

O UNIVERSO SOB O MAR: A HISTÓRIA E AS INOVAÇÕES DA EXPLORAÇÃO SUBMARINA

THE UNIVERSE UNDER THE SEA: THE HISTORY AND INNOVATIONS OF UNDERWATER EXPLORATION

Lucas Fazenda Martinez Carvalho¹

Matheus da Silva Viegas²

Patrick Santos Tabarkiewicz³

Valeria Silva de Oliveira⁴

RESUMO: A exploração submarina é um campo de grande importância para os desenvolvimentos científico e tecnológico, com significativas contribuições para diversas áreas. Este artigo busca compreender a importância da exploração do oceano, identificar os avanços potencialmente alcançáveis, investigar a história e os possíveis futuros desdobramentos no campo da exploração do oceano e da pesquisa oceanográfica, bem como servir de incentivo para que o leitor aprofunde seus conhecimentos. Por meio de uma pesquisa bibliográfica abrangente, constatou-se que a exploração do oceano é crucial para o avanço da ciência e da indústria, tendo revelado novas descobertas no campo da biologia, geologia e climatologia, além de recursos naturais valiosos como minerais e fontes de energia renováveis. Pôde-se, também, apresentar ao leitor uma síntese da história da oceanografia moderna, bem como analisar as possíveis inovações para os próximos anos.

Palavras-chave: exploração submarina; oceanografia; indústria marítima; biologia marinha; energia renovável.

ABSTRACT: Submarine exploration is a field of great importance for scientific and technological developments, with significant contributions to several areas. This paper seeks to understand the importance of ocean exploration, identify potentially achievable advances, investigate the history and possible future developments in the field of ocean exploration and oceanographic research, as well as serve as an incentive for the reader to deepen their

¹ Aluno da Escola de Formação de Oficiais da Marinha Mercante no Curso de Bacharelado em Ciências Náuticas.

² Aluno da Escola de Formação de Oficiais da Marinha Mercante no Curso de Bacharelado em Ciências Náuticas

³ Aluno da Escola de Formação de Oficiais da Marinha Mercante no Curso de Bacharelado em Ciências Náuticas

⁴ Doutorado em Letras (Área de concentração: Literaturas de Língua Inglesa), pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro; Mestrado em Letras (Área de concentração: Estudos de Linguagem), pela Universidade Federal Fluminense; Especialização em Língua Inglesa, pela Universidade Federal de Minas Gerais; Especialização em Linguística Aplicada: Ensino/Aprendizagem do Inglês como Língua Estrangeira, pela Universidade Federal Fluminense; Graduação em Letras (Área de concentração: Inglês e Respectivas Literaturas (Bacharelado e Licenciatura), pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro; Professora Adjunta de Língua Inglesa na Escola de Formação da Marinha Mercante



knowledge. Through a extensive bibliographical research, it has been found that ocean exploration is crucial for the advancement of science and industry, having revealed new discoveries in the fields of biology, geology and climatology, as well as valuable natural resources such as minerals and sources of renewable energy. It was also possible to present the reader with a summary of the history of modern oceanography, as well as analyze possible innovations for the coming years.

Keywords: underwater exploration; oceanography; maritime industry; marine biology; renewable energy.

1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história, a espécie humana tem sido impulsionada por um desejo inato de explorar o desconhecido. Esta aptidão para a exploração evidencia-se em cada marco humano, desde as primeiras migrações do homem primitivo para outros continentes até a corrida espacial e tem servido de força motriz para inúmeras inovações e avanços. Mas apesar da aparente impressão de que não resta nada a se explorar no planeta Terra e dos grandes esforços no âmbito da exploração espacial, há ainda um domínio que permanece relativamente inexplorado, esperando para revelar segredos extraordinários que podem trazer grandes avanços para a humanidade: o fundo do oceano. A maior cadeia montanhosa subaquática do planeta, a Dorsal Mesoatlântica, por exemplo, só começou a ser explorada na década de 70, após a ida do homem à Lua, o que revela um notório atraso na exploração do oceano.

No Brasil, o cenário de incentivos ao desenvolvimento de estudos sobre os oceanos revela, aparentemente, um descompasso significativo em relação aos avanços observados em outros países. Segundo o relatório da UNESCO sobre investimentos em estudos do mar de 2022, os países analisados investem, em média, 1,7% dos recursos nacionais de pesquisa com as ciências do oceano, já no Brasil, esse número é 98% menor que a média, sendo de apenas 0,03% dos gastos totais investidos em pesquisas oceanográficas (Figueiredo, 2022). Esse diagnóstico desfavorável decorre de diversas causas, entre as quais encontra-se a possível falta de conscientização sobre a importância dos oceanos.

Dentro desse cenário, este trabalho busca entender quais são os potenciais desenvolvimentos associados à exploração submarina, bem como investigar a história das expedições passadas e os possíveis futuros desdobramentos no âmbito da exploração do oceano.



Ao percorrer presente, passado e futuro, busca-se esclarecer à comunidade marítima a relevância dessa área de pesquisa - que, nos últimos anos, tem conquistado notável destaque – e também convencer o leitor quanto a importância de seu contínuo desenvolvimento.

O presente artigo foi desenvolvido por meio de pesquisa bibliográfica e está dividido em três seções, abordando aspectos importantes das explorações. A primeira seção visa apresentar brevemente a história das expedições que fundamentaram a oceanografia moderna, evidenciando, também, os motivos pelos quais explora-se o oceano desde tempos longínquos. A segunda seção aborda o estado atual da exploração submarina e da oceanografia, descrevendo os principais equipamentos utilizados no estudo do oceano, bem como algumas descobertas recentes de relevância para o tema. Na seção final, são apresentados assuntos de grande influência no campo da exploração do oceano, como a mineração submarina e a utilização de tecnologias de inteligência artificial.

2 POR QUE EXPLORAR O OCEANO PROFUNDO?

O ex-presidente americano John F. Kennedy, a fim de convencer o povo americano da importância do programa *Apollo* e da exploração espacial, proferiu um inspirador discurso no *Rice Stadium*, em 1962, dizendo: “Navegamos neste novo mar porque há novos conhecimentos a serem adquiridos e novos direitos a serem conquistados, e eles devem ser conquistados e usados para o progresso de todas as pessoas” (Kennedy, 1962, tradução nossa)⁵. Esse discurso serviu de inspiração para muitos durante a corrida espacial da Guerra Fria, que culminou na vitória americana, em 1969, com a chegada do homem à Lua.

Existe, no entanto, um território tão peculiar e misterioso quanto o espaço, distante, no máximo, apenas alguns quilômetros de distância da superfície do mar e, ainda assim, vastamente inexplorado: o oceano. Esta seção examinará a história que subjaz à exploração submarina, bem como os motivos que levam o homem a lançar-se nesse desafio.

⁵ “*We set sail on this new sea because there is new knowledge to be gained, and new rights to be won, and they must be won and used for the progress of all people*” (Kennedy, 1962).



2.1 Breve história da exploração submarina

A fim de prover uma melhor compreensão do atual contexto da exploração submarina, esta seção apresentará um breve histórico da área, percorrendo os registros disponíveis em busca dos principais marcos da jornada das explorações.

2.1.1 As embarcações submarinas

Às exatas 13:06 horas do dia 23 de janeiro de 1960, o oceanógrafo suíço Jacques Piccard e o tenente da marinha norte-americana Don Walsh, estabeleceram o primeiro contato entre os seres humanos e os ilustres habitantes do ponto mais profundo do oceano, a Depressão *Challenger*, situada a aproximadamente 11 mil metros de profundidade (Dietz, 2000, p. 14)⁶. O habitante em questão era um peixe da família das solhas, ou como mais conhecido no Brasil, o linguado, presente também em diversos pontos do globo. Este encontro entre os exploradores e o anfitrião desse ambiente extraordinário representa o clímax de uma história que vem se desenrolando há muito tempo: a exploração submarina.

Um dos primeiros registros históricos de tecnologia dedicada à exploração submarina remonta ao século IV a.C. na figura do sino de mergulho, descrito por Aristóteles em sua obra *Problemata*, onde conta as façanhas de Alexandre, o Grande, que desce às profundezas usando um sino de mergulho feito de vidro, a fim de sitiar a cidade de Tiro, 332 a.C. O sino descrito por Aristóteles permitia que o mergulhador respirasse normalmente arriando-se um grande caldeirão na superfície do mar, que não se enche de água (Bachrach, 1998), mantendo uma atmosfera respirável. Tecnologias dessa natureza não tiveram avanço significativo durante séculos, até meados do século XVIII, com a invenção do que pode ser considerado o primeiro submarino, o *Turtle*, desenvolvido por David Bushnell entre os anos de 1771 e 1775 e utilizado no contexto da Guerra Civil Americana. O desenvolvimento do *Turtle* significa um grande avanço no âmbito da exploração submarina, uma vez que reuniu pela primeira vez os requisitos primordiais para a operação de um submarino propriamente dito: a manobrabilidade

⁶ O relato em questão pode ser encontrado na transcrição das gravações referentes ao batiscafo *Trieste*, que contam com a narração do próprio Jacques Piccard e podem ser encontradas no livro *Dives of the Bathyscaph Trieste, 1958-1963: Transcriptions of sixty-one dictabelt recordings in the Robert Sinclair Dietz Papers, 1905-1994*.



subaquática e a capacidade de manter suprimento de ar adequado ao operador (*Naval History And Heritage Command*, 2017).

No entanto, foi somente após o fim da Guerra Civil Americana que se observou um progresso significativo na construção de embarcações submarinas, com o comissionamento do primeiro submarino da *US Navy*, o *USS Holland* (SS-1), em Outubro de 1900. O *USS Holland*, projetado pelo professor Irlandês John Phillip Holland, introduziu ao *design* dos submarinos diversas características notáveis compartilhadas com as embarcações modernas como, por exemplo, uma estrutura protuberante em sua porção superior, similar à vela de um submarino moderno, contendo uma escotilha para os tripulantes. O *USS Holland* também contava com um discreto e leve motor a gasolina, que propelia a embarcação na superfície e carregava as baterias, que alimentavam um motor elétrico responsável pela propulsão em operações submarinas (*Naval History And Heritage Command*, 2022).

As duas grandes guerras mundiais impulsionaram significativamente o desenvolvimento dos submarinos, tendo em vista sua natureza discreta, que demonstrou ser uma grande vantagem nos confrontos navais. Segundo Kemp (1976, p. 841):

Mas o maior desenvolvimento na construção de submarinos se deu ao fim da guerra. Em 1944, a Alemanha começou a equipar seus submarinos⁷ com um *snorkel*, ou tubo respiratório, que lhes permitia usar seus motores a diesel para carregar as baterias enquanto permaneciam a profundidade de periscópio. (Kemp, 1976, p. 841, tradução nossa)⁸

Até a primeira metade do século XX, o emprego de embarcações submarinas era, quase que inteiramente, voltado para o setor militar, tendo esse segmento experimentado grande progresso durante as duas guerras mundiais. O período de prosperidade do pós-guerra nos Estados Unidos tornou-se um solo fértil para o desenvolvimento de novos projetos no setor da

⁷Os submarinos alemães, conhecidos como *U-boats*, causaram grandes perdas às forças aliadas durante a Segunda Guerra Mundial, em especial no teatro operacional do Atlântico, um dos mais cruciais de toda a guerra. (Kemp, 1976, p. 841)

⁸“*But the greatest development in submarine construction had to await the end of the war. In 1944 Germany had begun to fit her submarines with a snorkel, or breathing tube which enabled them to use their diesel engines for charging their batteries while remaining at periscope depth.*” (Kemp, 1976, p. 841)



exploração submarina e, em 1956, iniciaram-se as tratativas para a construção do mais célebre e bem-sucedido submarino de exploração já construído, o *Alvin*.

O desejo de construir uma embarcação de exploração do oceano profundo tomou forma no ano de 1964, com o comissionamento do *DSV Alvin*, um pequeno submersível com pouco mais de 20 pés de comprimento e equipado com uma robusta esfera maciça de aço capaz de abrigar três tripulantes e resistir a pressões de mais de 14000 pés de profundidade (*Woods Hole Oceanographic Institute*, 2003). O primeiro mergulho profundo do *Alvin* ocorreu em 1965, a mais de 6000 pés de profundidade, dando início à sua extensa fase operativa, que, extraordinariamente, dura até os dias de hoje. Apesar de seu tamanho diminuto, o *DSV Alvin* mostrou-se uma embarcação muito versátil, tendo sido usado para uma miríade de atividades de pesquisa ao redor do mundo e sendo atribuída a ele a descoberta de uma enorme quantidade de novas espécies submarinas (*Woods Hole Oceanographic Institute*, 2024). O *Alvin* segue em operação pela *Woods Hole Oceanographic Institute* (WHOI), passando por diversas reformas e atualizações ao longo dos anos. Na última atualização, em 2022, o submarino passou por uma reforma completa, recebendo, dentre diversas melhorias, um novo casco de titânio, novos tanques de lastro, um segundo braço hidráulico para manipulação, um sistema de imagem em 4k e novos propulsores (Piecuch, 2022).

2.1.2 Os mergulhadores

É impossível determinar com precisão quando surgiu a atividade de mergulho entre os seres humanos, mas é possível encontrar registros de atividades de mergulho livre já nos tempos da Antiga Grécia, atividade que se mantém até hoje como tradição na ilha de *Symi*, na qual os mergulhadores se arriscam até as profundezas em apneia em busca de esponjas (Marx, 1990, p.9). Seja em busca de esponjas na Grécia, de pérolas no Golfo Pérsico ou mariscos e algas no Japão, o mergulho livre sempre se concentrou na busca de recursos submarinos e desenvolveu-se no sentido de chegar a profundidades cada vez maiores a fim de alcançar recursos antes inacessíveis.

Até meados do século XVIII, a tecnologia de mergulho era notavelmente primitiva, reduzindo-se, basicamente, ao uso de óculos para proteção dos olhos e formas improvisadas de



snorkels. Foi em 1715 que o inventor britânico Andrew Becker apresentou ao mundo o primeiro protótipo funcional de uma roupa de mergulho, composta por um macacão de couro, um grande capacete de metal e três tubos ligando o capacete à superfície: um para o ar exalado e outros dois para ar puro. Já em 1771, o inventor parisiense Freminet introduziu sua peculiar invenção, a *machine hydrostatergatique*, um dispositivo composto por um capacete de latão conectado a um reservatório oval contendo ar à pressão atmosférica, que permitia ao mergulhador atingir o solo marinho sem estar conectado à superfície, a invenção pode ser considerada a precursora da tecnologia *SCUBA (Self-Contained Underwater Breathing Apparatus)* (Marx, 1990, p.51).

No entanto, o equipamento que realmente deu origem à tecnologia atual de mergulho usando capacete, mais conhecido como escafandrismo, foi inventado em 1819 pelo inglês Augustus Siebe. A invenção era composta por um capacete, também de latão, conectado a um compressor de ar na superfície. A invenção de Siebe foi posta à prova em 1834, quando Charles Deane desceu ao naufrágio do navio Royal George, na costa sul da Inglaterra, recuperando diversos objetos, incluindo 30 bolas de canhão (Marx, 1990, p.54). A campanha de exploração ao Royal George deu origem, inclusive, a primeira escola de mergulho para engenheiros da Marinha Real Britânica.

Os equipamentos de mergulho, no entanto, ainda sofriam de algumas limitações bastante incapacitantes: o fato de precisarem estar sempre conectados a uma fonte de ar na superfície e o fluxo de ar da fonte ser sempre constante, o que aumentava demasiadamente o consumo de oxigênio. Para contornar essas limitações, o cineasta e oceanógrafo francês Jacques Cousteau e o engenheiro, também francês, Emile Gagnan, inventaram o regulador de mergulho, um equipamento capaz de prover a quantidade demandada de ar comprimido ao mergulhador a medida que ele respira. O equipamento revolucionário criado pelos franceses começou a ser comercializado nos Estados Unidos sob o nome de *Aqualung*, em 1952, permitindo que o mergulho autônomo fosse acessível a todos (*National Inventors Hall of Fame*, 2024).

2.1.3 A Expedição Challenger

Uma observação grosseira do ecossistema marinho pode revelar que o número de espécies presentes no oceano diminui significativamente à medida que a profundidade aumenta,



ao ponto que param de existir completamente a uma determinada profundidade. Assim pensava o naturalista Edward Forbes que, durante suas expedições a bordo do *HMS Beacon*, concluiu que toda a vida marinha cessaria de existir a partir das 300 braças (550 metros) de profundidade (Anderson, 2006). Essa hipótese, conhecida como Hipótese Azóica, era amplamente debatida pelos cientistas do século XIX.

Um dos cientistas contrários à hipótese de Forbes era Louis F. de Pourtales que, a serviço da então *United States Coast Survey*, a agência americana responsável pela cartografia da costa americana, protagonizou uma série de expedições de pesquisa marinha ao longo de toda a costa dos Estados Unidos. Ainda em 1868, Pourtales pôs fim à Hipótese Azoica, realizando uma dragagem de 517 braças que revelou diversos organismos vivos (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, 2024a).

É nesse contexto de embates e novas descobertas que se insere uma das expedições científicas de grande impacto na história da ciência: a Expedição Challenger, que lançou as bases da oceanografia. Entre os anos de 1872 e 1876, o *HMS Challenger*, um navio de guerra da Marinha Real Britânica, percorreu mais de 68 mil milhas náuticas, identificando milhares de novas espécies ao longo de 362 estações oceanográficas e coletando dados de temperatura, corrente, composição química da água e depósitos minerais no fundo do oceano. A tripulação da expedição era composta, a princípio, por 216 tripulantes e 6 cientistas, liderados pelo Doutor Charles Wyville Thomson, professor de história natural da Universidade de Edimburgo e devoto pesquisador da fauna e flora marinhas (Bishop *et al*, 2003).

Uma das mais importantes descobertas feitas pela Expedição Challenger se deu em 1875, na parte sul das Fossas Marianas, durante uma operação de sondagem, quando os cientistas, ao arriarem a sonda, ficaram sem cabo suficiente, revelando ali um ponto de extrema profundidade. Em uma segunda sondagem, dessa vez bem-sucedida, a profundidade medida chegou à aproximadamente 5 milhas, ou 8 quilômetros⁹. A região em questão é tão notavelmente profunda que levou o nome da própria expedição, ficando conhecida como

⁹A última sondagem realizada pela NOAA revelou que, na verdade, a Depressão *Challenger* pode chegar a até 12080 pés, ou 3682 metros de profundidade.



Depressão *Challenger* e, até os dias de hoje, não foi encontrado um ponto mais profundo em todo o globo (Golembiewski, 2020).

A grande quantidade de material e informações coletadas pela Expedição *Challenger* foram de extrema importância para o desenvolvimento da oceanografia e da biologia marinha. Segundo Golembiewski (2020):

Os espécimes e registros da expedição servem hoje para que os investigadores possam ver se as espécies vivem nos mesmos locais que viviam há 150 anos, comparar potenciais novas espécies com os espécimes originais descobertos e entender como as alterações climáticas afetam os animais. (Golembiewski, 2020, tradução nossa).¹⁰

Destaca-se, portanto, a notável contribuição da Expedição *Challenger* tanto no passado quanto no presente, tendo acrescentado diversas espécies, até então inéditas, ao catálogo de espécies marinhas.

2.2 O mar é fonte de profundas riquezas

Segundo o *U.S Geological Survey*, existem aproximadamente 1,386,000,000 quilômetros cúbicos de água na Terra, dos quais 96,5% estão contidos nos oceanos. Esse imenso volume de água se traduz, na prática, no incrível fato de que 71% de toda a superfície do planeta está coberta por água e no grande potencial econômico e científico envolvido na exploração dos oceanos (*United States Geological Service*, 2019). Ainda assim, segundo a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), grande parte dos oceanos permanecem inexplorados.¹¹

Dentre os fatores que justificam essa carência, segundo o relatório “*The Ocean Economy in 2030*”, da OECD (*Organisation for Economic Co-operation and Development*), está as dimensões dos oceanos, tanto em relação a sua imensa extensão quanto à profundidade, que adiciona o fator “pressão” a essa complexa equação. Ainda segundo o mesmo relatório, o

¹⁰“Using the expedition’s specimens and records, researchers are able to see if species live in the same places they did 150 years ago, compare potential new species to the original specimens discovered by the *Challenger* and explore the ways that climate change is affecting animals.” (Golembiewski, 2020)

¹¹O número exato, em percentual, do território submarino inexplorado ainda é incerto, mas segundo a NOAA, esse número pode chegar a até 95% (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, 2024b).



dinamismo da vida aquática também soma mais uma camada de dificuldade à exploração submarina, uma vez que as espécies, principalmente da fauna marinha, viajam muito rapidamente e por distâncias muito grandes, fazendo com que os aglomerados de animais se desloquem rapidamente de um lugar para outro (*Organisation for Economic Co-operation and Development, 2016*).

Apesar dos desafios impostos pela exploração dos recursos submarinos, o ambiente marinho representa uma fonte de grandes riquezas e pode tornar-se, no futuro, a solução para uma pletera de problemas enfrentados hoje pela humanidade. Segundo o banco de dados da OECD, apesar da sub-exploração do ambiente marinho, a contribuição das indústrias relacionadas à exploração do oceano, em 2010, foi de 1.5 trilhões de dólares americanos, o que representa aproximadamente 2,5% do PIB mundial (*Organisation for Economic Co-operation and Development, 2016*). O relatório analisa fatores como a pesca, aquacultura, indústria *shipping*, construção naval, exploração de petróleo e gás e geração de energia, mas as riquezas dos oceanos não se limitam apenas a esses fatores. O oceano abriga riquezas muitas vezes desconhecidas pelo público geral, podendo revelar, por exemplo, a cura de doenças, a partir do estudo de novas espécies, ou novas tecnologias, como a dessalinização, que tem o potencial de solucionar o problema da falta de água doce em regiões áridas.¹²

De acordo com um relatório da *U.S. Government Accountability Office (2021)*:

A energia renovável dos oceanos tem potencial para reduzir emissões globais de carbono provenientes de combustíveis fósseis em 500 milhões toneladas até 2050, e também poderia atender às necessidades energéticas de comunidades isoladas, que podem não ter acesso a fontes de eletricidade confiáveis. (*U.S Government Accountability Office, 2021, tradução nossa*)¹³

Ainda segundo o relatório, se todas as fontes de energia renováveis provenientes do oceano fossem exploradas por completo, aproximadamente metade de toda a demanda

¹²O problema da autossuficiência hídrica hoje é um dos temas centrais da geopolítica dos países do Golfo Pérsico. Aproximadamente 60% de toda a capacidade de produção de água dessalinizada pertence aos países componentes do Conselho de Cooperação do Golfo (Qureshi, 2020).

¹³“Renewable ocean energy has the potential to reduce global carbon emissions from fossil fuels by 500 million tons by 2050, and could also meet the energy needs of isolated communities, which may not have access to reliable electricity sources.” (*U.S Government Accountability Office, 2021*)



energética dos Estados Unidos poderia ser atendida (*U.S Government Accountability Office*, 2021). Esses dados revelam o imenso potencial energético dos oceanos, que se manifesta em diversas formas de energia, dentre elas a ondomotriz, maremotriz, osmótica¹⁴, eólica, geotérmica e termal.

Em virtude desse potencial, muitas novas tecnologias para a extração de energia do oceano têm sido desenvolvidas nos últimos anos. Um método que tem tido destaque é a Conversão da Energia Térmica do Oceano (*Ocean Thermal Energy Conversion - OTEC*), que utiliza da diferença de temperatura entre dois pontos do oceano, um mais raso e outro mais profundo, para gerar energia elétrica. O sistema utiliza de uma fonte de calor (água mais quente) e um dissipador (água mais fria) para gerar o fluxo que movimenta uma turbina, transformando a energia mecânica do movimento da turbina em energia elétrica (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, 2020). Se explorada ao máximo potencial, a tecnologia OTEC pode suprir um total de até 5TW de energia elétrica (Nihous, 2007).¹⁵

Apesar disso, de modo geral, a geração de energia proveniente dos oceanos é, ainda, bastante incipiente. Segundo a *International Renewable Energy Agency (IRENA)*, o total de energia elétrica gerada através dos oceanos não ultrapassou os 1209 GW, mas estima-se que o potencial energético dos oceanos possa atingir cerca de 170 mil TW (*International Renewable Energy Agency*, 2024). Segundo Khan *et. al*, uma estimativa mais precisa do potencial total anual das energias maremotriz, ondomotriz, osmótica e termal é de, respectivamente, 800, 2000, 8000–80000 e 10000–87000 TW (Khan *et. al*, 2017).

As contribuições da exploração dos oceanos, porém, vão muito além da geração de energia elétrica. A descoberta de novos princípios ativos para a fabricação de medicamentos, por exemplo, é um dos possíveis produtos resultantes da pesquisa de espécies marinhas. Segundo o *U.S National Research Council* (1999):

¹⁴Energia produzida da diferença entre o teor de salinidade da água salgada e da água doce por meio da eletrodialise.

¹⁵Embora pareça promissora, a ideia de utilizar a tecnologia OTEC em escala global pode causar um desequilíbrio no estado térmico dos oceanos, portanto, essa tecnologia pode se tornar uma alternativa para países com opções limitadas para geração de energia.



Estimativas conservadoras sugerem que as bactérias subterrâneas oceânicas podem constituir até 10% do total da biomassa viva na biosfera (Parkes *et al.*, 1994). De um número relativamente pequeno destas espécies estudadas até agora, milhares de compostos químicos foram isolados (Ireland *et al.*, 1993). Além disso, apenas uma pequena percentagem destes compostos foi testada em bioensaios clinicamente relevantes. O oceano representa um recurso praticamente inexplorado para a descoberta de novos produtos químicos com potencial farmacêutico (*National Resource Council*, 1999, tradução nossa).¹⁶

As espécies marinhas, porém, não se limitam apenas às bactérias oceânicas. Dos 33 filos existentes, 32 deles existem no ambiente marinho e 15 são exclusivamente encontradas no ambiente marinho (Margulia, 1998).

As possíveis contribuições e inovações dos oceanos para com a humanidade são tamanhas que seria impossível explorá-las todas neste trabalho tendo em vista o escopo. Mas podemos, através dos exemplos supracitados, ter dimensão das riquezas presentes abaixo das ondas e da importância da exploração desse ambiente até então tão misterioso e intrigante.

3 A EXPLORAÇÃO DO OCEANO HOJE

Tendo em vista os imensos potenciais submarinos em relação a diversos aspectos do desenvolvimento humano, o oceano configura, hoje, o palco de uma nova corrida para novas descobertas e o desenvolvimento de importantes projetos. Esta seção visa compreender o cenário atual da exploração do oceano, descrevendo brevemente os principais equipamentos utilizados e algumas descobertas notáveis recentes.

3.1 Instrumentos modernos da oceanografia

O estudo da oceanografia engloba diversos domínios da ciência como, por exemplo, a biologia, a geologia, a química, a hidrografia e até mesmo a arqueologia. Para que todas essas disciplinas sejam contempladas, uma série de diferentes instrumentos foram desenvolvidos ao

¹⁶“Conservative estimates suggest that oceanic subsurface bacteria could constitute as much as 10% of the total living biomass carbon in the biosphere (Parkes *et al.*, 1994). From a relatively small number of these species that have been studied to date, thousands of chemical compounds have been isolated (Ireland *et al.*, 1993). Moreover, only a small percentage of these compounds has been tested in clinically relevant bioassays. The ocean represents a virtually untapped resource for discovery of novel chemicals with pharmaceutical potential.” (*National Resource Council*, 1999)



longo dos anos. Esta seção tem por objetivo descrever os instrumentos mais comuns utilizados para o estudo do Oceano.

3.1.1 *Human-occupied Vehicles* (HOVs)

Os HOVs são embarcações submersíveis capazes de resistir às pressões esmagadoras do fundo do mar, levando os cientistas para locais inacessíveis aos mergulhadores. Os HOVs permitem que os cientistas estejam fisicamente presentes no ambiente marinho, o que propicia uma melhor análise das condições do ecossistema local (*National Oceanic and Atmospheric Administration, 2024c*). Um exemplo de HOV em operação hoje em dia é o submersível *DSV Alvin*.

A importância de um equipamento HOV como o DSV Alvin se demonstra, por exemplo, na descoberta de um complexo sistema de fontes hidrotermais no Maciço Atlântis, chamada de “Cidade Perdida” ou *Lost City*, uma proeminente montanha localizada a Oeste da Dorsal Mesoatlântica no paralelo 30° N. Essa enorme estrutura possui chaminés submarinas que lembram as colunas da arquitetura greco-romana e que permitem a existência de um denso ecossistema microbial. Essa descoberta revela que uma porção maior da crosta submarina pode conter atividade hidrotermal e, por consequência, vida microbial similar à encontrada na Cidade Perdida (Kelley *et. Al, 2001*).

3.1.2 *Remotely Operated Vehicles* (ROVs)

Os ROVs são veículos remotamente operados por um operador a bordo de um navio de superfície. Os ROVs são conectados ao navio por meio de um cabo muito longo, no qual os dados são recebidos e transmitidos. Contam com uma série de instrumentos para realizar suas operações, dentre eles luzes, sonares, braços mecânicos e sensores para medição de temperatura, pressão, condutividade, dentre outros (*National Oceanic and Atmospheric Administration, 2024d*).

Além da exploração submarina, os ROVs são, também, muito utilizados no contexto da exploração de petróleo e gás *offshore* no Brasil e no mundo, realizando manutenções e inspeções em plataformas e estruturas submarinas. Segundo o relatório “Tamanho do mercado ROV e análise de ações – Tendências e previsões de crescimento (2024 – 2029)” da *Mordor*



Intelligence, estima-se que o mercado de ROVs no mundo, hoje, seja de US\$ 2,39 bilhões e deverá atingir US\$ 3,46 bilhões até 2029, em virtude do aumento das atividades de exploração *offshore* de petróleo de gás e do crescimento das tecnologias renováveis *offshore* (Mordor Intelligence, 2020). O mercado brasileiro acompanha esse crescimento, com a *OceanPact*, por exemplo, tendo adquirido cinco novos ROVs para entrarem em operação na costa brasileira (*Oceanpact*, 2024).

3.1.3 Embarcações de pesquisa

São laboratórios flutuantes dedicados ao estudo de diversos aspectos dos oceanos. Além de abrigar os cientistas, servem como plataforma para o lançamento de mergulhadores, ROVs e outros equipamentos. São, também, equipadas com instrumentos de última geração para coletar dados de uma vasta gama de parâmetros oceânicos.

Os navios de pesquisa são ferramentas essenciais no desenvolvimento da oceanografia e possuem importância estratégica para os países, sendo, em grande maioria, mantidos e operados pelas forças armadas. O *USCG Polar Star*, por exemplo, opera na Guarda Costeira Americana desde o ano de 1976 e tem grande importância no suporte às estações de pesquisa americanas no ártico, na pesquisa oceanográfica em si e também na medição de parâmetros oceanográficos, podendo acomodar até 20 cientistas e 2 helicópteros (*United States Coast Guard*, 2003).

A Marinha do Brasil possui, hoje, uma extensa frota de navios de pesquisa oceanográfica, representada pelo moderno *NpqHo Vital de Oliveira*, um navio de pesquisa de grande porte capaz de abrigar 40 cientistas e com autonomia de 30 dias (Marinha do Brasil, 2024a). O navio é empregado em atividades como a da comissão “Comitê Gestor II”, na qual 22 pesquisadores do Serviço Geológico do Brasil realizaram a coleta de amostras do solo submarino, a perfilagem dos parâmetros físicos da coluna d’água e a sondagem de mais de 28 mil quilômetros quadrados do território da Amazônia Azul (Marinha do Brasil, 2022).



3.1.4 *Autonomous Underwater Vehicles (AUVs)*

São veículos submarinos não tripulados e independentes que, quando lançados, percorrem os oceanos sem a necessidade de comando de um operador. De modo geral, os AUVs são utilizados no âmbito da coleta de dados oceanográficos de longo prazo e no mapeamento do solo oceânico.

A grande vantagem dos AUVs está na sua autonomia. Ele percorre a derrota programada pelos cientistas, coletando e armazenando os dados, que serão recuperados e analisados posteriormente. Essa autonomia permite que os cientistas foquem em outras atividades enquanto o AUV cumpre sua missão (*National Oceanic and Atmospheric Administration, 2024e*).

O *COTSbot* é um impressionante exemplar de AUV em operação hoje em dia. Desenvolvido para combater a estrela-do-mar-coroa-de-espinhos (*Crown-of-Thorns Starfish - COTS*), uma espécie invasora que devasta a Grande Barreira de Corais da Austrália. O *COTSbot* é capaz de, de maneira totalmente autônoma, detectar o COTS através de um sistema de câmeras e injetar um agente químico que mata a espécie invasora (QUT, 2024).

3.1.5 *Conductivity, Temperature and Depth (CTD)*

O CTD é um dos instrumentos mais comumente utilizados no estudo da oceanografia. Consiste num conjunto de pequenas sondas capazes de medir a mudança da condutividade e temperatura da água em função da profundidade, além de prover dados importantes relativos à composição física, química e biológica da água. Os dados obtidos pelo CTD propiciam um melhor entendimento de processos biológicos, da circulação do oceano e das mudanças climáticas, por exemplo (*National Oceanic and Atmospheric Administration, 2024f*).

3.1.6 Sonares

O SONAR (*Sound Navigation and Ranging*) é uma tecnologia que utiliza das ondas sonoras para determinar distâncias em baixo d'água. De modo geral, o SONAR interpreta o tempo levado entre a emissão de um pulso de onda sonora e a recepção do eco refletido, determinando, assim, a distância entre o navio e o obstáculo. Diferentemente do radar, cujo



princípio de funcionamento é bastante semelhante, o SONAR é utilizado na oceanografia devido ao fato de que as ondas sonoras percorrem distâncias maiores no meio aquático que as ondas eletromagnéticas.

O SONAR é um dos equipamentos mais utilizados na oceanografia. Por meio dele, os pesquisadores são capazes de produzir cartas náuticas, localizar perigos à navegação, mapear o solo marinho, localizar cardumes para pesca e até mesmo capturar imagens (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, 2024g). O programa M3 da Marinha Americana, por exemplo, coleta dados de um sistema de aparatos acústicos, incluindo sonares passivos, para compreender o comportamento das baleias. O programa permitiu a expansão do catálogo dos sons das espécies marinhas, incluindo peixes, invertebrados e grandes baleias. Segundo o relatório anual do programa M3 do ano de 2020:

Ao autenticar que uma fonte sonora é de origem biológica, o programa M3 tem significativamente contribuído para a identificação adequada de sons marinhos e fontes sonoras que não são de origem biológica (*United States Navy*, 2020, tradução nossa)¹⁷

O programa M3 demonstra, portanto, uma aplicação genial da tecnologia SONAR no contexto da oceanografia, ajudando a identificar mudanças populacionais e compreender impactos ambientais.

3.1.7 Boias de deriva

São boias derivadoras, geralmente equipadas com múltiplos sensores, rastreadas por satélites e utilizadas para estudar as correntes oceânicas e os parâmetros do oceano em função da posição, como, por exemplo, a temperatura da superfície do mar, corrente superficial, pressão atmosférica e vento (Marinha do Brasil, 2024b).

Por meio do estudo da dinâmica das boias, os pesquisadores são capazes de entender as correntes oceânicas, criar padrões e modelos meteorológicos e compreender melhor a distribuição da vida marinha (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, 2024h).

¹⁷“By authenticating that a sound source is of biological origin, the M3 program has significantly contributed to the proper identification of marine sounds and sound sources that are not of biological origin.” (*United States Navy*, 2020)



3.1.8 Hidrofonos

De forma similar aos microfones, os hidrofonos captam a diferença de pressão gerada pelas ondas sonoras quando submersas na água, gerando pequenas correntes elétricas em diversas frequências. Por meio da amplificação desses sinais elétricos, os pesquisadores são capazes de interpretar os sons do oceano, ouvindo ruídos de animais e atividades sísmicas, por exemplo (*National Oceanic and Atmospheric Administration, 2024i*).

Uma interessante aplicação dos hidrofonos pode ser observado no monitoramento de baleias para evitar colisões, uma vez que esses animais têm o comportamento peculiar de retornar à superfície do mar para descansar, muitas vezes, em áreas de tráfego marítimo movimentado. A Monitorização Acústica Passiva (*Passive Acoustic Monitoring - PAM*) serve, então, de um importante instrumento para escutar e interpretar os ruídos emitidos pelos cetáceos a fim de identificar suas posições, padrões migratórios e de comportamento em geral (Klosner, 2022)

Apesar de estar em estágio inicial de desenvolvimento, a PAM se mostra uma importantíssima contribuição para a vida marinha, uma vez que a colisão com navios é uma das principais causas de morte prematura das baleias, animal já ameaçado de extinção (Klosner, 2022).

3.2 Descobertas recentes

Os modernos equipamentos de pesquisa oceanográfica têm proporcionado importantes descobertas como, por exemplo, a observação de fontes hidrotermais em diversos pontos diferentes do oceano e de extensos campos ricos em diversos minerais para mineração subaquática.

As fontes hidrotermais, observadas primeiramente pelo *DSV Alvin*, em 1977, perto das Ilhas Galápagos, são fissuras na crosta oceânica que permitem a infiltração de água do mar. A água fria do mar reemerge, aquecida pelo magma, formando fontes de água quente repletas de minerais advindos de dentro da Terra. Esse ambiente único permite a existência de vida em abundância a profundidades que, antes, nem se imaginava possível haver vida. O estudo dos ecossistemas das fontes hidrotermais permite aos cientistas entender melhor a origem da vida



na Terra, bem como descobrir novas espécies únicas, capazes de prosperar em ambientes muito hostis (*National Oceanic and Atmospheric Administration, 2024j*).

Recentemente, em março de 2024, a revista *SciNews* (2024) divulgou a descoberta de cinco novas fontes hidrotermais no Oceano Pacífico durante uma expedição utilizando o *AUV Sentry* e o *DSV Alvin*, da *Woods Hole Oceanographic Institution*. Segundo o Dr. Ross Parnell-Turner, pesquisador da WHOI:

Ao operar em conjunto estes dois submersíveis de alto-mar de última geração, somos capazes de fazer novas descobertas notáveis sobre como é construído o fundo do mar nos oceanos profundos, em alguns dos ambientes mais inóspitos da Terra. (*SciNews, 2024, tradução nossa*)¹⁸

Outra descoberta pouco conhecida do público geral, mas de importante magnitude para o futuro do planeta, publicada no artigo “*Multi-faceted particle pumps drive carbon sequestration in the ocean*” (Boyd *et. al*, 2019), se dá no contexto das mudanças climáticas, mais especificamente como os oceanos afetam a temperatura da Terra. Sabe-se que os oceanos têm importante papel na captura do gás carbônico atmosférico por meio de um mecanismo já bem conhecido, chamado de *biological gravitational pump* (BGP), no qual o gás carbônico dissolvido (*Dissolved Inorganic Carbon - DIC*) é absorvido por fitoplânctons e transportado para o solo oceânico à medida que esses organismos morrem e descendem por ação da gravidade (Boyd *et. al*, 2019).

A nova descoberta revela a existência de um novo mecanismo, mais complexo e tão relevante quanto o BGP para o sequestro de CO₂ pelo oceano, o *particle injection pump* (PIP), que associa diversos aspectos do funcionamento do oceano à dissolução e deposição do gás carbônico. Esses aspectos incluem, por exemplo, a mistura da água pelas correntes marinhas e pelo vento e o transporte biológico do DIC por animais marinhos, que comem partículas contendo o DIC na superfície e excretam esse material em águas bastante profundas (Boyd *et. al*, 2019).

¹⁸“By jointly operating these two cutting-edge deep-sea submersibles, we are able to make remarkable new discoveries about how seafloor in the deep oceans is constructed, in some of the most inhospitable environments on Earth” (*SciNews, 2024*)



Em virtude da natureza dinâmica dos oceanos, aspectos como a temperatura da água e disponibilidade de nutrientes possuem grande influência no sequestro de carbono pelos oceanos. Segundo Boyd *et. al* (2019).

A coleta de dados de satélites e de colunas de água, aliados a estudos de processos específicos, produzirá conjuntos de dados expansivos que podem ser assimilados em modelos regionais e globais de realismo e resolução cada vez maiores. Juntas, estas abordagens levarão a uma visão robusta e quadridimensional do sequestro de carbono pelas bombas biofísicas multifacetadas de partículas do oceano. (Boyd *et. al*, 2019, tradução nossa)¹⁹

Portanto, o bom entendimento do PIP e do BGP é de extrema importância para a criação de modelos climáticos mais precisos, a melhor compreensão das mudanças climáticas e o estudo de novos mecanismos para o controle do CO₂ atmosférico.

Já no contexto do Brasil, a disponibilidade de energia elétrica de origem oceânica também é alvo de estudo dos oceanógrafos. O estudo “*Evaluating the gravity wave energy potential off the Brazilian coast*” (Pegorelli; Dottori; Fortes, 2018), publicado no *Brazilian Journal of Oceanography*, utilizou de dados advindos de bóias, modelos numéricos e altimetria para estipular o potencial para a exploração da energia das ondas geradas pelo vento em toda a costa brasileira. O estudo revelou que a costa brasileira apresenta potencial razoável para a implementação de conversores de energia ondomotriz, identificando-se um fluxo consistente de em torno de 10 a 30 kW/m em quase todos os pontos estudados. Destaca-se, também, os fatos de que grande parte da população brasileira vive em regiões costeiras, tornando a distribuição dessa forma de energia mais fácil, e de o Brasil já ter uma infraestrutura *offshore* bem desenvolvida que pode ser aproveitada para a geração de energia ondomotriz (Pegorelli; Dottori; Fortes, 2018).

4 O FUTURO DO OCEANO PROFUNDO

Tendo percorrido o passado e o presente da exploração submarina, pôde-se obter um panorama da história, a importância e as contribuições desse tema de grande relevância

¹⁹“*Satellite and water-column remote-sensing, along with targeted process studies, will yield expansive datasets that can be assimilated into regional and global models of ever increasing realism and resolution. Together, these approaches will lead towards a robust, four dimensional view of carbon sequestration by the ocean’s multi-faceted bio-physical particle pumps.*” (Boyd *et. al*, 2019)



científica para a humanidade. A fim de expandir esse panorama, deve-se olhar agora para o futuro da exploração submarina, analisando o iminente dilema da mineração submarina e a promissora implementação da IA no contexto da exploração submarina.

4.1 A mineração submarina

A exploração submarina de minérios é a nova fronteira de extração de minérios, que tem sido buscada por muitos países mundialmente, inclusive o Brasil. Ela engloba a extração com profundidades entre mil e seis mil metros. Os minérios que se encontram no fundo do mar são geralmente nódulos polimetálicos, sulfetos e crostas de manganês ricas em cobalto, importantes na transição energética pois são utilizados em baterias de carros elétricos, por exemplo. Atualmente, essa exploração ocorre em pequena escala, ainda não há a exploração comercial dessas áreas, porém governos e empresas planejam começar o mais cedo possível (Peacock; Alford, 2018).

A assembleia da *International Seabed Authority* (ISA) e seus 168 membros reuniu-se em 2024 para discutir os impactos da mineração submarina no ambiente pela primeira vez. Enquanto isso, a ISA ainda tem dois anos para estabelecer um código para águas internacionais e os países ainda tem o direito de explorar os minérios no fundo do mar de suas Zonas Econômicas Exclusivas. A Noruega, em janeiro de 2024, iniciou um processo de abertura de suas águas nacionais para a exploração de minérios, começando provavelmente em 2030. Muitas outras nações ainda tem interesse, porém carecem de investimentos e mão de obra especializada. No momento, apenas Nauru e Noruega são os líderes nesse setor (*International Seabed Authority*, 2024).

Além disso, a maioria dos minérios alvos de desejo dos países na verdade não se encontra em suas ZEE's, mas sim no solo abissal de águas internacionais, em uma área de interesse chamada Zona Clarion-Clipperton, no Oceano Pacífico. Essa região já possui contratos de exploração definidos para 17 empresas com suas zonas de exploração combinadas de mais de 1 milhão de quilômetros quadrados, um tamanho que equivale a Etiópia (Ashfold *et. al*, 2024).



4.1.1 Como funciona a mineração submarina

A exploração submarina de minérios requer um grande número de complexos equipamentos trabalhando em cooperação para que ocorra a coleta eficiente e segura de nódulos polimetálicos, crostas de manganês ricas em Cobalto e Sulfetos. Em resumo, um volume de água contendo os nódulos polimetálicos é coletado e transportado para um PSV (*Production Support Vessel*), onde são separados e armazenados os nódulos, retornando a água para o oceano. Os PSVs geralmente são FPSOs (*Floating Production Storage And Offloading*) que operaram no setor de Óleo e Gás e foram modificados para a operação de mineração. O PSV arria o coletor no solo submarino através do LARS (*Launch and Recovery System*) que está localizado na lateral do navio. Os coletores, também chamados de *Harvesters* são veículos que coletam os nódulos submarinos. Sua energia e controle são fornecidos pelo PSV por meio de um cabo umbilical (Gales, 2023).

4.1.2 Saúde dos oceanos e ecossistemas sob ameaça

Uma das grandes preocupações acerca da mineração do mar profundo é o potencial que os detritos e poeira dos sedimentos gerados podem causar na biodiversidade e no funcionamento dos ecossistemas marinhos. Em razão de os sedimentos serem muito pequenos e possuírem uma baixa velocidade, as correntes dos oceanos tem a capacidade de transportá-los por distâncias consideráveis, causando impactos indiretos em pontos muito distantes. Além disso, a exploração de minérios submarinos introduz uma nova camada de influência humana sobre o meio ambiente marinho, levando problemas já enfrentados no meio terrestre, como a poluição luminosa, acústica, aumento de temperatura e a morte colateral de animais, para o fundo do mar (Mewes *et. al.*, 2014).

A poluição sonora marinha é conhecida por ser um problema bastante significativo para as espécies dos Cetáceos, muitos dos quais utilizam o som para comunicação e navegação, tornando essas espécies muito vulneráveis aos sons produzidos pelas operações de mineração. Incidentes fatais como encalhe em praias já foram associados a perturbações acústicas, porém ainda há muito a se estudar a fim de se ter um parecer real sobre a influência da atividade de mineração em si no comportamento desses animais. Uma hipótese sendo investigada é de que



os ruídos antropogênicos das máquinas despertam nas baleias o sentido de perigo, fazendo com que fujam de seus habitats (Williams *et. al*, 2022).

4.1.3 Código Internacional de Mineração Submarina

O código de mineração submarina, articulado pela *International Seabed Authority* (ISA) sediada em Kingston, Jamaica, abrange todo um arcabouço de regras, regulamentações e procedimentos criados pela ISA para regular a prospecção e exploração de minérios no solo marinho Internacional (definida como a área do fundo do oceano em além dos limites de jurisdição nacional). A ISA adotou três divisões em sua regulamentação, abordando a exploração de nódulos polimetálicos, sulfetos polimetálicos e crostas de manganês ricas em cobalto. Essas regulamentações são um guia para empresas e nações, com a finalidade de padronizar a exploração, a fim de que seja baseada em estudos científicos e com o objetivo de preservar ao máximo o meio ambiente marinho. Uma vez em atividade, as empresas exploradoras de minério deverão seguir os regulamentos da convenção e contribuir financeiramente com a ISA (*International Seabed Authority*, 2024).

Segundo o Código de Mineração Submarina (*The Mining Code*):

Durante a exploração de minérios submarinos, a ISA se obriga a, entre outras coisas, estabelecer e manter sob revisão periódica as regras, regulamentos e procedimentos ambientais a fim de garantir uma proteção eficaz para o ambiente marinho dos efeitos nocivos que possam surgir das atividades na área e, junto aos estados patrocinadores, aplicar uma abordagem preventiva a tais atividades com base nas recomendações da Comissão Jurídica e Técnica. (*International Seabed Authority*, 2019, tradução nossa)²⁰

A ISA se compromete, portanto, a garantir a regulamentação das atividades de mineração submarina, de modo a preservar o meio ambiente marinho, garantindo, também, a saúde dos diversos ecossistemas do planeta.

²⁰“During exploration for marine minerals, the International Seabed Authority is required to, among other things, establish and keep under periodic review environmental rules, regulations and procedures to ensure effective protection for the marine environment from harmful effects which may arise from activities in the Area and, together with sponsoring States, apply a precautionary approach to such activities on the basis of recommendations by the Legal and Technical Commission” (*International Seabed Authority*, 2019)



4.2 A inteligência artificial aplicada à exploração do oceano

Esta seção tem por objetivo examinar o emprego da Inteligência Artificial (IA) na preservação de recifes de corais e na detecção do aumento alarmante da população de algas marinhas verdes na Ásia no Mar Amarelo. Ecossistemas marinhos como os recifes de corais desempenham um importante papel na biodiversidade e na proteção de zonas costeiras contra a erosão. Entretanto, esses habitats enfrentam ameaças crescentes como as mudanças climáticas, a poluição e proliferação descontrolada de espécies invasoras como as algas marinhas verdes.

A Inteligência Artificial, tendo a capacidade de processar grandes volumes de dados e identificar padrões complexos, tem se destacado como uma ferramenta poderosa para a preservação do ecossistema marinho, sendo capaz de monitorar a saúde de recifes de corais com robôs 100% autônomos, além de prever o surgimento da proliferação descontrolada de algas marinhas verdes com satélites equipados com um sistema IA. O pilar fundamental da Inteligência Artificial é o Aprendizado Profundo, ou *Deep Learning* (DL), uma subárea do aprendizado de máquina que se baseia na criação de redes neurais artificiais profundas para aprender a representação lógica de uma série de dados. Essa técnica permite que a IA crie previsões de comportamentos detalhados sem depender de regras programadas, pois ela mesma encontra os padrões automaticamente.

A partir disso, podemos desenvolver o entendimento de como a IA é aplicada na análise de imagens submarinas e da superfície do mar, nos ajudando a identificar mudanças nos ecossistemas e usar seu potencial para a conservação da vida marinha. Nesse sentido, cabe ressaltar casos específicos e exemplos da aplicação da IA na preservação do ambiente marinho, conforme serão apresentados nas subseções a seguir.

4.2.1 Detecção e análise de algas marinhas verdes baseadas em IA

O crescimento desenfreado de algas marinhas verdes é um evento desastroso capaz de dizimar ecossistemas inteiros e ocorre geralmente nas costas de países da Ásia, no Mar Amarelo. O uso de satélites da classe SAR (*Synthetic Aperture Radar*) é recomendado para detectar essas algas no oceano devido à aquisição de dados contínua e grande cobertura da



superfície terrestre (Hu, 2009). As algas na superfície do mar se comportam, para o satélite, como um objeto massivo, fazendo com que o sinal do satélite que incide nas algas seja refletido como um eco consideravelmente intenso (Blondeau-Patissier *et. al*, 2014).

Esses satélites contam com sensores capazes de identificar as biomassas, no entanto, não são capazes de processar as informações de maneira eficaz em razão de seus elementos físicos serem muito diferentes um do outro. Baseado nas características das algas, o *Deep-Learning* (DL) oferece a possibilidade de fundir as informações e fornecer um esquema lógico da projeção do comportamento dessas algas (Li *et. al*, 2020). A fim de criar um sistema de detecção da proliferação de algas, o *AlgaeNet* foi desenvolvido, utilizando um modelo baseado no *Deep Learning* de uma IA. As imagens do satélite SAR junto com a dos sensores são inseridas nesse sistema separadamente e a imagem de saída é a previsão de comportamento dessa população de algas (Ronnerberger; Fischer; Brox, 2015).

A performance desse modelo foi capaz de detectar um aumento de 4 vezes no tamanho da população de algas no Mar Amarelo, causando preocupação global, aumento esse relacionado a presença de nutrientes no mar, como fitoplanctons, aumento da temperatura dos oceanos, salinidade e competição entre espécies (Xing *et. al*, 2019).

4.2.2 Mitigação do declínio de recifes de corais por meio de *Deep Learning* aplicado a Veículos Subaquáticos Autônomos (AUVs)

Tendo em vista o fato de que cerca de 25% dos recifes de todo o mundo desapareceram nos últimos 30 anos e a maioria dos restantes corre risco de extinção, a *Woods Hole Oceanographic Institution* (WHOI), a *Autonomous Robotics and Perception Laboratory* (ARPLab) e o *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), estão desenvolvendo um robô capaz de estudar recifes de corais e seus ecossistemas. O *AUV CUREE* (*Curious Underwater Robot for Ecosystem Exploration*) possui sensores visuais, sonoros e oceanográficos, operando juntamente a mergulhadores a fim de entender melhor os impactos humanos no mar. O robô conta com uma plataforma de IA chamada *Jetson*, fabricada pela NVIDIA, utilizada para criar modelos 3D dos recifes, localizar vida marinha, além de ser capaz de navegar e coletar dados automaticamente (Nvidia, 2024).



A visão no fundo do mar não é tão cristalina quanto na superfície, por isso, conforme se tenta enxergar locais mais distantes, a água atenua o espectro visual da luz solar no fundo do mar, alterando algumas cores mais do que as outras e, além disso, partículas de água criam uma visão turva. Como solução, processadores gráficos da NVIDIA, equipados com um sistema chamado *DeepSeeColor*, são utilizados no fundo do mar através de redes neurais que reduzem o efeito turvo da água e também corrigem as cores no fundo do mar em tempo real para que operadores de AUV's como o *CUREE* possam ter uma visão mais clara do fundo do oceano (Jamieson, 2023). Usando uma combinação de câmeras, hidrofones e modelos de Inteligência Artificial, o *CUREE* é capaz de coletar dados e produzir modelos 3D de recifes e do solo marinho, além de criar uma leitura do som espacial através da análise de sons produzidos por vários animais (Girdhar, 2023).

A intenção dos criadores do *CUREE* é de entender melhor os impactos que o ser humano está causando no fundo do mar e criar estratégias para mitigar esse processo. Esse AUV é capaz de coletar dados automaticamente sem a necessidade de um operador, como é o caso dos ROV's (Jamieson, 2023). Espera-se que se tenha uma quantidade de dados suficiente para entender os ecossistemas marinhos e como pesticidas, emissões de carbono, o mergulho autônomo e outros fatores estão afetando os recifes.

4.2.3 O futuro do estudo dos organismos marinhos

O processo atual para o estudo e catalogação de um novo organismo marinho é bastante longo e trabalhoso, uma vez que os cientistas, tendo encontrado um determinado organismo, devem capturá-lo, preservá-lo em um recipiente e posteriormente compará-lo a diferentes organismos já catalogados, de modo a identificar suas características e particularidades. Esse processo pode significar um grande desafio, visto que muitos desses organismos são bastante frágeis e delicados e que a análise das espécies pode demorar muito tempo até que os cientistas possam chegar a um consenso.

Utilizando tecnologias avançadas na área da robótica, bioengenharia e imageamento submarino, um time de pesquisadores de diversas instituições, liderados pela Universidade de *Rhode Island* (URI), foram capazes de capturar amostras preservadas de tecidos de animais



através de um dispositivo de encapsulamento robótico, além de coletar imagens detalhadas desses animais, capturadas por um scanner a laser e uma avançada câmera de campo de luz, permitindo a reconstrução digital da morfologia do animal (*Harvard School Of Engineering and Applied Sciences*, 2024). Segundo o professor Robert J. Wood, professor de engenharia e ciências aplicadas:

Estamos vendo o impacto de novos tipos de robôs marinhos para exploração em águas médias e profundas. Os robôs não apenas vão a lugares difíceis ou impossíveis de serem alcançados pelos humanos, mas nossos dispositivos investigam, interagem e coletam espécimes usando um toque suave ou nenhum toque. (*Harvard School Of Engineering and Applied Sciences*, 2024, tradução nossa)²¹

Essa pesquisa representa, portanto, a possibilidade de grandes avanços no estudo da biologia marinha, uma vez que permite a coleta de uma miríade de dados importantes com o mínimo de interação com as espécies, garantindo sua preservação.

4.2.4 O que as explorações do oceano e do espaço têm em comum?

O espaço e o oceano, apesar de suas muitas diferenças, possuem notáveis semelhanças que os tornam fronteiras igualmente fascinantes e desafiadoras para a raça humana. Questiona-se, agora, como esses dois domínios se correlacionam sob o aspecto das explorações e como determinadas tecnologias podem ser utilizadas tanto para a exploração do espaço, quanto para o oceano. Segundo Aguzzi *et. al* (2022):

Atualmente, uma grande parte da pesquisa espacial já é aplicada ao campo do sensoriamento remoto da superfície oceânica, servindo para fins industriais e científicos, com operações que agora se estendem aos pelágicos de profundidade e áreas do fundo do mar (Aguzzi *et. al*, 2022, tradução nossa)²²

Determinadas tecnologias, portanto, podem ser aplicadas eficientemente a ambos os domínios, tendo em vista as características comuns a eles. Pode-se, também, complementar a

²¹“We are seeing the impact of new types of marine robots for midwater and deep-sea exploration. Not only are robots going places that are difficult or impossible for humans to reach, our devices investigate, interact with, and collect specimens using a gentle touch or no touch at all” (*Harvard School Of Engineering and Applied Sciences*, 2024)

²²“Presently, a large portion of space research is already applied to the field of remote sensing of the ocean surface, serving both industrial and scientific purposes, with operations now extending into deep-sea pelagic and seafloor areas” (Aguzzi *et. al*, 2022)



pesquisa oceânica com tecnologia espacial, e vice-versa. Dados coletados do oceano, por exemplo, podem ser utilizados para calibrar leituras de satélites, assim como telescópios podem ser utilizados para detectar vida marinha na forma de bioluminescência. (Aguzzi *et. al*, 2022).

A biomimética, por exemplo, é uma abordagem da engenharia que visa simular características de organismos vivos a fim de encontrar soluções para um determinado problema. No campo das explorações espacial e submarina, a biomimética pode ser utilizada para substituir veículos de construção mais tradicional, como, por exemplo, os já bem conhecidos *rovers*. O *Silver Crab 2*, por exemplo, é um veículo submarino inspirado em caranguejos capaz de locomover-se em superfícies bastante irregulares, nas quais outros veículos não seriam capazes de operar, removendo rejeitos plásticos encontrados no solo oceânico (*Schuola Superiore Sant'anna*, 2020). Outro exemplo, agora aplicado à exploração espacial, é o do *RoboSimian*, um robô que imita os movimentos dos primatas para atravessar superfícies irregulares desenvolvido pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). O robô quadrupede é capaz de movimentar-se em sete graus de liberdade, podendo, dentre suas muitas capacidades, abrir portas, dirigir carros, acionar botões, perfurar buracos e navegar por superfícies cobertas por detritos, tornando-o bastante versátil (*National Aeronautics and Space Administration*, 2024a).

No entanto, apesar das muitas similaridades materiais e operacionais entre as duas atividades, a exploração submarina aparenta ser menos valorizada em relação à sua contraparte espacial. Essa desvalorização se justifica, por exemplo, na discrepância entre os orçamentos das agências americanas responsáveis, dentre outras atividades, pela exploração do oceano e do espaço. Para o ano de 2025, o orçamento da NASA será de, aproximadamente, 25 milhões de dólares²³ (*National Aeronautics and Space Administration*, 2024b), enquanto o orçamento da NOAA será de pouco mais de 6,5 milhões de dólares²⁴ (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, 2024k). O orçamento anual para a NASA é, portanto, quase 4 vezes maior que o orçamento reservado para a NOAA. Essa discrepância pode prejudicar a percepção pública

²³US\$ 25.383.700,00

²⁴US\$ 5.560.084,00



quanto à relevância da exploração submarina, resultando na priorização das missões espaciais em detrimento dos avanços relativos ao potencial dos oceanos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da pesquisa bibliográfica, ao final desse trabalho, pôde-se obter um panorama do tema examinado, notar a imensa relevância da exploração submarina, bem como o crescente destaque que o tema tem ganhado não somente na comunidade científica, como alvo de estudos, mas também nos setores industriais e de serviços, como fonte de matérias-primas e muitas outras aplicações. Analisou-se também a origem da oceanografia moderna através de uma sucinta análise histórica dos principais aspectos e momentos da exploração do oceano, de modo a compreender a importância do investimento nos campos da exploração e pesquisa.

Foi possível, também, evidenciar o atraso no âmbito da exploração submarina, especialmente se comparado ao progresso da exploração espacial, tendo em vista o fato de que, como demonstrado, grande parte dos oceanos ainda permanecem inexplorados, o potencial energético do oceano é bastante subutilizado e o orçamento para a exploração submarina é, em geral, bastante reduzido tanto no Brasil quanto internacionalmente. Pôde-se mostrar, também, a relevância das descobertas recentes da oceanografia, que têm não somente complementado o arcabouço do conhecimento oceanográfico, mas também aberto as portas para novas soluções no campo da produção energética.

Constata-se, portanto, a necessidade de intensificar os estudos no âmbito da oceanografia e da exploração submarina, de modo a usufruir do imenso potencial dos oceanos e, também, esclarecer os dilemas éticos e ambientais associados à preservação do meio ambiente marinho, garantindo que o progresso não comprometa a saúde dos ecossistemas e decorra de maneira contínua e sustentável. Para tal, este trabalho serve de ponto de partida para que o leitor possa contextualizar-se no tema das explorações e, posteriormente, aprofundar seus conhecimentos ou contribuir com pesquisa própria em tópicos ainda emergentes como a questão da exploração sustentável dos oceanos e do aproveitamento de seu potencial energético.



6 REFERÊNCIAS

AGUZZI, Jacopo et al. **Developing technological synergies between deep-sea and space research.** *Elem Sci Anth*, [S. l.], p. 1-19, 8 fev. 2022. Disponível em: <https://online.ucpress.edu/elementa/article/10/1/00064/120099/Developing-technological-synergies-between-deep>. Acesso em: 19 jul. 2024.

ANDERSON, Thomas. **Deserts on the sea floor: Edward Forbes and his azoic hypothesis for a lifeless deep ocean.** *Endeavour*, [s. l.], v. 30, ed. 4, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0160932706000822?via%3Dihub>. Acesso em: 9 maio 2024.

ASHFOLD, Oliver et al. **What We Know About Deep-sea Mining — and What We Don't.** [S. l.], 23 fev. 2024. Disponível em: <https://www.wri.org/insights/deep-sea-mining-explained>. Acesso em: 26 jun. 2024

BACHRACH, Arthur. **The History of the Diving Bell.** *Historical Diving Times*, [s. l.], ed. 21, 1998. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20090305043637/https://www.thehds.com/publications/bell.html>. Acesso em: 25 abr. 2024.

BISHOP, Tina; TUDDENHAM, Peter; RYAN, Melissa; PAYNE, Diana; BABB, Ivar. **Then and Now: The HMS Challenger Expedition and the “Mountains in the Sea” Expedition.** [S. l.], 2003. Disponível em: <https://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/03mountains/background/challenger/challenger.html>. Acesso em: 2 maio 2024.

BLONDEAU-PATISSIER, D. *et al.* **Progress Oceanography. A review of ocean color remote sensing methods and statistical techniques for the detection, mapping and analysis of phytoplankton blooms in coastal and open oceans.,** [S. l.], v. 123, p. 123-144, 26 jun. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079661114000020>. Acesso em: 31 jul. 2024.

BOYD, Philip W.; CLAUSTRE, Hervé; LÉVY, Marina; SIEGEL, David; WEBER, Thomas. **Multi-faceted particle pumps drive carbon sequestration in the ocean.** *Nature*, [s. l.], v. 568, p. 327-335, 2019. Disponível em: <https://hal.science/hal-02117441/document>. Acesso em: 20 maio 2024.

BRITANNICA. **Sir C. Wyville Thomson.** [S. l.]: Enciclopédia Britannica, 11 abr. 2024. Disponível em: <https://www.britannica.com/biography/C-Wyville-Thomson>. Acesso em: 2 maio 2024.



DIETZ, Robert Sinclair. **Dives of the Bathyscaph Trieste**. São Diego, CA: University of California, 2000.

FIGUEIREDO, Patrícia. **Percentual da verba de pesquisa dedicada aos oceanos é 98% menor no Brasil do que a média mundial, apontam dados da Unesco**. Lisboa: G1, 3 jul. 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/meio-ambiente/noticia/2022/07/03/percentual-da-verba-de-pesquisa-dedicada-aos-oceanos-e-98percent-menor-no-brasil-do-que-a-media-mundial-apontam-dados-da-unesco.ghtml>. Acesso em: 18 jul. 2024.

GALES, Phillip. **Deep Sea Mining Equipment**. [S. l.], 2 set. 2023. Disponível em: https://deepseamining.ac/deep_sea_mining_equipment#gsc.tab=0. Acesso em: 14 jun. 2024.

GIRDHAR, Yogesh. **CUREE: A Curious Underwater Robot for Ecosystem Exploration**, [S. l.], p. 2-3, 23 mar. 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2303.03943>. Acesso em: 31 jul. 2024.

GOLEMBIEWSKI, Kate. **H.M.S. Challenger: Humanity's First Real Glimpse of the Deep Oceans**. Discover Magazine, [s. l.], 19 abr. 2020. Disponível em: <https://www.discovermagazine.com/planet-earth/hms-challenger-humanitys-first-real-glimpse-of-the-deep-oceans>. Acesso em: 2 maio 2024.

HARVARD SCHOOL OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES. **Research demonstrates success of new technology in conducting deep-sea research on fragile organisms**. [S. l.], 17 jan. 2024. Disponível em: <https://seas.harvard.edu/news/2024/01/research-demonstrates-success-new-technology-conducting-deep-sea-research-fragile>. Acesso em: 18 jul. 2024.

HU, Chuanmin. **A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans**. Elsevier, [s. l.], 2009. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/222424883_A_novel_ocean_color_index_to_detect_floating_algae_in_the_global_oceans. Acesso em: 31 jul. 2024.

INTERNATIONAL SEABED AUTHORITY. **Recommendations for the guidance of contractors for the assessment of the possible environmental impacts arising from exploration for marine minerals in the Area**. Kingston: [s. n.], 2019. Disponível em: <https://www.isa.org.jm/wp-content/uploads/2023/08/2315256E.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2024.

INTERNATIONAL SEABED AUTHORITY. **The Mining Code**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.isa.org.jm/the-mining-code/>. Acesso em: 12 jun. 2024.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Ocean energy**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Ocean->



energy#:~:text=Wave%20energy%2C%20whereby%20converters%20capture,make%20use%20of%20height%20differences. Acesso em: 9 maio 2024.

JAMIESON, Steward. **DeepSeeColor: Realtime Adaptive Color Correction for Autonomous Underwater Vehicles**. [S. l.], 30 maio 2023. Disponível em: <https://www.stewartjamieson.com/talk/deepseecolor-realtime-adaptive-color-correction-for-autonomous-underwater-vehicles/>. Acesso em: 26 jun. 2024.

KELLEY, Deborah S. et al. **An off-axis hydrothermal vent field near the Mid-Atlantic Ridge at 30° N**. *Nature*, [s. l.], v. 412, p. 145-149, 12 jul. 2001.

KEMP, Peter. **The Oxford Companion to Ships and the Sea**. [S. l.]: Oxford University Press, 1976.

KENNEDY, John F. **Rice University, 12 September 1962**. [S. l.: s. n.], 1962. Disponível em: <https://www.jfklibrary.org/learn/about-jfk/historic-speeches/address-at-rice-university-on-the-nations-space-effort>. Acesso em: 31 jul. 2024.

KHAN, N. et al. **A Review of ocean tidal, wave and thermal energy technologies**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 72, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117300965>. Acesso em: 9 maio 2024.

KLOSNER, Michael R. **Passive Acoustic Localization of Sperm Whales to Facilitate Ship Strike Avoidance**. Faro, Portugal: UNIVERSIDADE DO ALGARVE, 2022. 84 p. Disponível em: <https://sapientia.ualg.pt/entities/publication/1cc22db6-5d7e-4b09-a2e7-d472c4247c01>. Acesso em: 17 jun. 2024.

LI, Xiaofenget et al. **Deep-learning-based information mining from ocean remote-sensing imagery**. *National Science Review*, [s. l.], v. 7, ed. 10, p. 1584–1605, 2020. Disponível em: <https://academic.oup.com/nsr/article/7/10/1584/5809984>. Acesso em: 31 jul. 2024.

MARGULIA, Lynn; SCHWARTZ, Karlene V. **Five kingdoms: an illustrated guide to the phyla of life on earth**. Freeman, 1998.

MARINHA DO BRASIL. **PNBoia**. [S. l.], 2024b. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-goos-brasil/pnboia>. Acesso em: 13 maio 2024.

MARINHA DO BRASIL. **NPqHo Vital de Oliveira**. [S. l.], 2024a. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/dhn/?q=pt-br/gnho/vital-de-oliveira>. Acesso em: 11 jun. 2024.

MARINHA DO BRASIL. **Navio de Pesquisa Hidroceanográfico “Vital de Oliveira” encerra primeira pernada da Comissão “Comitê Gestor II”**. [S. l.], 12 dez. 2022. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/dhn/?q=pt-br/gnho/vital-de-oliveira>.



em: <https://www.marinha.mil.br/noticias/navio-de-pesquisa-hidroceanografico-vital-de-oliveira-encerra-primeira-pernada-da-comissao>. Acesso em: 11 jun. 2024.

MARX, Robert. **The History of Underwater Exploration**. 2. ed. Canadá: Dover Publications, 1990.

MEWES, K. et al. **Impact of depositional and biogeochemical processes on small scale variations in nodule abundance in the Clarion-Clipperton Fracture Zone**. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, [s. l.], v. 91, p. 125-141, Setembro 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0967063714001010>. Acesso em: 26 jun. 2024.

MORDOR INTELLIGENCE. **Tamanho do mercado ROV e análise de ações – Tendências e previsões de crescimento (2024 – 2029)**. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/rov-market>. Acesso em: 11 jun. 2024.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **FY 2025 Budget Request**. [S. l.: s. n.], 2024b. Disponível em: <https://www.nasa.gov/fy-2025-budget-request/>. Acesso em: 22 jul. 2024.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Robosimian**. [S. l.], 2024a. Disponível em: <https://www-robotics.jpl.nasa.gov/how-we-do-it/systems/robosimian/>. Acesso em: 19 jul. 2024.

NATIONAL INVENTORS HALL OF FAME. **Jacques-Yves Cousteau: Diving Equipment**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.invent.org/inductees/jacques-yves-cousteau>. Acesso em: 2 maio 2024.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) Technology**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://coast.noaa.gov/data/czm/media/technicalfactsheet.pdf>. Acesso em: 2 maio 2024.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Historical Timeline**. [S. l.], 2024a. Disponível em: <https://oceanexplorer.noaa.gov/history/timeline/welcome.html?page=2>. Acesso em: 9 maio 2024.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Most of our ocean is unexplored**. [S. l.], 2024b. Disponível em: <https://oceanexplorer.noaa.gov/world-oceans-day/reason-1.html#:~:text=Given%20that%20the%20ocean%20is,of%20our%20ocean%20is%20unknown>. Acesso em: 2 maio 2024



NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Human-occupied Vehicles.** [S. 1.], 2024c. Disponível em: <https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/subs/hovs/hovs.html>. Acesso em: 31 jul. 2024.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Remotely Operated Vehicles.** [S. 1.], 2024d. Disponível em: <https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/subs/rovs/rovs.html>. Acesso em: 31 jul. 2024. .

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Autonomous Underwater Vehicles.** [S. 1.], 2024e. Disponível em: <https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/subs/auvs/auvs.html>. Acesso em: 31 jul. 2024.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **CTD.** [S. 1.], 2024f. Disponível em: <https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/ctd/ctd.html>. Acesso em: 31 jul. 2024.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **SONAR.** [S. 1.], 2024g. Disponível em: <https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/sonar/sonar.html>. Acesso em: 31 jul. 2024.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Drifters.** [S. 1.], 2024h. Disponível em: <https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/drifters/drifters.html>. Acesso em: 31 jul. 2024.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Technologies for Ocean Acoustic Monitoring.** [S. 1.], 2024i. Disponível em: <https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/acoustics/acoustics.html>. Acesso em: 31 jul. 2024.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Fontes Hidrotermais.** [S. 1.: s. n.], 2024j. Disponível em: <https://oceanexplorer.noaa.gov/edu/materials/portugues-fontes-hidrotermais-ficha-technica.pdf>. Acesso em: 20 maio 2024.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **NOAA Budget Summary FY2025.** [S. 1.: s. n.], 2024k. Disponível em: https://www.noaa.gov/sites/default/files/2023-05/NOAA_Blue_Book_2024.pdf. Acesso em: 22 jul. 2024.

NATIONAL OCEAN SERVICE. **How deep is the ocean?.** [S. 1.], 2023. Disponível em: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/oceandepth.html#:~:text=Challenger%20Deep%20is%20a%20approximately%2010%2C935,of%20the%20trench%20in%201875>. Acesso em: 2 maio 2024.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **From Monsoons to Microbes: Understanding the Ocean's Role in Human Health.** Washington (DC): National Academies Press (US), 1999.



ISBN 0-309-06569-0. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK230696/>. Acesso em: 31 jul. 2024.

NAVAL HISTORY AND HERITAGE COMMAND, **The submarine Turtle: Naval Documents of the Revolutionary War**. [S. l.]: US Navy, 2 nov. 2017. Disponível em: <https://www.history.navy.mil/research/library/online-reading-room/title-list-alphabetically/s/submarine-turtle-naval-documents.html>. Acesso em: 25 abr. 2024.

NAVAL HISTORY AND HERITAGE COMMAND, **Submarine Development: A Short History**. [S. l.]: US Navy, 12 out. 2022. Disponível em: <https://www.history.navy.mil/content/history/museums/nmusn/education/educational-resources/history-of-submarines/submarine-development--a-short-history.html>. Acesso em: 25 abr. 2024.

NVIDIA (ed.). **Turning the Tide on Coral Reef Decline: CUREE Robot Dives Deep With Deep Learning**. [S. l.], 26 out. 2023. Disponível em: <https://blogs.nvidia.com/blog/coral-reef-decline-curee-robot-jetson-isaac-omniverse/>. Acesso em: 25 jun. 2024.

NIHOUS, Gérard. **A Preliminary Assessment of Ocean Thermal Energy Conversion Resources**. *J. Energy Resour. Technol*, [s. l.], 2007. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/energyresources/article-abstract/129/1/10/464443/A-Preliminary-Assessment-of-Ocean-Thermal-Energy?redirectedFrom=PDF>. Acesso em: 2 maio 2024.

OCEANPACT. **OceanPact adquire ROVs e aumenta atendimento ao setor offshore**. [S. l.], c2024. Disponível em: <https://oceanpact.com/oceanpact-adquire-rovs-e-aumenta-atendimento-ao-setor-offshore/>. Acesso em: 11 jun. 2024.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **The Ocean Economy in 2030**. Paris: OECD Publishing, 2016. Disponível em: https://www.oecd-ilibrary.org/economics/the-ocean-economy-in-2030_9789264251724-en. Acesso em: 2 maio 2024.

PEACOCK, Thomas; ALFORD, Matthew. **The Race Is on to Mine and Protect the Deep Seafloor**. *Scientific American*, [S. l.], p. 72-77, 1 maio 2018. Disponível em: <https://www.scientificamerican.com/article/the-race-is-on-to-mine-and-protect-the-deep-seafloor/>. Acesso em: 5 ago. 2024.

PEGORELLI, Camila; DOTTORI, Marcelo; FORTES, João Flesch. **Evaluating the gravity wave energy potential off the Brazilian coast**. *Brazilian Journal of Oceanography*, São Paulo, v. 66, 21 dez. 2018. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/bjoce/article/view/153118/149642>. Acesso em: 17 jun. 2024.



PIECUCH, Hanna. **Who is Alvin and what are sea trials?**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.whoi.edu/oceanus/feature/who-is-alvin-and-what-are-sea-trials>. Acesso em: 2 maio 2024.

QUT. **Eliminating invasive reef species – COTSbot and RangerBot**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://research.qut.edu.au/reefresearch/our-research/eliminating-invasive-reef-species-cotsbot-rangerbot/>. Acesso em: 11 jun. 2024.

QURESHI, Asad. **Challenges and Prospects of Using Treated Wastewater to Manage Water Scarcity Crises in the Gulf Cooperation Council (GCC) Countries**. Water, Emirados Árabes Unidos, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/7/1971>. Acesso em: 2 maio 2024.

RONNEBERGER, P; FISCHER, T; BROX. **Convolutional networks for biomedical image segmentation. In: International conference on medical image computing and computer-assisted intervention**, [S. l.], p. 234-241, 21 mar. 2015. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-24574-4_28. Acesso em: 31 jul. 2024.

SCHUOLA SUPERIORE SANT'ANNA. **Recent research by Sant'anna School Biorobotics Institute and Stazione Zoologica Anton Dohrn published In Science robotics finds new ways to protect marine ecosystem. Crab robot Silver 2 can start to interact with the underwater environment**. [S. l.], 12 maio 2020. Disponível em: <https://www.santannapisa.it/en/node/50402>. Acesso em: 19 jul. 2024.

SCINEWS. **Researchers Discover Five New Hydrothermal Vents in Pacific Ocean**. SCINEWS, [s. l.], 27 mar. 2024. Disponível em: https://www.sci.news/othersciences/geoscience/east-pacific-rise-hydrothermal-vents-12799.html#google_vignette. Acesso em: 20 maio 2024.

UNITED STATES COAST GUARD. **USCGC Polar Star (WAGB 10)**. [S. l.], 2003. Disponível em: https://www.pacificarea.uscg.mil/Portals/8/District_13/lib/doc/factsheet/uscgc_polar_star.pdf. Acesso em: 11 jun. 2024.

UNITED STATES GEOLOGICAL SERVICE. **How Much Water is There on Earth?**. [S. l.], 2019. Disponível em: https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/how-much-water-there-earth?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects. Acesso em: 2 maio 2024.

UNITED STATES GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE. **Science & Tech Spotlight: Renewable Ocean Energy**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <https://www.gao.gov/products/gao-21-533sp>. Acesso em: 6 maio 2024.



UNITED STATES NAVY. **2020 Annual Report Of The Surveillance Towed Array Sensor System Low Frequency Active (SURTASS LFA) Marine Mammal Monitoring (M3) Program.** [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: https://www.nepa.navy.mil/Portals/20/Documents/surtass-lfa/2020/12/DoN_SURTASS-LFA-Sonar_2020-Annual_M3-Rept.pdf#page=6.15. Acesso em: 12 jun. 2024.

WILLIAMS, Rob et al. **Noise from deep-sea mining may span vast ocean areas: Potential harm is understudied and largely overlooked.** *Science*, [s. l.], v. 377, p. 157-158, 7 jul. 2022. Disponível em: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.abo2804>. Acesso em: 26 jun. 2024.

WOODS HOLE OCEANOGRAPHIC INSTITUTE. **Alvin Specifications.** [S. l.], 2003. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20120509221913/http://www.whoi.edu/page.do?pid=9915>. Acesso em: 2 maio 2024.

WOODS HOLE OCEANOGRAPHIC INSTITUTE. **History of Alvin.** [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.whoi.edu/what-we-do/explore/underwater-vehicles/hov-alvin/history-of-alvin/>. Acesso em: 2 maio 2024.

XING, Q. *et al.* *Remote Sens Environ.* **Monitoring seaweed aquaculture in the Yellow Sea with multiple sensors for managing the disaster of macroalgal blooms.** , [S. l.], p. 111-279, 15 jun. 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/333994233_Monitoring_seaweed_aquaculture_in_the_Yellow_Sea_with_multiple_sensors_for_managing_the_disaster_of_macroalgal_blooms. Acesso em: 31 julho 2024.

