensores óticos e acústicos para avaliar parâmetros físicos, químicos e biológicos da região de interesse. A Figura 34b mostra os resultados do mapeamento de gelo feito por um dispositivo sonar. Este tipo de estudos mostra que já existem tecnologias e sensores que poderiam ser adaptados para superar os desafios que podem existir durante possíveis atividades de exploração subaquática na região amazônica.

Figura 34. Exemplo de aplicação de pesquisa subaquática com um ROV em ambientes extremos. Os avanços na tecnologia de sensores permitem o mapeamento de regiões submersas. (a) Fotos ilustrativas do ROV e da sua operação. (b) Mapeamento da superfície do gelo submerso utilizando tecnologia de sonar.



Fonte: (KATLEIN et al., 2017) Imagens usadas com a licença CC BY Creative Commons.

8. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.

Neste trabalho foram apresentados alguns dos conceitos básicos de projeto e operação de veículos subaquáticos não tripulados existentes no mundo, esperando que possam servir como base para possíveis desenvolvimentos de projetos no Brasil. Também, foram discutidas as limitações e alternativas que podem existir para desenvolver e utilizar veículos subaquáticos para atividades nos rios da região amazônica, que possui a maior bacia hidrográfica do mundo, mas que tem sido pouco explorada. As principais conclusões deste trabalho são listadas a continuação:

- Existem duas principais alternativas de veículos submarinos que podem ser consideradas: veículos operados remotamente (ROVs) e veículos operados de maneira autônoma (AUVs). Embora os AUVs possam requerer tecnologias mais sofisticadas, devido à complexidade dos softwares e sistemas de reconhecimento, o uso de ROVs torna-se mais viável em uma primeira fase de implementação na região amazônica. Isto é porque existem diversas variáveis não controladas na região que poderiam afetar o uso de veículos autônomos.

- As principais limitações da região amazônica são devidas à falta de batimetrias e informações das condições ambientais de todos os rios que formam o complexo sistema hidroviário. Além disso, a profundidade e boca dos rios é muito variável, o que subsequentemente causa variações de velocidade das correntezas. Outro fator importante é a turbidez e concentração de minerais diversos na água. Por último, temos a biodiversidade (flora e fauna) que precisa ser preservada.

- Embora existam diversas limitações para a exploração subaquática na região, as tecnologias modernas de sensores e sistemas de navegação podem facilitar o desenvolvimento de veículos adequados para exploração na região.

- Trabalhos futuros que visem o desenvolvimento de veículos subaquáticos não tripulados para uso na região amazônica podem levar em consideração as vantagens de sensores de medição de variáveis diversas, lâmpadas de diversos tipos de luz, sensores acústicos, sensores baseados em tecnologias câmera-laser, melhoramento de propulsão utilizando bicos concentradores de diversos tipos (aceleradores e desaceleradores), visualização baseada em câmeras térmicas, sistemas de posicionamento dinâmico satélites, entre outras tecnologias inovadoras que já existem. Por último, o desenvolvimento de veículos subaquáticos hidroelásticos, que assemelhem o movimento de animais aquáticos (bio-inspirados), podem ser opções para estender as possibilidades de pesquisa eficiente que minimize os impactos causados ao meio ambiente.

9. REFERÊNCIAS

AMORIM, L. B. D. DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DA ESTABILIDADE TRANSVERSAL DE EMBARCAÇÕES NA CONDIÇÃO ESTÁTICA E INTACTA. p. 118, 2020.

ANTAQ, A. N. DE T. A. **Relatório Técnico Bacia Amazônica - Plano de Integração Hidroviária**, fev. 2013.

ANTONELLI, G. **Underwater robots: Motion and force control of vehicle-manipulator systems**. 2nd ed ed. Berlin ; New York: Springer, 2006. v. 2

ANTONELLI, G. **Underwater Robots**. 4^a ed. Cham: Springer International Publishing, 2018.

APARICIO-GARCÍA, C. T. et al. Design, Construction, and Modeling of a BAUV with Propulsion System Based on a Parallel Mechanism for the Caudal Fin. **Applied Sciences**, 2 abr. 2020.

ARACRI, S. et al. Soft Robots for Ocean Exploration and Offshore Operations: A Perspective. **Soft Robotics**, v. 8, n. 6, p. 625–639, 2021.

BASU, S.; SS, H.; ARI, S. Vision Based Path Detection Algorithm for Autonomous Underwater Vehicle. p. 6, 2017.

BJERKENG, M. et al. ROV Navigation in a Fish Cage with Laser-Camera Triangulation. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 9, n. 1, p. 79, 13 jan. 2021.

BUELONI, J. C. B. ESTUDO DA CINEMÁTICA DE UM MODELO PROPOSTO DE ROV COM SEIS GRAUS DE LIBERDADE. p. 60, 2016.

CAPOCCI, R. et al. Inspection-Class Remotely Operated Vehicles—A Review. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 5, n. 1, p. 13, 16 mar. 2017.

CASTRO, M. A. S. ANÁLISE SOBRE A IMPORTÂNCIA DA CRIAÇÃO DE UMA GRATIFICAÇÃO DE COMPENSAÇÃO ORGÂNICA NA ATIVIDADE DE MERGULHO DO CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO MARANHÃO. p. 66, 2019.

CHIN, C. S. **COMPUTER-AIDED CONTROL SYSTEMS DESIGN: Practical Applications Using Matlab and Simulink**, 2013.

CRUZ, J. DA S.; BLANCO, C. J. C.; BRASIL JUNIOR, A. C. P. Flow-velocity model for hydrokinetic energy availability assessment in the Amazon. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 42, p. e45703, 29 nov. 2019.

DORNELES, T. M.; VENTURA, T.; ALMEIDA, L. M. L. GEOPOLÍTICA DOS RECURSOS NATURAIS ESTRATÉGICOS E O PAPEL DO ESTADO BRASILEIRO. **Revista Estudo & Debate**, v. 28, n. 4, 29 dez. 2021.

FILHO, L. C. et al. Caracterização e Espacialização de Acidentes na Navegação ocorridos no Médio e Baixo Amazonas. 2019.

FOSSEN, T. I. **Marine control systems: guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles**. 3. printing ed. Trondheim: Marine Cybernetics, 2002.

FOSSEN, T. I. HANDBOOK OF MARINE CRAFT HYDRODYNAMICS AND MOTION CONTROL. p. 582, 2011.

GHOSE, J. P.; GOKARN, R. P. **Basic ship propulsion**, 2004.

GOULART, C. MODELAGEM, SIMULAÇÃO E CONTROLE DE UM VEÍCULO SUBMARINO DE OPERAÇÃO REMOTA. p. 138, jun. 2007.

GOZZER, STEFANIA. **O estranho caso do mergulhador cujo corpo começou a inchar inexplicavelmente** BBC NEWS | BRASIL, 21 fev. 2018. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-43135068#:~:text=Por%20isso%2C%20um%20mergulhador%20deve,gerar%20uma%20s%C3%ADndrome%20de%20descompress%C3%A3o.>>. Acesso em: 19 fev. 2022

HAMILTON-FARRELL, M.; BHATTACHARYYA, A. Barotrauma. **Injury**, v. 35, n. 4, p. 359–370, 2004.

HE, Y.; WANG, D. B.; ALI, Z. A. A review of different designs and control models of remotely operated underwater vehicle. **Measurement and Control**, v. 53, n. 9–10, p. 1561–1570, nov. 2020a.

HE, Y.; WANG, D. B.; ALI, Z. A. A review of different designs and control models of remotely operated underwater vehicle. **Measurement and Control**, v. 53, n. 9–10, p. 1561–1570, nov. 2020b.

International Submarine Engineering LTD - Products. Disponível em: <<https://ise.bc.ca/products/>>. Acesso em: 12 jan. 2022.

KATLEIN, C. et al. A New Remotely Operated Sensor Platform for Interdisciplinary Observations under Sea Ice. **Frontiers in Marine Science**, v. 4, p. 281, 4 set. 2017.

LANDAY III, W. et al. **The Navy Unmanned Undersea Vehicle (UUV) Master Plan**, 9 nov. 2004.

LU, L. et al. Numerical simulation of tip clearance impact on a pumpjet propulsor. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, v. 8, n. 3, p. 219–227, maio 2016.

MOLLAND, A. F. **The Maritime Engineering Reference Book - A guide to ship design, construction and operation**, 2008.

MOLLAND, A. F.; TURNOCK, S. R.; HUDSON, D. A. **Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Ship Propulsive Power**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

MORGADO, A. V.; PORTUGAL, L. DA S.; MELLO, A. J. R. Acessibilidade na Região Amazônica através do transporte hidroviário. **Journal of Transport Literature**, v. 7, n. 2, p. 97–123, abr. 2013.

NASCIMENTO, A. Z. A. CARACTERÍSTICAS HIDRO-GEOMORFOLÓGICAS DO BAIXO CURSO DOS RIOS SOLIMÕES E NEGRO, E SUA CONFLUÊNCIA, AMAZÔNIA, BRASIL. p. 63, 2016.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada**. Tradução: Tradução: Konstantinos Dimitriou Stavropoulos et al. 4ª ed, 2013.

QUEIROZ, M. et al. **Manual Operacional de Bombeiros** (CBMGO, Ed.), 2018.

RABELO, H. P. DESENVOLVIMENTO DE UM ROBÔ HEXÁPODE. p. 140, 2015.

REBIKOFF, D. History of Underwater Photography. **PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING**, p. 8, out. 1967.

VASCONCELOS, T. M. D. ANÁLISE DO EFEITO DE UM TUBULÃO ACELERADOR NA EFICÁCIA DE UM PROPULSOR KAPLAN. p. 47, nov. 2012.


VAZ, T. F. F. DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR PARA VEÍCULOS SUBAQUÁTICOS COM INTERFACE 3D E ANÁLISE DE CONFIGURAÇÕES DE PROPULSORES. p. 84, 2015.

VERFUSS, U. K. et al. A review of unmanned vehicles for the detection and monitoring of marine fauna. **Marine Pollution Bulletin**, v. 140, p. 17–29, mar. 2019.

WYNN, R. B. et al. Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience. **Marine Geology**, v. 352, p. 451–468, jun. 2014.

REVIEW

Challenges and alternatives for unmanned underwater vehicular research in the Amazon basin: Towards a more sustainable management of water resources and the environment

Jassiel V. H. Fontes , Eliana Brandão da Silva, Rodolfo Silva, Mojtaba Maali Amiri, Edgar Mendoza, Harlysson W. S. Maia, Irving D. Hernández

First published: 25 April 2023 | <https://doi.org/10.1111/wej.12871>

Funding information: This research was supported by Governo do Estado do Amazonas with resources from Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas—FAPEAM through the research project entitled 'Acidentes com embarcações na região amazônica: identificação de causas e alternativas de prevenção', call n° 010/2021—CT&I Áreas Prioritárias (Grant 106/2022; process number 01.02.016301.03431/2021–02), and by Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico—CNPq through the research project entitled 'Identificação dos desafios para prevenir acidentes com embarcações de alta velocidade na região amazônica', call CNPq-FNDCT-MCTI n° 14/2022—Faixa A (process number: 405529/2022-8).

Abstract

The Amazon basin is one of the largest hydrographic systems in the world, possessing a great diversity of natural resources in need of more sustainable water and environmental management. However, as much of what lies beneath the surface of Amazonian waters is still unexplored, underwater exploration technologies are seen as a means of research and monitoring. The present work therefore aims to answer two research questions: What are the current technologies that could be implemented for unmanned underwater research in the Amazon waters? What are the main limitations and existing alternatives for using unmanned underwater vehicles in the rivers of this region to provide more sustainable water and environment management? Our results demonstrate that remotely operated vehicles (ROVs) and autonomous underwater vehicles (AUVs) are possible options in the short and long terms, respectively. The main challenges in implementing these technologies are related to the variations in hydraulic geometry, current velocities and turbidity of the rivers, as well as the preservation of the region's biodiversity. This research can be taken as a starting point for planners and decision makers seeking more sustainable underwater and environmental exploration of the Amazon river system.