



INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
Fluminense

MINISTÉRIO DA
EDUCAÇÃO



PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MODALIDADE PROFISSIONAL

PROJETO DE GERADOR LINEAR COM NÚCLEO DE AR PARA
CAPTADOR DE ENERGIA DE ONDAS DO TIPO PONTO ABSORVEDOR

PEDRO HENRIQUE CASTELLO BRANCO DÁGOLA

MACAÉ-RJ

2023

PEDRO HENRIQUE CASTELLO BRANCO DÁGOLA

PROJETO DE GERADOR LINEAR COM NÚCLEO DE AR PARA
CAPTADOR DE ENERGIA DE ONDAS DO TIPO PONTO ABSORVEDOR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, área de concentração Sustentabilidade Regional, linha de pesquisa Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação.

Orientador(a): Dr. Marcos Antonio Cruz Moreira

Coorientador(a): Dr. Eliab Ricarte Beserra

MACAÉ-RJ

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

D127p Dágola, Pedro Henrique Castello Branco, 1985-.
Projeto de gerador linear com núcleo de ar para captador de energia de ondas do tipo ponto absorvedor/ Pedro Henrique Castello Branco. — Macaé, RJ, 2023.
xii, 76 p.: il. color.

Orientador: Marcos Antonio Cruz Moreira, 1964-.
Coorientador: Eliab Ricarte Beserra, 1963-.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Macaé, RJ, 2023.
Inclui referências.
Área de concentração: Sustentabilidade Regional.
Linha de pesquisa: Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação.

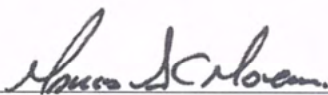
1. Gerador linear. 2. Energia de ondas. 3. Ponto absorvedor. I. Dágola, Pedro Henrique Castello Branco, 1985-. II. Moreira, Marcos Antonio Cruz, 1964-, orient. III. Beserra, Eliab Ricarte, 1963-, coorient. IV. Título.

CDD 621.316 23. ed.


Dissertação intitulada **PROJETO DE GERADOR LINEAR COM NÚCLEO DE AR PARA CAPTADOR DE ENERGIA DE ONDAS DO TIPO PONTO ABSORVEDOR**, elaborada por **Pedro Henrique Castelo Branco Dágola** e apresentada, publicamente perante a Banca Examinadora, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal Fluminense - IFFluminense, na área concentração Sustentabilidade Regional, linha de pesquisa Avaliação, Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação.

Aprovado em: 07/06/2023

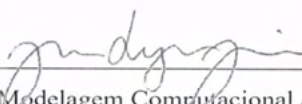
Banca Examinadora:




Marcos Antonio Cruz Moreira, Doutor em Engenharia Elétrica / Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Instituto Federal Fluminense (IFFluminense) – Orientador



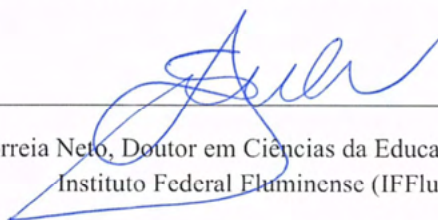
Eliab Ricarte Bessera, Doutor em Engenharia Oceânica / Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia COPPE/UFRJ, COPPE/UFRJ – Co-Orientador



Jader Lugon Junior, Doutor em Modelagem Computacional / Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Instituto Federal Fluminense (IFFluminense)



Eurico Huziwara, Doutor em Produção Vegetal / Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Universidade Estácio de Sá (UNESA)



Severino Joaquim Correia Neto, Doutor em Ciências da Educação / Universidad Americana – UA, Instituto Federal Fluminense (IFFluminense)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Bruna cuja presença foi essencial. Gratidão por todo o seu apoio e suporte.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me guiar, dar forças e sabedoria para seguir em frente e passar por todas as dificuldades.

Aos meus pais, mesmo estando longe, sempre torceram e me incentivaram pelos caminhos dos estudos.

Ao meu orientador professor Marcos Antônio Cruz Moreira pela disponibilidade e prontidão em guiar os rumos do trabalho e também ao professor e amigo Eliab Ricarte pela a ideia de tema, paciência, conhecimentos.

Aos professores, funcionários e amigos do PPEA que contribuíram para meu crescimento intelectual e pessoal.

EPÍGRAFE

“Toda energia é para ser de graça
Na próxima vida eu quero ser uma lâmpada de LED
Que espalha luz sobre a face da terra.”
(Sonar - Baiana System).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Síntese dos termos pesquisados e quantidade de publicações encontradas e selecionadas.....	06
Figura 2 – Limites marítimos.....	09
Figura 3 – Incidente de vazamento de óleo no mar ocorrido em 2019 no litoral brasileiro.....	13
Figura 4 – Lista de derramamentos de Petróleo no Brasil.....	14
Figura 5 – Contenção de Óleo no Porto de Santos.....	16
Figura 6 – Domestic electricity supply by source in Brazil.....	22
Figura 7 – Estimated Brazilian theoretical potential of waves and tides.....	23
Figura 8 – Potential interactions between stressor and receptor.....	24
Figura 9 – Maritime zones under the United Nations Convention of the Law of the Sea.....	28
Figura 10 – Linearização de um gerador rotativo de ímã permanente.....	39
Figura 11 – Gerador Linear de Ímã Permanente Tubular (a) e Planar de dois lados (b).....	40
Figura 12 – Gerador Linear de Ímã Permanente Planar de dois lados.....	40
Figura 13 – Gerador Linear planar de dois lados: a - com dois sistemas de armadura externa com ranhuras e b – com um sistema de armadura interna com ranhuras.....	41
Figura 14 – Gerador Linear Planar sem Fendas: (a) um lado com núcleo de armadura, (b) dois lados com núcleo de ar.....	42
Figura 15 – (a) Estrutura do Gerador de dois lados, (b) Vista Superior, (c) Vista Lateral.....	44
Figura 16 – Parâmetros para a Bobina.....	45
Figura 17 – Parâmetros para Ímãs Permanentes.....	48
Figura 18 – Circuito Magnético Equivalente.....	49
Figura 19 – Parâmetros para o Modelo de Relutância.....	50
Figura 20 – Potência de Saída versus: (a) Resistência de Carga, (b) Velocidade Linear.....	54
Figura 21 – Potência de Saída versus: (a) Espaçamento das Bobinas, (b) Largura Interna, (c) Distância do Entreferro, (d) Espessura do Ímã, (e) Comprimento Ativo.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Endangered species of marine mammals found in Brazilian protected areas.....	28
Tabela 2 – Marine fish economically important for Brazil.....	30
Tabela 3 – Endangered bird taxa according to the PAN	31
Tabela 4 – Species of sea turtles from Brazil.....	32
Tabela 5 – Parâmetros Gerais (Básicos).....	44
Tabela 6 – Resultados comparados para os Parâmetros Gerais (Derivados).....	45
Tabela 7 – Parâmetros da Bobina (Básicos).....	46
Tabela 8 – Resultados comparados para os Parâmetros da Bobina (Derivados).....	46
Tabela 9 – Parâmetros do Ímã permanente (Básicos).....	48
Tabela 10 – Resultados calculados para os Parâmetros do Ímã permanente (Derivados).....	49
Tabela 11 – Resultados calculados para o Modelo de Relutância.....	50
Tabela 12 – Resultados calculados para os Caminhos do Fluxo Magnético.....	51
Tabela 13 – Resultados comparados para as Variáveis Calculadas.....	52

PROJETO DE GERADOR LINEAR COM NÚCLEO DE AR PARA CAPTADOR DE ENERGIA DE ONDAS DO TIPO PONTO ABSORVEDOR

RESUMO

Este trabalho partiu de uma demanda apresentada pelo Programa de Planejamento Energético PPE /COPPE/UFRJ de projetar um gerador linear para o captador de energia de ondas do tipo ponto absorvedor para águas de profundidade médias e rasas. A estrutura da dissertação é composta por três artigos científicos que delineiam os estudos da pesquisa. Os dois artigos iniciais visaram entender os aspectos ambientais associados à temática energia de ondas. O primeiro deles foi elaborado através de revisão de literatura e consultas às legislações que promovem proteção legal à zona da costa brasileira, apontando os impactos ambientais relativos ao desenvolvimento de grandes empreendimentos comerciais de energia dentre eles, a geração de energia das ondas. O segundo artigo publicou uma pesquisa na literatura com o objetivo de sintetizar os conhecimentos sobre os potenciais riscos de colisão de animais marinhos, como mamíferos, peixes e pássaros, em dispositivos de energia marinha renováveis (EMR), e identificar as espécies prioritárias para o monitoramento ambiental ao longo da costa brasileira. O terceiro artigo visou contribuir de forma mais assertiva com a demanda do PPE/COOPPE/UFRJ. Descreveu-se o procedimento de projeto (*cookbook*) com o cálculo das variáveis, a partir da determinação das características físicas, para um gerador linear planar de dois lados, com núcleo de ar e sem ranhuras. O procedimento foi baseado em trabalhos publicados com resultados validados a partir de simulação e protótipo. Foram plotados gráficos no Programa *R* da potência de saída gerada *versus* a variação de alguns parâmetros construtivos, e os resultados apresentaram alta similaridade com os trabalhos base, possibilitando novas aplicações em projetos de geradores de outras potências.

Palavras-chave: Energia de Ondas. Gerador Linear com Núcleo de Ar. Ponto Absorvedor.

**PROJECT OF AIR CORED LINEAR GENERATOR FOR WAVE ENERGY POINT
ABSORBER DEVICE**

ABSTRACT

This work emerged from a demand presented by the Energy Planning Program PPE/COPPE/UFRJ to design a linear generator for the point absorber wave energy converter in shallow and intermediate-depth waters. The structure of the dissertation comprises three scientific articles that outline the research studies. The first two articles aimed to understand the environmental aspects associated with wave energy. The first article was developed through literature review and consultation of legislations promoting legal protection of the Brazilian coastal zone, highlighting the environmental impacts related to the development of large commercial energy projects, including wave energy generation. The second article published a literature survey to synthesize knowledge on the potential risks of marine animal collisions, such as mammals, fish, and birds, with renewable marine energy devices (RME) and identify priority species for environmental monitoring along the Brazilian coast. The third article aimed to contribute more directly to the demand from PPE/COPPE/UFRJ. It described the design procedure (cookbook) with the calculation of variables based on the determination of physical characteristics for a two-sided, air cored, and slotless linear generator. The procedure was based on published works with validated results through simulation and prototyping. Power output generated versus the variation of some constructive parameters was plotted using the R Program, and the results showed high similarity with the reference works, enabling new applications in generator projects of other power ranges.

Keywords: *Wave Energy. Linear Generator Air Cored. Absorber Point.*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	viii
RESUMO.....	ix
<i>ABSTRACT</i>	x
APRESENTAÇÃO.....	01
ARTIGO CIENTÍFICO 1: EMPREENDIMENTOS NA ZONA COSTEIRA BRASILEIRA: proteção legal e impactos ambientais.....	04
1. INTRODUÇÃO.....	05
2. DESENVOLVIMENTO.....	05
2.1. A zona costeira brasileira: delimitações e proteção legal.....	06
2.2. Grandes empreendimentos na zona costeira brasileira.....	09
2.3. Legislação e impactos ambientais da geração de energia eólica no Brasil.....	10
2.4. Acidentes envolvendo a exploração de petróleo no Brasil.....	12
2.5. Impactos ambientais das atividades portuárias e embarcações.....	14
3. CONCLUSÃO.....	16
4. REFERÊNCIAS.....	17
ARTIGO CIENTÍFICO 2: IMPACTOS AMBIENTAIS EM SISTEMAS DE ENERGIA MARINHA: RISCOS DE COLISÃO DE ANIMAIS MARINHOS E ESPÉCIES PRIORITÁRIAS PARA O MONITORAMENTO NO BRASIL.....	21
1. INTRODUCTION.....	22
2. METHODOLOGY.....	23
3. ENVIRONMENTAL IMPACTS ON THE DEVELOPMENT OF RENEWABLE MARINE ENERGIES.....	24
4. PRIORITY SPECIES FOR MONITORING THE RISK OF COLLISION WITH MARINE RENEWABLE ENERGY SYSTEMS IN BRAZIL.....	27
4.1. Marine mammals.....	27
4.2. Fish.....	29
4.3. Seabird.....	29
4.4. Marine reptiles.....	32
5. CONCLUSION.....	33
6. REFERENCES.....	33
ARTIGO CIENTÍFICO 3: PROJETO DE GERADOR LINEAR COM NÚCLEO DE AR PARA CONVERSORES DE ENERGIA DE ONDAS.....	38
1. INTRODUÇÃO.....	38
2. DESENVOLVIMENTO DO CÁLCULO DO GERADOR E RESULTADOS	43

COMPARADOS.....	
2.1 Parâmetros gerais.....	43
2.2 Parâmetros da bobina.....	45
2.3 Parâmetro do ímã permanente.....	47
2.4 Cálculo da relutância magnética do gerador.....	49
2.5 Cálculo do fluxo magnético.....	51
2.6 Variáveis calculadas.....	52
3. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
4. REFERÊNCIAS.....	57
5. APÊNDICE A.....	59
CONCLUSÃO DA PESQUISA.....	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DA DISSERTAÇÃO.....	63

APRESENTAÇÃO

A energia das ondas tem caráter limpo e renovável, além de distribuição mundial e possibilidade de geração e consumo próximos, levando a menores perdas na transmissão, esse diferencial traz grande contribuição para a diminuição das pegadas de carbono. Soma-se a isso, o ganho de eficiência energética proporcionado pela estratégia de controle. Este controle permite a otimização da produção de energia por unidade de máquina, reduzindo a ocupação espacial sobre os oceanos.

No Brasil, os estudos sobre a energia de ondas são promissores no sentido de diversificar a matriz energética. Este tipo de fonte é uma forma de energia solar concentrada, pois a formação das ondas representa a transferência da energia dos ventos sobre a superfície oceânica (MATTOS et al., 2016; CUNHA, 2014). A formação das ondas é influenciada por três fatores, sendo eles: a intensidade dos ventos sobre a superfície oceânica, a área de atuação do vento e o tempo de transferência da energia dos ventos. As ondas contêm energia potencial, que representa a diferença de altura entre a onda e a superfície e energia cinética, o movimento das partículas entre a crista e a cava (CUNHA, 2014).

O potencial energético teórico da fonte primária de cada fenômeno oceânico na costa brasileira pode ser verificado a seguir: ondas geradas pelo vento - 10 (dez) terawatt (TW); marés - 3 (três) TW; corrente de maré - 5 (cinco) TW e energia térmica dos oceanos (OTEC) - 14 (quatorze) TW. Ainda que cada fenômeno seja avaliado isoladamente, percebe-se que seu potencial excede o atual consumo mundial, menor que 1TW (TOLMASQUIM, 2016). Somados, então, representam fontes inesgotáveis de energia em apenas quatro de seus fenômenos. Além destes, existem outros fenômenos oceânicos com potencial energético global ainda não avaliado, mas que contribuem positivamente para que o mar possa ser visto como fonte energética (RICARTE, 2017).

O Programa de Planejamento Energético (PPE) da COPPE/UFRJ é referência no Brasil em iniciativas de estudos nessa área. Pesquisadores da instituição projetaram um dispositivo captador de energia de ondas do tipo ponto absorvedor para ser instalado na região *near-shore* que tem como princípio de funcionamento o corpo flutuante (boia) sobre a água que realiza a extração do movimento das ondas transferindo energia diretamente do movimento vertical do eixo acoplado ao flutuador. A vantagem do ponto absorvedor frente aos outros tipos de captadores é a sua capacidade

de absorver energia independentemente da direção das ondas incidentes. A presente pesquisa teve início com a demanda de projetar um gerador linear para o captador de energia de ondas desenvolvido pelo PPE/COPPE/UFRJ.

Nesse sentido, a pesquisa contou com a experiência do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental (PPEA/IFF Macaé) que já realizou estudos, como o de Cunha (2017) que utilizou o conversor de ondas do tipo ponto absorvedor para verificar a viabilidade de produção de energia. O trabalho testou a utilização de um gerador linear utilizando uma topologia com ímãs permanentes. Ademais, Martins (2019) construiu um protótipo de gerador linear para ser aplicado a um sistema de captação de energia de ondas do tipo ponto absorvedor. O autor verificou que os geradores lineares provaram ser adequados para utilização em conversão de energia de ondas. A comparação realizada abordou a configuração geral do sistema, a distribuição do fluxo magnético e o tipo de núcleo empregado.

Partindo-se da demanda apresentada pelo PPE/COPPE/UFRJ e da experiência do PPEA/IFF Macaé, a estrutura desta dissertação é composta por três artigos científicos que delineiam os estudos da pesquisa. Os dois artigos iniciais visaram entender os aspectos ambientais associados à pesquisa em energia de ondas. O primeiro deles foi elaborado e publicado através de revisão de literatura e consultas às legislações que promovem proteção legal à zona da costa brasileira, apontando os impactos ambientais associados ao desenvolvimento de grandes empreendimentos comerciais de energia dentre eles, a geração de energia das ondas. O trabalho analisa o princípio da precaução quanto a sua aplicabilidade na ausência de certeza científica sobre a avaliação de danos, bem como, o princípio do poluidor pagador quanto ao suporte financeiro para recuperação das degradações ambientais decorrentes dos empreendimentos na zona costeira. O artigo foi publicado na Revista Brasileira do Meio Ambiente – RBMV, na edição de maio/agosto de 2022, ISSN: 2595-4431, Fator de impacto Qualis/CAPES: B3. Foi submetido em novembro/2021 e aceito em fevereiro/2022.

O segundo artigo foi desenvolvido e publicado pela Revista Gestão Costeira Integrada – *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, no volume 22, edição 2, páginas 127 até 143, ISSN: 1646-8872, Fator de Impacto: Qualis/CAPES: B2, submetido em fevereiro/2022 e aceito em setembro/2022. Foi realizada uma pesquisa na literatura com o objetivo de sintetizar os conhecimentos sobre os potenciais riscos de colisão de animais marinhos, como mamíferos, peixes e pássaros, em dispositivos de energia marinha renováveis (EMR). O artigo fornece um instrumento para empreendedores, pesquisadores e órgãos de meio ambiente envolvidos com o licenciamento

ambiental, ao indicar espécies prioritárias para o monitoramento da interação e o risco de colisão com dispositivos de EMR ao longo da costa brasileira, com informações de distribuição geográfica, habitats e categoria de risco de extinção ou *status* de exploração necessárias a estudos de impacto ambiental.

O terceiro artigo visou contribuir de forma mais assertiva com a demanda do PPE/COOPPE/UFRJ de desenvolvimento de um gerador linear que se encaixe ao sistema de captação de ondas do tipo ponto absorvedor para águas de profundidade médias e rasas. Para isso, foi realizada uma visita à empresa Enersud Energia Limpa LTDA. que tem mais de 20 anos de experiência em desenvolvimento e fabricação de geradores de ímã permanente acoplados a turbinas eólicas. Após a visita e extensa pesquisa na literatura acerca das características construtivas de geradores e suas topologias, definiu-se que a melhor para a demanda foi a planar de dois lados, com núcleo de ar e sem ranhuras. Essa topologia possui alta estabilidade das forças de atração dos ímãs que permite que não ocorram torções no translador, o que poderia aumentar a complexidade construtiva, o custo do equipamento, e dificultaria o alinhamento do gerador com distâncias de entreferro maiores.

O último artigo, portanto, descreve o procedimento de projeto (*cookbook*) com os cálculos das variáveis do gerador a partir da determinação das características físicas. O roteiro de cálculo possui 6 etapas que abordam os aspectos construtivos gerais, da bobina, do ímã permanente, do modelo de relutância, do cálculo do fluxo magnético e, por fim, as variáveis calculadas com as informações de tensão, corrente, potência gerada e eficiência. O procedimento desenvolvido foi baseado em trabalhos publicados por Wahyudie (2017) e Niknafs (2022) que contam com resultados validados a partir de simulação e protótipo. Foram plotados gráficos no Programa *R* da potência de saída gerada *versus* a variação de alguns parâmetros construtivos (distância do entreferro, espessura da bobina, espessura do ímã, entre outros). Os resultados mostraram-se promissores e apresentaram alta similaridade com os trabalhos base, possibilitando novas aplicações em projetos de geradores de outras potências.

A seguir são apresentados os três artigos supracitados.

ARTIGO CIENTÍFICO 1

OPEN
JOURNAL
SYSTEMS

ISSN: 2595-4431

Revista Brasileira de Meio Ambiente, v.10, n.2. 078-094 (2022)

Revista Brasileira de Meio Ambiente

Dágola et al



Empreendimentos na zona costeira brasileira: proteção legal e impactos ambientais

Pedro Henrique Castello Branco Dágola^{1*}, Augusto Eduardo Miranda Pinto², Marcos Antônio Cruz Moreira³

¹Mestrando em Engenharia Ambiental - Desenvolvimento Sustentabilidade e Inovação, Instituto Federal Fluminense, Brasil. (*Autor correspondente: pedrodagola@gmail.com)

²Doutor em Direito da Cidade, Professor do Instituto Federal Fluminense, Brasil.

³Doutor em Engenharia Elétrica, Professor do Instituto Federal Fluminense, Brasil.

Histórico do Artigo: Submetido em: 23/11/2021 – Revisado em: 28/12/2021 – Aceito em: 18/02/2022

RESUMO

As zonas costeiras são regiões que abrigam uma extraordinária variedade de seres vivos e recebem pressões antrópicas significativas. O Direito Ambiental tem papel relevante na proteção dessas regiões, impulsionando um desenvolvimento sustentável que garanta a sobrevivência do homem e das demais espécies no futuro. Neste trabalho, analisa-se o princípio da precaução quanto a sua aplicabilidade na ausência de certeza científica sobre a avaliação de danos, bem como, o princípio do poluidor pagador quanto ao suporte financeiro para recuperação das degradações ambientais decorrentes dos empreendimentos na zona costeira. Apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre a proteção legal garantida à zona da costa brasileira, apontando os impactos ambientais associados ao desenvolvimento de grandes empreendimentos offshore e nearshore, são eles: a geração de energia eólica, a exploração de petróleo e as atividades portuárias e embarcações.

Palavras-Chaves: Zona Costeira, Energia Eólica, Exploração de Petróleo, Atividades Portuárias, Direito Ambiental.

Enterprises in the Brazilian shore zone: legal protection and environmental impacts

ABSTRACT

Shore zones are the regions that shelter an extraordinary variety of living beings and receive significant anthropogenic pressures. Environmental Law plays an important role in protecting these regions, promoting sustainable development that guarantees the survival of human being and other species in the future. In this work, the precautionary principle is analyzed as to its applicability in the absence of scientific certainty about the damage assessment, as well as the polluter pays principle as to the financial support for the recovery of environmental degradations resulting from projects in the shore zone. A bibliographic review is presented on the legal protection guaranteed to the Brazilian coastal zone, pointing out the environmental impacts associated with the development of large offshore and nearshore projects, namely: wind energy generation, oil exploration and port and vessel activities.

Keywords: Shore Zone, Wind Energy, Oil Exploration, Port Activities, Environmental Law.

Dágola, P. H. C. B., Pinto, A. E. M., Moreira, M. A. C. (2022). Empreendimentos na zona costeira brasileira: proteção legal e impactos ambientais. Revista Brasileira de Meio Ambiente, Revista Brasileira de Meio Ambiente, v.10, n.2, p.78-94.



Direitos do Autor. A Revista Brasileira de Meio Ambiente utiliza a licença *Creative Commons* - CC Atribuição Não Comercial

1. Introdução

A Constituição de 1988, no artigo 225, garantiu o direito de todos ao meio ambiente equilibrado e atribuiu ao poder público e a todos os cidadãos, o dever de defendê-lo e preservá-lo. A Carta Magna determina que o poder público deve assegurar esse direito por meio de diversas ações, dentre elas: a preservação da diversidade; a definição no território nacional dos espaços a serem protegidos; a exigência dos estudos de impacto ambiental para atividades que degradem o meio ambiente; a promoção da educação ambiental. É igualmente importante ressaltar que a Constituição obriga os infratores, pessoas físicas ou jurídicas, que causarem danos ao meio ambiente, a repararem os danos causados, sujeitando-os às sanções penais e administrativas (Brasil, 1988).

Diante da importância atribuída ao meio ambiente pela Lei Maior e da diversidade biológica de nosso país, o Direito Ambiental assumiu particular importância no que tange a proteção e o gerenciamento ecológico no Brasil. Atualmente, sabe-se que a proteção natural garantirá a sobrevivência do homem e das demais espécies no futuro e, por isso, é cada vez mais premente a definição de marcos legais que regulem um desenvolvimento sustentável, combatendo o histórico *modus vivendi* humano, exploratório e depredatório.

O sociólogo Ulrich Beck expôs os problemas que acompanham esse modelo de sociedade que explora o meio ambiente em proporções imensamente superiores à sua capacidade de recuperação. A sociedade de risco, conforme apontado por Beck, justifica esse modelo diante das suas novas necessidades e consumo desenfreado, ignorando os riscos ambientais, que acabam voltando para seus produtores ou aqueles que lucraram com eles, pois os riscos e impactos são cíclicos e globais. Beck nomeia esse fenômeno de “[...] efeito bumerangue: nem os ricos e poderosos estão seguros diante deles (Beck, 2011, p. 44)”.

Um ambiente que carece do olhar atento do Direito Ambiental são as zonas costeiras, regiões que, historicamente, recebem pressões antrópicas significativas. Segunda Freitas (2004), a definição usual no Brasil de zona costeira é a região de interação dos meios terrestres, marinhos e atmosféricos. Uma definição menos simplista é a apresentada na Resolução n. 01, de 21/11/90, da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM), que define a zona costeira como a área que abrange os efeitos naturais produzidos pelas interações da terra, do mar e do ar, levando-se em consideração a paisagem físico-ambiental, e os acidentes topográficos do litoral, tais como ilhas, estuários e baías, tudo isto integrando os processos e interações existentes nesses ecossistemas. As zonas costeiras são regiões que abrigam uma extraordinária variedade de seres vivos, como os que vivem em recifes de corais, o mais diverso habitat marinho do mundo. Estima-se que 27% dos recifes de corais mundiais já foram degradados irreversivelmente (Ferreira e Maida, 2006).

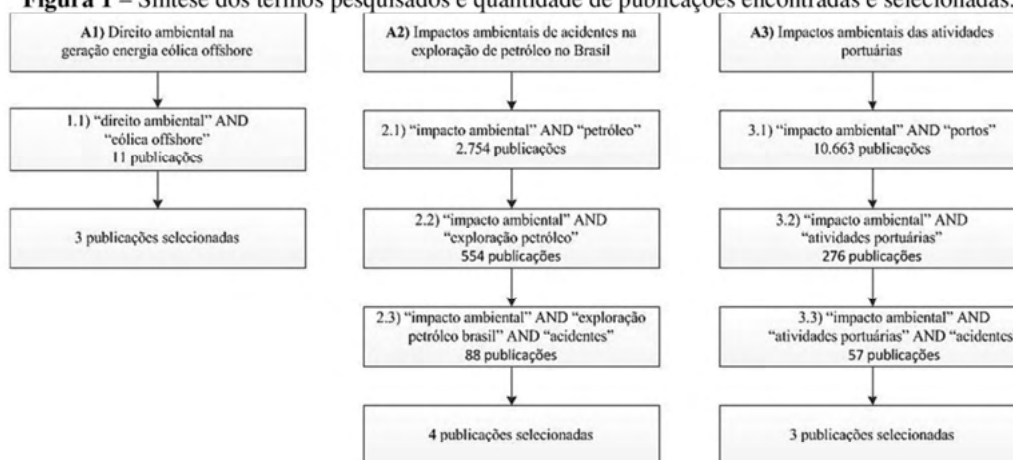
Por todo o exposto, entende-se que as zonas costeiras devem ser objeto de contínua atenção por parte do poder público, do Direito Ambiental e da coletividade. Este trabalho, portanto, se propõe a analisar, por meio de uma revisão bibliográfica exploratória, a proteção legal garantida à zona da costa brasileira, apontando os impactos ambientais associados ao desenvolvimento de grandes empreendimentos offshore e nearshore.

2. Desenvolvimento

A elaboração do presente artigo de revisão bibliográfica foi realizada através da consulta a base de dados Periódicos CAPES. As pesquisas foram separadas em três assuntos norteadores A1, A2 e A3 (ver Figura1). Os termos utilizados foram selecionados visando afunilar a cada busca a quantidade de artigos que mais se aproximava dos temas norteadores. Os termos de busca foram: 1.1) “direito ambiental” AND “eólica offshore”; 2.1) “impacto ambiental” AND “petróleo”; 2.2) “impacto ambiental” AND “exploração petróleo”; 2.3) “impacto ambiental” AND “exploração petróleo brasil” AND “acidentes”; 3.1) “impacto ambiental” AND “portos”; 3.2) “impacto ambiental” AND “atividades portuárias”; 3.3) “impacto ambiental” AND

“atividades portuárias” AND “acidentes”. As buscas foram realizadas considerando as publicações dos últimos 10 anos e os termos supracitados foram pesquisados nos títulos dos artigos, nos resumos e palavras-chave. Na Figura 1 é apresentada uma síntese da busca bibliográfica com o quantitativo de publicações encontradas e selecionadas de acordo com a relevância para a análise do presente trabalho.

Figura 1 – Síntese dos termos pesquisados e quantidade de publicações encontradas e selecionadas.



Fonte: Autoria própria.

2.1 A zona costeira brasileira: delimitações e proteção legal

Atualmente, a delimitação da zona costeira no Brasil é dada pelo Plano de Gerenciamento Costeiro II (PNGC II), aprovado pela Resolução n. 005/1997 da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM). Este plano se caracteriza por uma revisão do primeiro PNGC constituído pela Lei n. 7.661, de 16/05/88.

Segundo o PNGC II, a zona costeira brasileira abrange as faixas marítima e terrestre. A faixa marítima é aquela que se estende mar afora por 12 milhas marítimas das linhas de base convencionadas pela Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar, abrangendo o Mar Territorial. Já a faixa terrestre, é aquela formada por municípios que sofrem influência dos fenômenos que ocorrem na zona costeira. Vale citá-lo:

- [...] a) os municípios defrontantes com o mar, assim considerados em listagem desta classe, estabelecida pelo Instituto Brasileiro de Geografia Estatística (IBGE);
- b) os municípios não defrontantes com o mar que se localizem nas regiões metropolitanas litorâneas;
- c) os municípios contíguos às grandes cidades e às capitais estaduais litorâneas, que apresentem processo de conurbação;
- d) os municípios próximos ao litoral, até 50 km da linha de costa, que aloquem, em seu território, atividades ou infra-estruturas de grande impacto ambiental sobre a Zona Costeira, ou ecossistemas costeiros de alta relevância;
- e) os municípios estuarinos-lagunares, mesmo que não diretamente defrontantes com o mar, dada a relevância destes ambientes para a dinâmica marítimo-litorânea;
- f) os municípios que, mesmo não defrontantes com o mar, tenham todos seus limites estabelecidos com os municípios referidos nas alíneas anteriores (Brasil, 1997).

Dessa forma, pela análise da citação acima retirada do PNGC II em vigor, percebe-se que os municípios que pertencem à faixa terrestre da zona costeira são aqueles que, de algum modo, dependem do mar ou estabelecem relação com ele, e não só aqueles ligados diretamente ao mar.

No PNGC II, percebe-se o destaque para a importância ambiental da zona costeira, sua fragilidade e a necessidade de atenção especial por parte do poder público. Vale ressaltar um apontamento relevante presente no referido plano:

[...] A maior parte da população mundial vive em Zonas Costeiras, e há uma tendência permanente ao aumento da concentração demográfica nessas regiões. A saúde, o bem-estar e, em alguns casos, a própria sobrevivência das populações costeiras depende da saúde e das condições dos sistemas costeiros, incluídas as áreas úmidas e regiões estuarinas, assim como as correspondentes bacias de recepção e drenagem e as águas interiores próximas à costa, bem como o próprio sistema marinho. Em síntese, a sustentabilidade das atividades humanas nas Zonas Costeiras depende de um meio marinho saudável e vice-versa (Brasil, 1997).

Assim, é possível identificar a interdependência entre os seres humanos e o meio ambiente no que tange as zonas costeiras. Ao afirmar que a maior parte da população mundial vive em zonas costeiras e que esta propensão tende a aumentar permanentemente, o PNGC II suporta os estudos que tratam do desenvolvimento sustentável dessas regiões. O desenvolvimento sustentável foi definido pela Comissão de Brundtland, em 1987, como o desenvolvimento que atende às necessidades humanas atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem as suas próprias necessidades. Portanto, este é um conceito ambiental chave a ser considerado nas pesquisas e análises sobre os aspectos jurídicos, políticos e ecológicos que envolvem as zonas costeiras.

Mariana Freitas (2004), aponta que o Brasil conta com 7.367 km de litoral, extensão que chega a 8.500 km ao se considerar os recortes litorâneos, como reentrâncias, golfões e baías. A autora assinala que, nessa região, vive um quarto da população brasileira, sendo que as atividades econômicas costeiras respondem por cerca de 70% do produto interno bruto (PIB) do país. Isto ocorre, especialmente, devido à existência dos portos. Não é difícil evidenciar, portanto, a vulnerabilidade das zonas costeiras às expressivas atividades humanas. A mesma autora alerta para alguns fenômenos socioambientais que devem ser olhados com cautela nestes ambientes, dentre eles: as atividades portuárias, o turismo, o aumento populacional, o crescimento imobiliário e a qualidade visual das cidades litorâneas.

Freitas (2004) destaca ainda que parte da população das cidades litorâneas vive em situação precária, por isso é relevante estimular o crescimento econômico desses locais. No entanto, enfatiza que esse crescimento deve ser compatível com a preservação do meio ambiente e alinhado com o desenvolvimento sustentável. A autora compartilha, portanto, de uma tendência contemporânea de pensamento que propõe que o meio ambiente e o desenvolvimento econômico não podem ser entendidos como antagônicos, porém inseparáveis, complementares.

Neste ponto, devemos citar outro conceito importante para o estudo dos temas ambientais, o Princípio da Precaução, proposto durante a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), a Rio 92. O princípio da precaução é exposto na Declaração do Rio como:

PRINCÍPIO 15 – De modo a proteger o meio ambiente, o princípio da precaução deve ser amplamente observado pelos Estados, de acordo com suas capacidades. Quando houver ameaça de danos sérios ou irreversíveis, a ausência de absoluta certeza científica não deve ser utilizada com a razão para postergar medidas eficazes e economicamente viáveis para prevenir a degradação ambiental (CNUMAD, 1992).

Este princípio também está presente em duas convenções internacionais assinadas pelo Brasil, são elas: a Convenção da Diversidade Biológica (1992) e a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (1992) (Martins, 2014). Além destas, também está presente no PNGC II, como um de seus princípios:

[...] 2.11. A aplicação do Princípio de Precaução tal como definido na Agenda 21, adotando-se medidas eficazes para impedir ou minimizar a degradação do meio ambiente, sempre que houver perigo de dano grave ou irreversível, mesmo na falta de dados científicos completos e atualizados (Brasil, 1997).

O princípio da precaução, portanto, é entendido por alguns estudiosos como a garantia contra os riscos potenciais, pois sempre que não houver uma comprovação acerca dos danos ambientais das atividades humanas, estas devem ser interrompidas, até que novas pesquisas possam apresentar assertividade sobre as consequências e os riscos ambientais (Martins, 2014).

Além do princípio da precaução, a doutrina ambiental trata também do Princípio da Prevenção que busca compatibilizar a atividade com potencial impacto ambiental, com a proteção do meio ambiente. Isto se dá através da realização de estudo que explore todos os riscos envolvidos e, posteriormente, pela realização de licenciamento ambiental que obrigue o cumprimento de condicionantes, visando diminuir os riscos ao máximo (Machado, 2015).

Nesse sentido, percebe-se que, enquanto o princípio da precaução justifica a proibição de uma atividade diante da ausência de clareza científica sobre os danos potenciais envolvidos, o princípio da prevenção procura conciliar uma atividade com potencial risco com a proteção ambiental adequada (Machado, 2015; Machado e Denny, 2016).

Outro princípio existente no direito ambiental que visa promover a proteção ambiental é o Princípio do Poluidor Pagador (PPP). Segundo Antunes (2002), o PPP foi introduzido pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico – OCDE em 1972. A motivação para a criação desse princípio evidencia-se ao se constatar que os recursos ambientais, em geral, são limitados. A utilização desses recursos na produção de bens gera a redução de oferta e a conseqüente degradação do meio ambiente. A ampla utilização de subsídios ambientais na produção deve ser considerada na formação do preço de um produto, de forma a apresentar ao mercado a escassez desse recurso. Dessa forma, é possível assegurar que os preços dos produtos reflitam os custos ambientais, impedindo que empresas reduzam artificialmente os preços de seus produtos às custas dos recursos ambientais.

Paulo de Bessa Antunes afirma que o elemento diferencial do PPP quando comparado à responsabilidade tradicional (princípio da responsabilidade) é que aquele busca afastar o custo econômico da degradação ambiental da coletividade e direcioná-lo diretamente ao utilizador do recurso ambiental. A carga dos custos ambientais é depositada nos produtores e consumidores (Antunes, 2002).

Segundo a Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), o poluidor pagador:

[...] deve arcar com os custos das medidas adotadas para manter a qualidade ambiental, sem se afastar da prevenção. Esse princípio indica, desde logo, que o poluidor é obrigado a corrigir ou recuperar o ambiente degradado, suportando os encargos daí resultantes, não lhe sendo permitido continuar a ação poluente. Além disso, aponta para a responsabilização dos agentes perante terceiros em relação aos danos a eles causados, direta ou indiretamente, devido à degradação dos recursos naturais (ANTAQ, 2021).

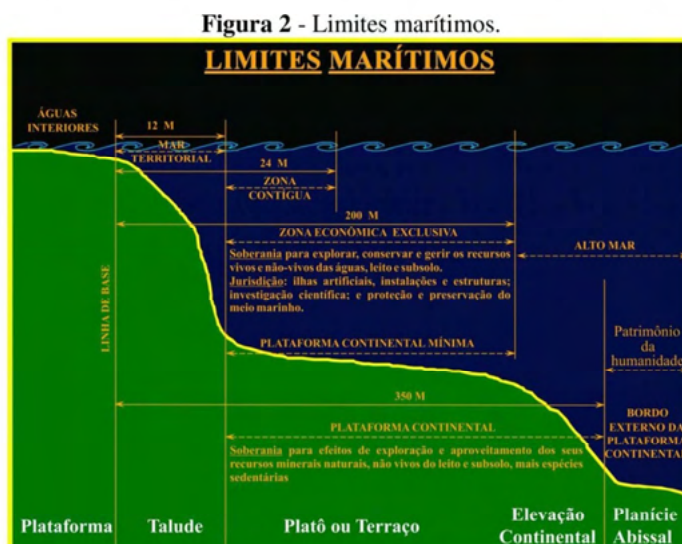
Analisando as definições do princípio do poluidor pagador fica evidente que esse princípio normativo de caráter econômico não foi idealizado com a motivação de monetizar ou atribuir uma valoração aos danos ambientais causados nas diversas atividades econômicas. O PPP é um princípio que promove a equiparação nas atividades comerciais entre as empresas, ou seja, evita que os produtos de uma empresa tenham preços reduzidos (artificiais) às custas do meio ambiente. Mauricio Mota (2006) corrobora esse entendimento ao dissertar sobre as externalidades. Segundo o autor, as externalidades podem ser positivas ou negativas e referem-se à ação de um processo produtivo em outros sistemas externos. A valoração das consequências das atividades econômicas na geração de externalidades, positivas ou negativas, não é possível. Dessa forma, não

é viável adicionar o custo das externalidades para compor o preço final de uma mercadoria que atenda à reparação das externalidades materiais e sociais.

Segundo Barbério (2007), o PPP não pode ser entendido como um princípio permissivo em prol da poluição ambiental. Há uma aparente falácia que os grandes empreendimentos podem degradar o meio ambiente desde que, posteriormente, compensem os danos gerados. Essa ideia é oposta ao princípio. No entanto, mesmo após a integração do PPP ao ordenamento jurídico brasileiro através do Decreto nº 5.472, de 20 de junho de 2005, não ocorreram mudanças relevantes na redução da poluição marítima e acidentes marítimos (Barbério, 2007).

2.2 Grandes empreendimentos na zona costeira brasileira

Além da zona costeira que engloba a faixa marítima (abrangendo o mar territorial) e a faixa terrestre, muitos empreendimentos de grande porte são instalados na Zona Econômica Exclusiva (ZEE) e em Alto Mar, região que tem parte dentro e parte fora da plataforma continental (offshore), conforme Figura 2.



Fonte: Adaptada do site da marinha. Disponível em:

<https://www.marinha.mil.br/secirm/sites/www.marinha.mil.br/secirm/files/pictures/limitesmar.jpg>. Acesso em: 23/08/2021

A faixa da zona costeira que engloba o mar territorial (ver Figura 1) é considerada um bem da União, conforme disposto no inciso VI, do art. 20 da Constituição Nacional. Além disso, a região offshore dentro da plataforma continental, juntamente com a ZEE, pertencem ao estado brasileiro. Já a região offshore que se encontra fora da plataforma continental é considerada um patrimônio da humanidade.

Na plataforma continental e na ZEE, o estado brasileiro detém a jurisdição e direitos de soberania para fins de produção de energia, conforme art. 56 da Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CNUDM):

ARTIGO 56 - Direitos, jurisdição e deveres do Estado costeiro na zona econômica exclusiva: 1. Na zona econômica exclusiva, o Estado costeiro tem: a) direitos de soberania para fins de exploração e aproveitamento, conservação e gestão dos recursos naturais, vivos ou não vivos das águas sobrejacentes ao leito do mar, do leito do mar e seu subsolo, e no que se refere a outras atividades com vista à exploração e aproveitamento da zona para fins econômicos, como a produção de energia a partir da água, das correntes e dos ventos (CNUDM, 1990).

A seguir, analisaremos os complexos eólicos na ZEE, apontando seus marcos legais regulatórios e os impactos ambientais associados a estes empreendimentos.

2.3 Legislação e impactos ambientais da geração de energia eólica no Brasil

A Constituição da República Federativa do Brasil, em seu art. 21, inciso XII, letra b, determina que compete à União fazer diretamente ou indiretamente a autorização, concessão ou permissão da exploração de serviços e instalação de energia elétrica no país. Nas últimas décadas, observou-se uma crescente preocupação com a diversificação da matriz energética brasileira, incluindo as fontes renováveis. Isto se deu devido à necessidade de observância, por parte da União, de compromissos internacionais de desenvolvimento sustentável que se preocupam com o aquecimento global e a redução da emissão de dióxido de carbono e outros gases de efeito estufa.

A introdução de fontes renováveis na matriz energética brasileira foi marcada com a idealização do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA, instituído em 2002 pela Lei nº 10.438/2002 (Brasil, 2002). Outro marco legal relevante nesse aspecto foi a Política Nacional sobre Mudança do Clima, instituída pela Lei nº 12.187/2009 (Brasil, 2009), pela qual o Brasil adotou o compromisso voluntário de reduzir as emissões dos gases de efeito estufa, visando à geração de energia elétrica com baixa emissão de carbono.

A energia eólica onshore e offshore tem como característica marcante o fator limpo e renovável, porém, como toda forma de geração de energia, gera impactos ambientais que têm sido observados ao redor do mundo. Os riscos devem ser mapeados e identificados desde a fase de planejamento, operação e descomissionamento, para se tornarem evitáveis e mitigáveis.

Algumas das normativas que estimulam a implantação da energia eólica no Brasil são: o Plano Nacional de Energia – PNE 2050 (Brasil, 2020) que reúne de forma inédita, o mapeamento dos recursos eólicos offshore na costa brasileira, e o Plano Decenal de Expansão - PDE 2029 que apontou, pela primeira vez, que a geração eólica offshore é passível de expansão na matriz brasileira (Brasil, 2020).

Os grandes empreendimentos eólicos no Brasil com geração de energia comercial foram instalados na faixa terrestre da zona costeira e são, predominantemente, áreas de propriedades privadas. O país não possui ainda nenhum parque eólico offshore instalado, conforme consta no site oficial do IBAMA. Porém, alguns projetos com essa característica estão em fase inicial de licenciamento ambiental. Esses empreendimentos serão instalados em áreas públicas, nas regiões do mar continental, na ZEE e em alto mar, dentro da plataforma continental (offshore). A seguir listamos estes projetos (Ibama, 2021):

1. Parque Eólico Offshore Caucaia Parazinho;
2. Complexo Eólico Marítimo Asa Branca I;
3. Complexo Eólico Maravilha;
4. Complexo Eólico Marinho Ventos do Açú;
5. Complexo Eólico Marítimo Águas Claras;
6. Complexo Eólico Marítimo Jangada;
7. Complexo Eólico Offshore Ventos Potiguar;
8. Energia Camocim Offshore;
9. Planta Piloto de Geração Eólica Offshore;
10. Parque Eólico Offshore Aracatu.

Segundo o Roadmap Eólica offshore Brasil, da Empresa de Pesquisa Energética, as legislações aplicáveis à geração de energia eólica onshore também podem ser aplicadas no desenvolvimento de parques

eólicos offshore, principalmente, no que tange à concessão e autorização (Brasil, 2020). A competência para outorgar a autorização dos complexos eólicos, tanto onshore quanto offshore é delegada à ANEEL (Decreto nº 5.163/2004). Nenhuma das resoluções da ANEEL faz observância especificamente à atividade de geração eólica marítima (Brasil, 2020).

Os parques de geração eólica offshore farão uso privativo das áreas públicas para desempenharem a atividade de geração de energia. Os bens públicos podem ser utilizados por empresas com o uso privativo, caso o Poder Público concorde com a utilização para determinado empreendedor, em detrimento a qualquer outro. Este processo se dá através da celebração de contratos com a iniciativa privada mediante processos de licitações públicas (Lei nº 9.636/98).

Acerca das áreas marítimas pertencentes ao mar territorial, a Secretaria do Patrimônio da União – SPU tem a competência de gestão e cessão de utilização (Portaria SPU nº 404/2012). O § 2º desta Portaria aponta que os empreendimentos náuticos com atividades comerciais serão concedidas observando-se os procedimentos licitatórios da Lei nº 8.666/93. Segundo o Roadmap Eólica offshore Brasil, os empreendimentos náuticos, podem abranger os empreendimentos eólicos marítimos:

[...] empreendimento náutico: edificação ou conjunto de edificações utilizadas como apoio à atracação, embarque, desembarque e trânsito de pessoas, cargas ou produtos e embarcações, com instalações de apoio ou facilidades vinculadas, inclusive em terra, tais como marina, garagem náutica, clube náutico, base de charter, entreposto, empreendimento aquícola e terminal pesqueiro (Brasil, 2020).

Os empreendimentos de geração eólica na Zona Costeira devem realizar o licenciamento ambiental orientado pelo IBAMA, segundo o Decreto nº 8.437/2015. O instrumento para a avaliação do impacto ambiental é realizado através do Estudo de Impacto Ambiental – EIA, juntamente com o Relatório de Impacto Ambiental – RIMA que devem ser conduzidos por empresas de consultoria ambiental especializadas conforme a resolução Conama nº 237/1997. O EIA/RIMA analisa a viabilidade ambiental e estabelece medidas mitigatórias causadas por eventuais adversidades provocadas pelo empreendimento. Segundo Antunes, Siqueira e Garbaccio (2018), esses instrumentos promovem o conhecimento das externalidades socioambientais e permitem que a população atingida direta ou indiretamente participe na discussão das externalidades ambientais negativas dos novos empreendimentos de forma segura e eficiente.

Os empreendimentos de geração de energia eólica marinha podem ocasionar danos no meio biótico e no meio abiótico (físico). Esses danos podem estar presentes nas diferentes etapas do ciclo de vida do empreendimento (instalação, operação, descomissionamento). Segundo Copping et. al (2020), os impactos nos animais marinhos são evidenciados com a alteração nos habitats; com a colisão dos animais nos dispositivos móveis/estacionários dos equipamentos de geração de energia; nos ruídos subaquáticos e na geração de campo eletromagnético dos cabos elétricos.

Conforme os estudos publicados pelo Serviço de Administração dos Minerais Norte Americano (MMS, 2007) e pelo Departamento de Energia e Mudança Climática Britânico (DECC, 2016), alguns impactos já são evidenciados por outros países que possuem empreendimentos de geração de energia eólica na zona costeira ou offshore. No meio abiótico, a incidência de processos erosivos no entorno das fundações, impactam a superfície do mar com sedimentos durante as fases de instalação e operação. O aumento na circulação de embarcações em torno do empreendimento altera a paisagem local e também ocasiona a piora nos indicativos da qualidade do ar e da água. Devido à instalação da estrutura dos geradores ocorre a alteração nas correntes oceânicas que pode iniciar o processo de readaptação geomorfológica costeira. Também é rapidamente verificada no meio físico, a alteração da qualidade da água, provocada por eventuais derramamentos de óleos, lubrificantes, tintas tóxicas com componentes químicos anti-incrustantes.

Já para o meio biótico, os estudos relataram impactos provenientes da geração de ruídos intensos devido à utilização de bate-estacas durante a instalação e de explosivos na fase de descomissionamento. A

alteração do campo eletromagnético no local do empreendimento pela operação dos aerogeradores é potencializada pelos cabos submarinos que proporcionam mudanças tanto no meio físico quanto no meio biótico. Essa alteração do campo eletromagnético tem forte interferência na orientação dos quelônios (tartarugas). Os animais marinhos e as aves costeiras sofrem interferência em suas atividades de comunicação, navegação, socialização, busca por alimentos e livramento de predadores. As comunidades bentônicas que vivem no habitat do fundo do mar são sensíveis e vulneráveis aos ruídos das turbinas e do campo eletromagnético dos cabos submarinos. Os quelônios marinhos sofrem desorientação dos filhotes causada pela iluminação das estruturas dos geradores e também pela alteração do campo eletromagnético local. A biota terrestre também pode perceber os efeitos negativos com a colisão de morcegos nas pás de turbinas devido à desorientação ocasionada pelos ruídos de operação, dependendo da distância das turbinas com relação à costa (MMS, 2007; DECC, 2016).

Os instrumentos de avaliação de impacto ambiental foram construídos a partir da Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) que é considerada o marco inicial das normativas para o Direito Ambiental. Ao longo dos anos foi criado um arcabouço legal de grande complexidade, tendo os princípios da precaução e prevenção como parâmetro basilar para regular as externalidades ambientais negativas. Entretanto, a complexidade das normativas estabeleceu um cenário de insegurança jurídica que pode até mesmo comprometer o cerne das normas que buscam a proteção ambiental em última análise (Antunes, Siqueira e Garbaccio, 2018).

O mesmo autor afirma que a Resolução Conama nº 01/86 é uma boa ferramenta para identificar quais atividades econômicas têm grande potencial degradador, mas que não deve ser utilizada como uma doutrina. Algumas das atividades exemplificadas em 1986 nesta resolução já completaram 35 anos e tem descrições genéricas quanto ao porte e o potencial degradador dos empreendimentos. Desta forma, o autor sugere ser fundamental a revisão da amplitude da aplicação desta resolução para todos os novos empreendimentos de forma a simplificar o licenciamento ambiental, para não afetar a segurança jurídica quanto à proteção do meio ambiente (Antunes, Siqueira e Garbaccio, 2018).

As questões levantadas por Paulo Bessa Antunes acerca da complexidade das normativas e da desatualização da identificação dos impactos ambientais (Antunes, Siqueira e Garbaccio, 2018), apontam para a necessidade de novas legislações que atendam às especificidades das diferentes tecnologias dos empreendimentos, principalmente no que tange à geração de energia eólica offshore, ainda inédita no Brasil.

2.4 Acidentes envolvendo a exploração de petróleo no Brasil

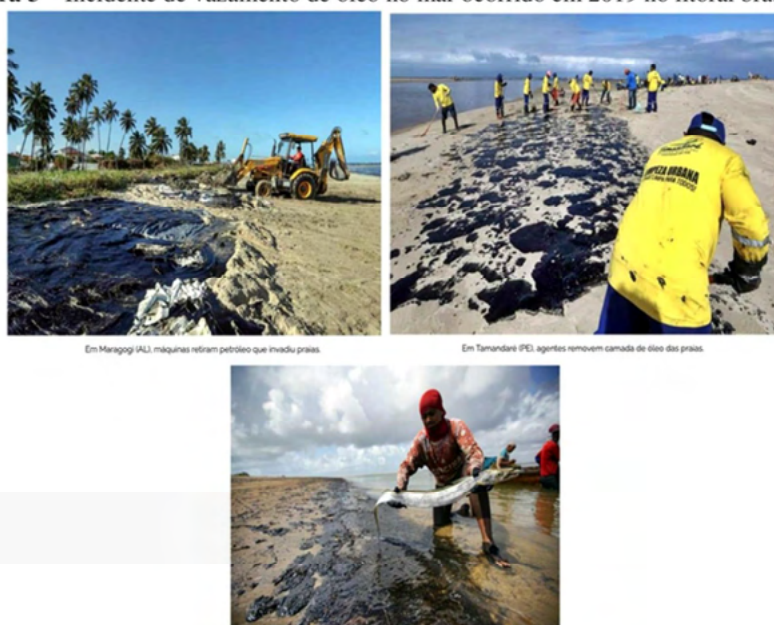
A história da exploração de petróleo no Brasil é marcada por desastres ambientais. Segundo (Sluijs, 2006), os desastres nos ciclos de geração de energia a partir de fontes não renováveis, são frequentes, de alta complexidade e difícil previsibilidade. Carvalho e Damacena (2013) definem o desastre ambiental como um evento sistêmico que afeta o meio ambiente e seus subsistemas, com a necessidade de intervenção buscando a minimização dos efeitos. Sugarman (2006) define que os eventos classificados como desastres têm efeitos transtemporais, transterritoriais e de grande complexidade. Além disso, as autoridades estaduais e federais têm baixa capacidade de ação para mitigar as consequências.

O método de perfuração de poços de petróleo offshore no setor petrolífero brasileiro permitiu o acesso aos depósitos localizados no fundo do mar, abaixo da plataforma continental. As novas tecnologias desenvolvidas para a exploração permitiram a prospecção do pré-sal brasileiro que tornou a exploração offshore um negócio economicamente viável. A prospecção de petróleo em alto mar estimulou a construção de diversas plataformas na zona costeira e ocasionou o aumento do tráfego de navios marítimos que prestam apoio às atividades. Juntamente com a estrutura e operação desses grandes empreendimentos, surgem os riscos da ocorrência de acidente ou de desastre ambiental, em algumas das várias etapas que vão desde a perfuração até o refino do petróleo (Santos, 2012).

A atividade de exploração de petróleo em um regime de operação padrão também ocasiona impactos ambientais, tanto no meio físico quanto no meio biótico. Esses efeitos são intensificados em meio à ocorrência de acidentes ou falha na operação dos equipamentos.

Segundo Santos (2012), a exploração de petróleo realizada onshore ou offshore, pode gerar acidentes por derramamentos de óleo devido às tubulações pressurizadas com petróleo *in natura*. Os derramamentos podem ocorrer também através de vazamentos nas válvulas, nos dutos, nos tanques ou com o rompimento do casco oriundo do abaloamento de embarcações petroleiras. Na Figura 3, as consequências do derramamento de óleo *in natura* podem ser observadas nas praias do litoral brasileiro. O desastre ambiental ocorreu em 2019 e foi considerado um dos piores da história do Brasil.

Figura 3 – Incidente de vazamento de óleo no mar ocorrido em 2019 no litoral brasileiro.



Fonte: <https://www.letrasambientais.org.br/posts/um-ano-depois,-brasil-nao-esclareceu-vazamento-de-oleo-no-nordeste>
Acesso em: 15/09/2021

O lançamento de resíduos das plataformas no corpo d'água e o elevado consumo de água em todas as etapas de produção geram efeitos negativos na zona costeira, abrangendo praias, rios, costões rochosos e águas oceânicas. No meio biótico, a água de lastro dos navios pode carregar espécies de animais e vegetais endêmicos para novos locais, estimulando a extinção ou a introdução de espécies. Além disso, a geração de ruídos durante a instalação de dutos e na realização de pesquisas sísmicas provoca estresse ambiental com alteração dos ecossistemas costeiro e marinho (Santos, 2012).

Os impactos e efeitos negativos enumerados por Santos (2012) são intrínsecos à operação dos vários empreendimentos de geração de energia distribuídos pelo país à partir de fontes não renováveis, como a extração de petróleo. Como em todo empreendimento, algumas falhas de operação ocorrem ao longo do tempo como listado na Figura 4. A ocorrência das falhas/acidentes pode ter espaço no ambiente continental (onshore), tal como o exemplo do vazamento de petróleo no oleoduto de São Sebastião em Cubatão/SP que abastece quatro refinarias no estado de São Paulo. Outro caso ocorreu na zona costeira com a explosão do navio Chileno Vicuña na Baía de Paranaguá/PR em 2004 que atingiu 4 unidades de conservação ambiental da região brasileira.

Figura 4 - Lista de derramamentos de Petróleo no Brasil.

Data	Fonte	Local	Quantidade Derramada (m³)	Produto
06/12/1960	Sinclair Petrolere	Costa brasileira	66.600	Petróleo
8/1974	Takimya Maru	Canal de São Sebastião, SP	7.000	Petróleo
29/08/1974	Esso Garden State	Porto ou terminal indefinido	5.882	Petróleo
26/03/1975	Tarik Ibn Ziyad	Baía de Guanabara, RJ	7.000 – 18.000	Petróleo
09/01/1978	Brazilian Marina	Canal de São Sebastião/ SP	6.000 – 41.525	Petróleo
26/05/1978	Aminona	Banco do Meio, ZEE	23.305	Óleo combustível 2
27/10/1979	Gunvor MAERSK	Rio Amazonas	12.780 – 17.479	Óleo combustível ou derivado claro.
14/10/1983	Oleoduto	São Sebastião – Cubatão (SP)	2.500	Petróleo
17/03/1985	Marina	São Sebastião/ SP	2.000 – 2.782	Petróleo
12/1986	Brotas	Litoral RJ	1.600	Petróleo
15/05/1994	Oleoduto	São Sebastião – Cubatão (SP)	2.700	Petróleo
10/02/1997	Oleoduto	Baía de Guanabara, RJ	900 – 3.000	Óleo combustível marítimo
18/01/2000	Oleoduto	Baía de Guanabara, RJ	1.292	Óleo combustível marítimo
16/07/2000	Oleoduto	Rio Barigüi, PR	4.000	Petróleo
18/02/2004	Oleoduto	São Sebastião – Cubatão (SP)	?	Petróleo
15/11/2004	Vicuña	Paranaguá, PR	6.555	Óleo combustível marítimo, óleo diesel, óleo hidráulico e metanol.

Fonte: Souza Filho, 2006, p. 137.

Apesar dos diversos esforços empenhados pelas empresas nos empreendimentos de exploração de petróleo para prevenir qualquer tipo de falha de operação que culmine em um acidente, esses eventos estão presentes mundialmente. Segundo Machado e Denny (2016), pelo princípio da prevenção, os riscos e vulnerabilidades na produção de energia necessitam ser previamente mapeados. Os estudos prévios possibilitam a identificação, avaliação e proporcionam o amortecimento dos danos através da implantação de métodos eficazes de recuperação de rápida resposta que reduzem ao máximo os riscos de impacto ambiental.

2.5 Impactos ambientais das atividades portuárias e embarcações

A Organização Internacional Marítima (International Maritime Organization - IMO), afirma que o transporte marítimo suporta cerca de 90% de todo o comércio mundial. Afirma também que o modal marítimo, estatisticamente, é o que causa menor dano ambiental. A IMO preocupa-se, principalmente, com a segurança marítima e, após a “Convenção internacional para a prevenção da poluição do mar por petróleo” (Convenção OILPOL) de 1954, adotou diversas medidas para prevenir a poluição marinha. As normas elaboradas pela organização visam reduzir a poluição causada por navios e mitigar os danos decorrentes das operações e acidentes marítimos.

Segundo Calixto (2006), a legislação brasileira sofre grande influência do Direito Internacional Marítimo que tem a IMO como grande agente de normas. As discussões e decisões da organização refletem nas atividades portuárias, no transporte marítimo e na indústria petrolífera brasileira.

Segundo Martins (2014), o direito marítimo que rege a navegação em todas as suas peculiaridades, tem alto grau de compatibilidade com a questão de preservação do meio ambiente marítimo. O autor afirma que esse ramo do Direito tem o maior arcabouço de normas da matéria jurídica. O mesmo relata também que é possível notar o avanço da preocupação ambiental com a responsabilização ambiental das empresas no tratamento de grandes acidentes, na poluição ocasionada por água de lastro, alijamentos e derramamento de óleos das embarcações.

De acordo com o anuário publicado pela ANTAQ (2020) foram transportadas cerca de 117 milhões de toneladas em 6.298.896 contêineres representando um crescimento de 4% no peso transportado com relação ao ano anterior de 2019. Devido ao contínuo crescimento do modal marítimo, os acidentes e os efeitos

negativos oriundos passaram a ocorrer com maior frequência.

Dessa forma, segundo Martins (2014), historicamente, a IMO promoveu a elevação dos padrões de segurança das normas após a ocorrência de grandes acidentes como o derramamento de petróleo no mar ocorrido com o encalhe do navio “Torrey Canyon” no Canal da Mancha, em 1967. Esse acidente derramou 123 mil toneladas de óleo no mar. A partir dessa tragédia ambiental, a IMO passou a adotar, através de suas convenções, os princípios do poluidor pagador e da precaução como os princípios norteadores mais adequados para a promoção da prevenção da poluição marinha.

As instalações portuárias que estimulam o desenvolvimento de diversas atividades na zona costeira proporcionam intensa movimentação terrestre e de navios. O livro publicado pelas nações unidas, “Assessment of the Environmental Impact of Port Development (UNITED NATIONS, 1992)”, divide as externalidades oriundas dos empreendimentos portuários em categorias. Adiante são apresentadas as externalidades negativas das categorias ‘Construção da infraestrutura’, ‘Instalação portuária quanto à localização, posicionamento e porte’ e ‘Aumento de tráfego na região do empreendimento’.

O livro “Portos e Meio Ambiente” de autoria de Marcos Maia Porto e Sérgio Grein Teixeira (Porto e Teixeira, 2002) apresenta as principais causas, impactos e ações mitigadoras para as categorias destacadas. Para a categoria, ‘Construção da infraestrutura’ o impacto é proveniente da suspensão de lama/material terroso do fundo do rio ou mar gerando alteração na coluna de água e no fundo, provocando a destruição de recifes e corais. A turbidez imposta pela lama altera a taxa de fotossíntese da vegetação marinha reduzindo a taxa de germinação e escasseando as áreas de ninhos para os ovos de peixes. A qualidade do ar é deteriorada com o lançamento de gases da família do SO_x e NO_x e poeira provenientes das embarcações e dos equipamentos de construção e dragagem. Os ruídos e vibrações emitidos pelo funcionamento desses equipamentos geram efeitos na vida marinha e também para os moradores e animais da região da zona costeira.

Na categoria ‘Instalação portuária quanto à localização, posicionamento e porte’, destacamos a estagnação da água decorrente da construção dos quebra-mares que proporciona o aumento do material orgânico dissolvido na água. Água rica em matéria orgânica propicia a geração de água não oxigenada na camada do fundo (eutrofização) e odor desagradável. A fauna e a flora aquáticas têm a redução de habitats de organismos bênticos, plânctons, macroalgas, peixes proporcionando a alteração na composição das espécies. Na fauna e flora terrestre há impactos nos habitats de aves devido à alteração das marés e supressão de manguezais e outros ecossistemas costeiros.

Na categoria ‘Aumento de tráfego na região do empreendimento’, o lançamento de água de lastro, dos resíduos das embarcações e o lançamento de gases dos motores/geradores de energia promovem: a introdução de espécies exóticas, a película de óleo na superfície, prejudicando a fauna marinha e a geração de chuva ácida. A descrição dos impactos ambientais e efeitos negativos se assemelham nas outras categorias.

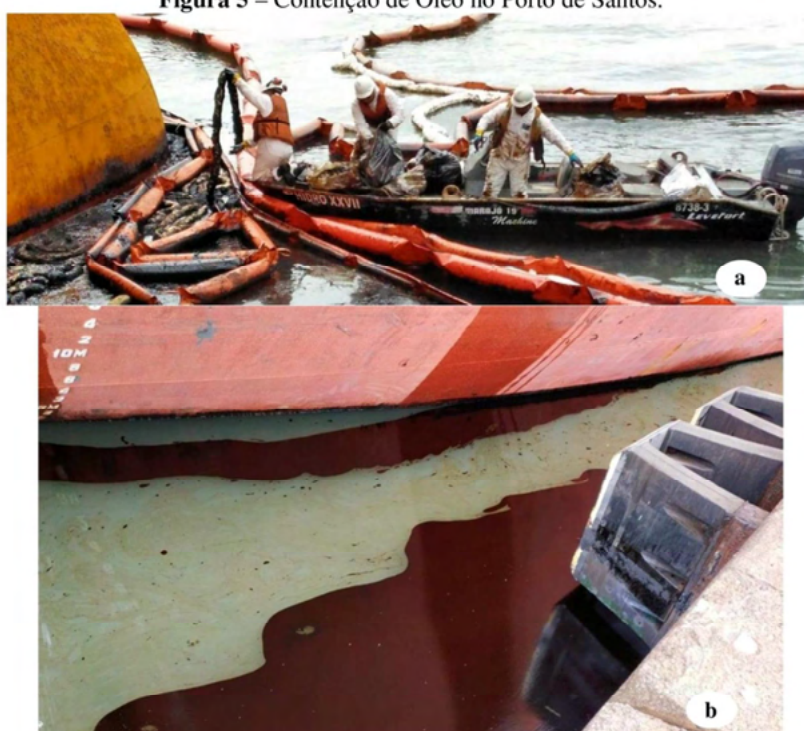
Carvalho (2008) relata diversos impactos ambientais associados às atividades operacionais em terminais marítimos. O autor afirma que os impactos ambientais são oriundos da interação entre os fatores e os componentes ambientais. Em seu trabalho são listados os principais fatores que têm início na fase de implantação da infraestrutura requerida para a operação desses grandes empreendimentos. A localização das instalações portuárias também tem forte influência no impacto causado no meio ambiente. A operação de cargas, o uso de equipamentos móveis e o armazenamento de mercadorias também são fatores geradores de externalidades negativas. Além desses destaques, há o aumento de tráfego de caminhões que suportam a recepção e despacho de mercadorias na região portuária.

Os principais recursos e componentes ambientais atingidos pelas atividades elencadas acima são: o ar, a água, a fauna terrestre e marinha, a topografia e hidrologia da região do entorno, a flora aquática e terrestre, o nível de vibração e acústica, além de aspectos socioculturais e socioeconômicos (Carvalho, 2008).

A Figura 5 apresenta um exemplo de tentativa de mitigação dos impactos ambientais das atividades

portuárias. O acidente ocorreu em 2017, com um navio atracado no Porto de Santos, com a estimativa de lançamento de 3000 litros de óleo na água. Segundo Martins (2014), estamos diante do seguinte cenário: quanto mais acidentes, mais externalidades negativas e mais normas são criadas. Apesar da incorporação do princípio do poluidor pagador nas normas jurídicas, não foi possível observar redução nos acidentes marítimos ou mesmo da poluição marítima.

Figura 5 – Contenção de Óleo no Porto de Santos.



Fonte: Observatório de Justiça e Conservação. Disponível em: <https://www.justicaeco.com.br/o-impacto-de-um-porto-2/>. Acesso em: 10/10/2021

A criação de novas normas indica que o contexto jurídico não é eficaz para assegurar o combate da poluição marinha provocada pelas atividades portuárias. Desta forma, Martins (2014) sugere que seja realizada uma revisão na matéria jurídica acerca do Direito Marítimo para a elaboração de regras que atendam os princípios da prevenção e do poluidor pagador.

3. Conclusão

A população moderna demanda cada vez mais energia elétrica para a realização de suas atividades. A geração de energia pode ser realizada de forma direta, como a eólica, ou indireta, através de fontes não renováveis, como os derivados do petróleo. Ambos os métodos de produção de energia necessitam de grandes empreendimentos que causam impactos ambientais. Os impactos do setor petrolífero são facilmente percebidos na operação padrão e intensificados nas ocorrências de falhas humanas e de equipamentos. Essas falhas ocasionam grandes acidentes e desastres, mesmo tratando-se de uma atividade mundialmente difundida e madura tecnologicamente.

A legislação brasileira atua no sentido de promover a proteção ambiental terrestre e também da zona costeira offshore. No entanto, atualmente, devido ao avanço e ao desenvolvimento de novas modalidades de geração de energia elétrica, evidencia-se a carência de leis mais específicas que regulamentem a atividade de produção de energia eólica offshore, conforme explicitado ao longo deste trabalho. Neste tipo de geração de energia, alguns impactos ambientais são de difícil identificação e podem demorar a serem evidenciados. Portanto, estudos científicos sistemáticos auxiliam no diagnóstico dos riscos, principalmente, em relação à fauna da zona costeira. Esses estudos são fundamentais para o Princípio da Prevenção e Precaução tratado pelo Direito Ambiental que procura compatibilizar atividades potencialmente impactantes com a proteção do meio ambiente.

A mesma carência de proteção legal específica evidenciada para a geração eólica offshore poderá ocorrer nos empreendimentos de geração de energia de ondas, marés e correntes, quando forem implantados no Brasil. Essas tecnologias, ainda em fase de amadurecimento global farão uso da mesma região costeira e apresentarão a mesma aparência de baixo impacto ambiental, em primeira análise.

Por outro lado, os empreendimentos portuários e o modal marítimo dispõem, por meio do Direito Ambiental, do maior conjunto de normas jurídicas. O princípio do poluidor pagador representou mais uma norma que integrou a promoção da prevenção da poluição marinha. Porém, mesmo com atividades ambientalmente regulamentadas, os impactos e acidentes continuam a ocorrer. O resultado dessa análise aponta que as normas específicas para os empreendimentos são essenciais e devem ser avaliadas para que o imbrólio jurídico não retire o foco principal da preservação ambiental em paralelo ao desenvolvimento econômico.

4. Referências

ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários. **Princípios Ambientais Portuários**. Disponível em: <https://www.gov.br/antag/pt-br/assuntos/meio-ambiente/principios-ambientais-portuarios>. Acesso em: 10/10/2021.

ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários. **Estatístico Aquaviário 2.1.4, Anuário 2020**. Disponível em: <http://anuario.antag.gov.br/QvAJAXZfc/opendoc.htm?document=painel%5Cantag%20-%20anu%C3%A1rio%202014%20-%20v0.9.3.qvw&lang=pt-BR&host=QVS%40graneleiro&anonymous=true>. Acesso em: 10/10/2021.

Antunes, P. (2002). **Dano ambiental: uma abordagem conceitual**. (1ª ed.). Rio de Janeiro: Editora Lumen Juris.

Antunes, P., Siqueira, L., Garbaccio, G. (2018). Licenciamento ambiental: necessidade de simplificação. **Justiça do Direito**, 32(3), 562-582.

Barbério, A. (2007). A proteção da água de lastro no direito brasileiro. In: Castro J., Osvaldo A. (org.). **Direito marítimo made in Brasil**. São Paulo: Lex Editora.

Beck, U. (2011). **Sociedade de risco: rumo a uma outra modernidade**. (2ª ed.). São Paulo: Editora 34.

BRASIL. Resolução nº. 005/1997, **Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM) que aprova o Plano de Gerenciamento Costeiro II (PNGC II)**. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/secirm/sites/www.marinha.mil.br/secirm/files/resolucao-5-1997.pdf>. Acessado em agosto/2021. 1997.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil, artigo 225, garantiu o direito de todos ao meio ambiente equilibrado e atribuiu ao poder público e a todos os cidadãos o dever de defendê-lo e preservá-lo.** Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm>. Acessado em: agosto/2021. 1988.

BRASIL. **Lei nº 10.438/2002, que institui o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA.** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/l10438.htm>. Acesso em: agosto/2021. 2002.

BRASIL. **Lei nº 12.187/2009, que institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima.** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm>. Acessado em: agosto/2021. 2009.

BRASIL. **Portaria MME nº 38. Plano Decenal de Expansão de Energia 2029, que apontou, pela primeira vez, que a geração eólica offshore é passível de expansão na matriz energética brasileira.** Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decena-de-expansao-de-energia-2029>>. Acessado em: agosto/2021. 2020.

BRASIL. **Portaria MME nº 451. Plano Nacional de Energia – 2050, que o mapeamento dos recursos eólicos offshore na costa brasileira.** Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>>. Acessado em: agosto/2021. 2020.

BRASIL. **Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Roadmap Eólica Offshore Brasil: perspectivas e caminhos para a energia eólica marítima.** Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-456/Roadmap_Eolica_Offshore_EPE_versao_R2.pdf>. Acessado em: agosto/2021. 2020.

Calixto, R. J. (2006). **Incidentes marítimos: história, direito marítimo e perspectivas num mundo em reforma da ordem internacional.** (2ª. ed). São Paulo: Lex Editora.

Carvalho, S. D. (2008). **Processos de Licenciamento Ambiental de Pólos Geradores de Viagens: O Caso Portuário.** Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Carvalho, D., Damascena, F. (2013). **Direito dos Desastres.** (1ª ed.). Porto Alegre: Livraria do Advogado.

CNUDM – **Decreto Nº 99.165 de 12 de março de 1990, que promulga a Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar.** Diário Oficial da União, 14 de mar. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1990/decreto-99165-12-marco-1990-328535-publicacaooriginal-1-pe.html>>. Acessado em: agosto/2021.

CNUMAD – Conferência das Nações Unidas sobre meio ambiente e desenvolvimento (1992). **Declaração do Rio de Janeiro sobre meio ambiente e o desenvolvimento.**

Copping, A., Hemery, L., editors, (2020). OES-Environmental 2020 State of the Science Report: Environmental Effects of Marine Renewable Energy Development Around the World. **Ocean Energy**

Systems.

DECC – Department of Energy & Climate Change (2016). UK Offshore Energy Strategic Environmental Assessment - **OESEA3 Post Consultation Report**.

Ferreira, B., Maida, M. (2006). **Monitoramento dos Recifes de Coral no Brasil, Situação atual e perspectivas**. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Biodiversidade e Florestas.

Freitas, M. A. P. (2004). **Zona Costeira e Meio Ambiente, Aspectos Jurídicos**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Direito da PUC-Paraná, Curitiba, Paraná, PR, Brasil.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (2021). **Página de consulta de licenças ambientais**. Disponível em: https://servicos.ibama.gov.br/licenciamento/consulta_empresendimentos.php. Acesso em: 22/08/2021.

IMO – International Maritime Organization (2021). **Marine Environment**. Disponível em: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Default.aspx>. Acesso em: 23/08/2021.

Machado, A., Denny, D. (2016). Sustentabilidade da exploração dos hidrocarbonetos não convencionais: compliance ambiental. **Revista de Direito e Sustentabilidade**. 2(1), 132-151.

Machado, P. (2015). **Direito ambiental brasileiro**. (23ª ed). São Paulo: Malheiros.

Martins, R. (2014). O direito marítimo e a questão ambiental: análise acerca dos princípios da precaução e do poluidor pagador como instrumentos de efetividade jurídica no combate à poluição do meio ambiente marinho. **Aurora, Revista PPGCS UNESP Marília**, 8(1), 1-14.

MMS – Minerals Management Service (2007). Programmatic Environmental Impact Statement for alternative energy development and production and alternate use of facilities on the Outer Continental Shelf – **Final Environmental Impact Statement**.

Mota, M. (2006). O conceito de natureza e a reparação das externalidades ambientais negativas. **Revista de Direito da Cidade**, 6(2), 201-225.

Porto, M., Teixeira, S. (2002). **Portos e meio ambiente**. São Paulo: Aduaneiras.

Santos, P. (2012). Impactos Ambientais Causados Pela Perfuração de Petróleo. **Cadernos de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas**, 1(15), 153-163.

Sluijs, J., Turkenburg, W. (2006). Climate change and the precautionary principle. In: Fisher, E., Jones, J., Schomberg, R. **Implementing the precautionary principle, perspectives and prospects**. Cheltenham: Edward Elgar.

SOSMA - SOS Mata Atlântica (2013). **Plano Nacional contra vazamentos de petróleo não garante segurança da costa**. Disponível em: <https://www.sosma.org.br/noticias/plano-nacional-contra-vazamentos-de-petroleo-nao-garante-seguranca-da-costa/>. Acesso em: 20/08/2021.

Souza Filho, A. M. (2006). **Planos Nacionais de Contingência para Atendimento a Derramamento de Óleo: Análise de países representativos das américas para implantação no caso do Brasil.** Dissertação em Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Sugarman, S. (2006). Roles of Government in Compensating Disaster Victims. **The Berkeley Electronic Press.** Artigo 1093.

United Nations (1992). **Assessment of the Environmental Impact of Port Development.** A guidebook for EIA of Port Development. Nova York.

ENVIRONMENTAL IMPACTS ON MARINE ENERGY: COLLISION RISKS FOR MARINE ANIMALS AND PRIORITY SPECIES FOR MONITORING IN BRAZIL

Catarina Luiza Damasceno Lima da Silva^{®1}, Pedro Henrique Castello Branco Dágola^{1,2},
 Marcos Antônio Cruz Moreira^{1,3}, Luís Felipe Umbelino dos Santos^{1,4}

ABSTRACT: Brazil has great potential for the development of technologies for the conversion of marine energy from waves and tides, which raises the discussion about the possible environmental impacts of these projects. This article seeks to synthesize knowledge about the risks of collision of marine animals, such as mammals, fish and birds, with marine renewable energy (MRE) devices, as well as to identify priority species for environmental monitoring along the Brazilian coast. The risk of marine mammals colliding with MRE devices is influenced by regional and behavioral factors. The risk of collision in a fish community is influenced by the avoidance behavior, the distribution of fish in the MRE sites and the stages of the enterprise (installation, operation and maintenance). Seabird collision risk is influenced by species behavior (geographical distribution, seasonal habitat use, diving time and depth) and the location of MRE structures (surface and/or water column). The survey of priority species for monitoring the risk of collision with MRE devices in Brazil consisted of 5 species of marine mammals, 13 taxa of seabirds, 5 species of endangered sea turtles and 18 species or groups of species of fish of economic importance to the country. The research review did not record the occurrence of collisions with marine animals. However, this does not mean that they did not occur, but that they may not have been observed due to monitoring challenges. The study concluded that research on the interaction of marine animals with MRE devices should be encouraged, even in prototypes and non-commercial projects, in order to reduce knowledge gaps and support the development of MRE in an environmentally sound manner.

Keywords: Marine renewable energy, Collision risk, Species, Marine animals.

RESUMO: O Brasil possui grande potencial para o desenvolvimento de tecnologias de conversão de energia marinha das ondas e marés, o que aflora a discussão sobre os possíveis impactos ambientais desses empreendimentos. Este artigo busca sintetizar os conhecimentos sobre os riscos de colisão de animais marinhos, como mamíferos, peixes e pássaros, com dispositivos de energia marinha renovável (EMR), bem como identificar as espécies prioritárias para o monitoramento ambiental ao longo da costa brasileira. O risco de colisão de mamíferos marinhos com dispositivos de EMR é influenciado por fatores regionais e comportamentais. O risco de colisão em comunidade de peixes é influenciado pelo comportamento de evasão, a distribuição dos peixes nos locais de EMR e as etapas do empreendimento (instalação, operação e manutenção). O risco de colisão de aves marinhas é influenciado pelo comportamento das espécies (distribuição geográfica, uso sazonal do habitat, tempo e profundidade de mergulho) e pela localização das estruturas de EMR (superfície e/ou coluna de água). O levantamento de espécies prioritárias para o monitoramento do risco de colisão com dispositivos de EMR no Brasil foi constituído por 5 espécies de mamíferos marinhos, 13 táxons de aves marinhas, 5 espécies de tartarugas marinhas ameaçadas de extinção e por 18 espécies ou grupos de espécies de peixes de importância econômica para o país. A revisão das pesquisas não registrou ocorrência de colisões com animais marinhos. No entanto, não significa que não ocorreram, mas que podem não ter sido observadas devido aos desafios do monitoramento. O estudo concluiu que as pesquisas de interação de animais marinhos com dispositivos de EMR devem ser fomentadas, mesmo que em protótipos e projetos não comerciais, a fim de reduzir as lacunas do conhecimento e auxiliar o desenvolvimento da EMR de forma ambientalmente adequada.

Palavras-chave: Energia renovável marinha, Risco de colisão, Espécies, Animais marinhos.

® Corresponding author: catarinabio97@gmail.com

1 Fluminense Federal Institute of Education, Science and Technology, Rio de Janeiro, Brazil.

2 Email: pedrodogola@gmail.com

3 Email: mcruzcn@gmail.com

4 Email: lfumbelino@gmail.com

1. INTRODUCTION

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) preliminary report reveals that the world temperature rise will reach or exceed 1.5°C between 2021 and 2040 (IPCC, 2021). Its content is a warning to the end of the fossil fuel era, and the need for massive investments in renewable energy is irrefutable. For the scenario of temperature increase below 1.5°C, the share of renewable energy in the world is expected to grow from 14% in 2018 to 74% in 2050, which requires an eight-fold increase in the annual growth rate (IRENA, 2021).

Since 2019, the IPCC has recognized Marine Renewable Energies (MRE) as a mean of mitigating climate change. The ocean can be considered an enormous reservoir of thermal energy, heat from the sun, and mechanic energy from tides and waves. Technologies can generate electrical energy from various ocean energy resources such as tides, waves, ocean thermal energy conversion (OTEC), ocean currents, wind and salinity gradients (Spellman, 2014). Ocean energy resources can potentially generate between 45 000 TWh and 130 000 TWh of electricity per year, covering more than twice the global demand for electricity (IRENA, 2020). However, the contribution of marine energy to world electricity generation and needs is nowadays very small, representing 0.1%, coming mostly from tidal power plants (EPE, 2020a).

The Brazilian energy matrix is composed of approximately 50% of renewable energies (EPE, 2021) and these sources dominate the electricity sector, accounting for more than 80% of the country's electricity generation, Figure 1.

According to the 2020 National Energy Balance, Brazil does not use RME for electricity generation, despite the extensive coastal zone of 8 698 km (MMA, 2008; EPE, 2020b) and research indicating a potential of 114 GW of the renewable energies from the sea. A survey carried out by the Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), through local measurements and theoretical research, estimated an energy potential of 27 GW from the tides in the north and northeast regions of Brazil. On the coast of the states of Amapá, Pará and Maranhão, tides vary between 5 to 11 m (Florêncio and Trigo, 2020; Tolmasquim, 2016). The energy potential of the waves was estimated from the extent of each state of the federation, based on the average significant wave height in the year and the average period in the year (Tolmasquim, 2016). Thus, the energy potential of the waves was 22 GW in the Northeast, 30 GW in the Southeast and 35 GW in the South (Tolmasquim, 2016; Florêncio and Trigo, 2020, Figure 2).

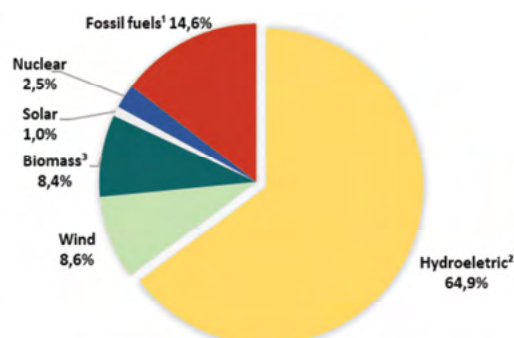


Figure 1. Domestic electricity supply of 651.3 TWh in Brazil, in 2019, by source. (Source: Adapted from the Energy Research Company (EPE, 2020b)). Notes: ¹Includes coke oven gas. ²Includes electricity imports. ³Includes firewood, sugarcane bagasse, bleach and other recoveries.

Despite the benefits of renewable sources, several studies reveal environmental impacts on renewable energy projects, which vary in type and intensity according to the technology used, geographic location, ecological resources, among other factors (Spellman, 2014). According to data from the International Energy Agency - IEA (2020), the share of renewable energies in electricity generation increased from 20% to almost 28% between 2010 and 2020. In view of the increasing trend in renewable sources, it is necessary to gather information about the impacts generated to mitigate or eliminate them.

Knowing them helps regulatory agencies in the authorization and licensing processes; and also helps government spheres responsible for the management of coastal and oceanic areas and project developers to understand what will be required from them, investing in technologies that improve maritime energy devices (Copping *et al.*, 2020). Furthermore, it is vitally important to make the population of the coastal zone more aware of the environmental impacts of developments in this area (Barros *et al.*, 2010). For example, when the population understands the advantages and disadvantages for the region, they may or may not oppose the implementation or permanence of renewable marine energy projects.

The exploration of ocean energy has few ventures and projects; however, like all energy exploration for human use, it also generates environmental costs (Copping *et al.*, 2014). Installation and operation of RME have environmental impacts on marine animals (Keenan *et al.*, 2011; Halvorsen *et al.*, 2012) and physical systems (Ahmadian *et al.*, 2012; Jones *et al.*, 2014). This review presents research works that assess the interaction

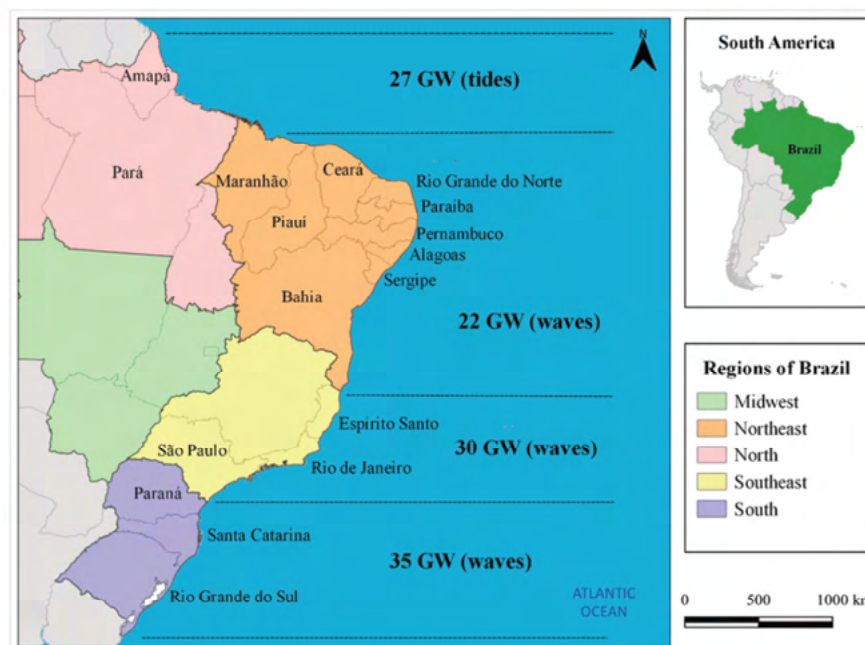


Figure 2. Estimated Brazilian theoretical potential of wave and tidal energy.

and collision risks of marine animals (mammals, fish and birds) with marine energy system of waves, tidal and currents; and since there is an estimated energy potential for the entire coast, it aims to indicate priority species for environmental monitoring of the risk of collision in Brazil.

2. METHODOLOGY

The survey on the potential environmental impacts of Marine Renewable Energy took place through the works of Spellman (2014), Tolmasquim (2016) and Copping *et al.* (2020). The summary of the state of the art on marine animal collision risk was based on Copping *et al.* (2020), report prepared by the Technological Collaboration Program in Ocean Energy Systems (OES) - Environmental. This intergovernmental program was developed to examine the environmental effects of marine energy and was established by the International Energy Agency in 2001.

The report features various laboratory, field and modeling researches, as well as international environmental monitoring programs, both to assess the interaction of marine animals and the risk of collision with RME devices. The great concern of these

researches are endangered species and those of commercial and recreational importance, as additional disturbances in these populations can cause environmental and economic impacts. Therefore, to prepare a list of priority species for monitoring interaction with RME devices in Brazil, commercially important fish species were selected; and endangered species of marine mammals, birds and reptiles. The species of mammals, birds and reptiles were selected from ICMBio (2018) which used the IUCN (2001) method to categorize the risk of extinction.

According to MMA Ordinance No. 43/2014, of the Brazilian Ministry of the Environment, species threatened with extinction are those categorized as: vulnerable (VU), high risk of extinction in nature; Endangered (EN), very high risk of extinction; critically endangered (CR), extremely high risk of extinction; and extinct in the wild (EW), individuals only in cultivation, captivity or with a population (or populations) naturalized outside their natural range (ICMBio, 2018). Also for mammals, birds and reptiles, the category of extinction risk, the geographic distribution in the country, the habitat, and only for marine mammals, the presence in conservation units were informed. The fish species selected were those that make up 60% of marine fisheries production in Brazil, according to data collected by Dias-Neto and Dias (2015). From this work, the information selected was about

the fishing area, habitat, average production between 1995 and 2010 in tons and the status of use or source (condition of fish stocks according to exploitation, which demonstrates the tendency to decline or population recovery) by species or group of fish species.

In the report by Copping *et al.* (2020), no research has been carried out about the risk of collision of marine animals with EMR devices in Brazil. Thus, it was not possible to identify the interaction of species of mammals, birds and fish in Brazilian territory with EMR devices. However, the species monitored in the research by Copping *et al.* (2020) were verified in publications in order to verify the occurrence in Brazil. Mammal species were consulted in ICMBio (2018) and Monteiro-Filho *et al.* (2013). Bird species were verified in ICMBio (2018) and Piacentini *et al.* (2015). And fish species were researched in ICMBio (2018) and Froese and Pauly (2021). In the research gathered by Copping *et al.* (2020) monitoring of reptile species was not observed.

3. ENVIRONMENTAL IMPACTS ON THE DEVELOPMENT OF MARINE RENEWABLE ENERGIES DEVICES

Several projects in Brazil and abroad developed ocean energy conversion technologies; however, most projects implemented in water were for testing or limited demonstration, with few commercial scale projects (Florencio and Trigo, 2020; IRENA, 2020). Most of the environmental impact studies of these technologies were carried out as a requirement of regulatory

agencies for the consent of commercial projects. In general, extensive monitoring is required to understand possible interactions of EMR devices with marine animals and habitats. However, not all instrumentation and/or data collection efforts to carry out this type of monitoring have achieved their objectives (Copping *et al.*, 2020). This occurs because EMR devices are usually deployed in high energy and/or turbid places, which makes the operation of oceanographic equipment, sensor platforms and even human observation on vessels necessary to characterize these interactions difficult.

In this context, the article reviews studies on the potential risk of collision in RME devices, by examining the interactions between marine energy systems harvesting and the marine environment, called stressors and receptors, respectively, as designated by Boehlert and Gill (2010). Stressors are any part of RME systems that can cause damage or stress to a marine animal, a habitat, ecosystem processes or oceanographic processes. These stressors include moving turbine blades, anchors or foundations, mooring ropes, energy export cables, and emissions from any part of the RME system. Receptors include marine animals that live in the vicinity of an RME project, habitats where devices are deployed, and oceanographic processes such as natural water movement, wave height, sediment transport, and concentrations of dissolved gases and nutrients that sustain marine life (Copping *et al.*, 2020). The interactions between stressors and receptors are analyzed through observations, laboratory and field experiments, and modeling studies (Copping *et al.*, 2014; 2020). Figure 3 demonstrates some stressor-receptor

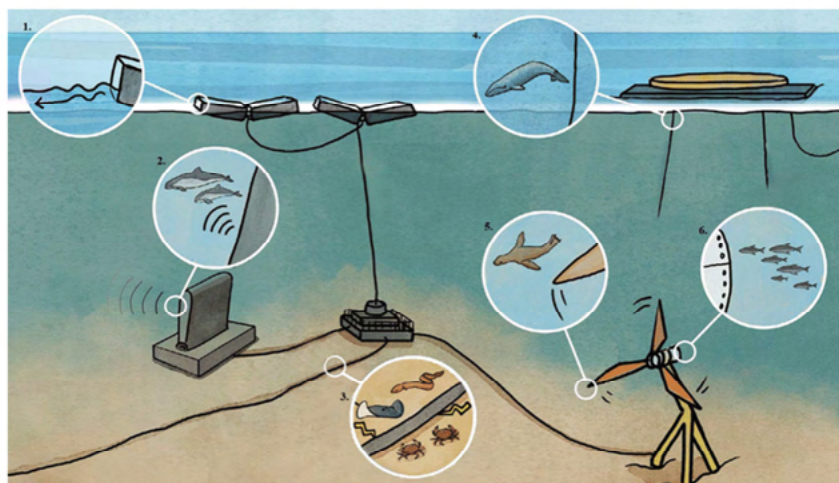


Figure 3. Potential interactions between stressor and receptor. 1. Changes in oceanographic systems; 2. Underwater noise; 3. Electromagnetic fields; 4. Mooring entanglement; 5. Collision risk and 6. Habitat changes after introduction of an RME device (Adapted from Copping *et al.*, 2020).

interactions.

It is noteworthy that the risks that RME devices can pose to marine animals, habitats and the environment vary according to the attributes of the RME device (static or dynamic), energy conversion technology (waves or tides) and scale installation space (single device or matrix) (Copping *et al.*, 2020). In addition, to assess the actual environmental impacts of the EMR, local investigation actions must be carried out, generally foreseen for the consent of projects: carrying out baseline surveys before project implementation, aiming to understand, quantify and assess potential environmental impacts; analysis of cumulative effects of both human activities and natural processes; determination of the project's near and far field; and preparation of environmental monitoring to assess the impacts of the project's post-installation devices.

Research related to local investigation actions should seek efforts to gather inventory information of natural species in the region and their respective patterns of distribution and normal movement in time and space (cf. Viehman *et al.*, 2018; Holdman *et al.*, 2019); the characteristics of RME stressors (cf. Nedwell and Brooker, 2008); and the hydrodynamic and sedimentation pattern and its variation in time and space (cf. Fairley *et al.*, 2017; Khaled *et al.*, 2019).

Environmental impacts of the development of RME on marine animals

Marine energy harvesting systems can harm marine animals and their habitats. Scientific research carried out focuses on the following interactions of risk to marine animals: collision with mobile and stationary devices; underwater noise generated by devices; electromagnetic fields emitted by electrical cables and devices; and entrapment in underwater cable and mooring systems. The devices can also cause changes in benthic and pelagic habitats (Copping *et al.*, 2020).

Risk of collision of marine animals with mobile and stationary devices

There is great concern about marine animals colliding with moving parts of a device, such as turbine blades, moving devices such as tidal kites and blade oscillators, or stationary parts of devices such as the foundation, which can cause irreversible injury or death. For species that are already being disturbed by other human activities, losing individuals can harm the survival of the entire population. Therefore, existing environmental monitoring programs in marine energy harvesting projects are aimed at declining marine mammal populations or

those in protected areas; commercially important fish species and recreational fishing; and endangered seabirds (Copping *et al.*, 2020). There are no reports in the literature of collisions of marine mammals, diving seabirds and other animals with RME devices, only interaction of fish with turbines without harmful effects (Matzner *et al.*, 2017; Sparling *et al.*, 2020).

Several collision risk models have been developed to predict the probability of collision and consequences in marine mammals (Wilson *et al.*, 2007; Band, 2014). Collision potential will likely vary with local parameters such as location, water depth and tidal velocity, and with behavioral parameters of these animals such as vertical distribution in the water column, swimming in tidal currents and foraging sites. However, changes of behavior according to locations does not allow for generalization (Copping *et al.*, 2020). Behavioral studies were carried out with harbor porpoises *Phocoena phocoena* (Macaulay *et al.*, 2015, 2017; Benjamins *et al.*, 2017), harbor seals, *Phoca vitulina* (Hastie *et al.*, 2016) and gray seals *Halichoerus grypus* (Lieber *et al.*, 2018). Studies such as Copping and Gear (2018) apply several input parameters and investigate the sensitivity in collision models.

Field and laboratory studies identified evasion behavior of marine mammals from locations where turbines were in operation. Overall, these animals kept an intermediary distance (hundreds of meters) from these devices, as indicated by environmental monitoring by the companies MayGen and Nova Innovation in Scotland, SeaGen in Northern Ireland, FORCE and Sustainable Marine Energy in Canada (Sparling *et al.*, 2020). Most mammal encounters occurred when the devices did not operate. More details on these studies can be found in Sparling *et al.* (2020). The preventive behavior (evasion) of these animals in the vicinity of tidal energy structures reduces the chances of collision. Collision risk modeling research should consider the avoidance rate for proper prediction. However, studies on the consequences of evasion of these animals for the region's ecosystem must be carried out.

In studies carried out to understand the interaction of fish with RME devices, unlike marine mammals, show evasion behavior on a fine scale (from centimeter till meter scale) while turbines are operating (Bevelhimer *et al.*, 2017); however, a third of the juvenile fish analyzed by Matzner *et al.* (2017) pass through turbines. To understand the avoidance behavior, laboratory research carried out in gutters showed that ray-finned tamaroks (*Gnathopogon elongatus*) are less able to avoid turbines in current locations (Yoshida *et al.*, 2020) and that the frequency

of rotation of turbines significantly affected the avoidance behavior of Japanese rice fish (*Oryzias latipes*) (Zhang *et al.*, 2017). Avoidance behavior reduces the risk of collision, but these studies may indicate that local, device and fish factors, such as age, hinder this preventive action, and may increase the risk of collision in fish.

The distribution of fish in the region of marine energy harvesting systems is an important parameter for the risk of collision, as it indicates environmental factors that approach or distance fish from RME devices. Baseline surveys by Viehman and Zydlewski (2017) and Viehman *et al.* (2018) reveal that fish abundance and vertical distribution varied with season, daily cycle and tidal stages. These surveys used hydroacoustic data, which did not allow identifying the species at the survey sites. However, the authors used previous sampling to discuss the results. Viehman and Zydlewski (2017) indicated species likely to be present in the Bay of Fundy, Cobscook Bay, Maine, such as Atlantic herring (*Clupea harengus*), winter flounder (*Pseudopleuronectes americanus*), alewife (*Alosa pseudoharengus*), rainbow smelt (*Osmerus mordax*), blueback herring (*Alosa aestivalis*), American eel (*Anguilla rostrata*) and Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*). Viehman *et al.* (2018) used samples from the Minas Passage Basin, Nova Scotia study site, and other parts of the Bay of Fundy in Canadá to determine species potentially present in the area, such as alewife (*Alosa pseudoharengus*), blueback herring (*Alosa aestivalis*), American shad (*Alosa sapidissima*), Atlantic salmon (*Salmo salar*), striped bass (*Morone saxatilis*), rainbow smelt (*Osmerus mordax*), sea lamprey (*Petromyzon marinus*), Atlantic sturgeon (*Acipenser oxyrinchus*), American eel (*Anguilla rostrata*), Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*), pollock (*Pollachius virens*), spotted stickleback (*Gasterosteus wheatlandi*), Atlantic herring (*Clupea harengus*), three-spine stickleback (*Gasterosteus aculeatus*) and sharks, in summer, as porbeagle (*Lamna nasus*) and spiny dogfish (*Squalus acanthias*).

Whitton *et al.* (2020) verified that vertical migrations were stimulated by the penetration of light into the water column and by particulate matter suspended in a sectional area. In this study, carried out with schools of sprat (*Sprattus sprattus*) and some of *Merlangius merlangus*, the fish remained in the device locations for only 6% of the operating time, revealing a very low collision risk. In addition to environmental factors, the stages of the marine energy project also influence the distribution of these animals. Staines *et al.* (2019) observed lower fish density during installation and maintenance periods than during normal operation of the RME device in Cobscook Bay, Maine, USA. This

may indicate less potential for fish collisions in the installation and maintenance stages of marine energy systems, but greater migration. As the research used hydroacoustic data, it was not possible to identify the species that could be migrating from the area.

The availability of prey close to marine energy system structures is a parameter related to collision risk. The results obtained by Fraser *et al.* (2018) when comparing an area of RME devices with a nearby control site indicated an attraction of fish to RME devices (general increase in the observation of schools, mainly at night, and in wakeful flow). Although aggregation and vertical distribution depends on tidal phases and avoidance of device depth at high flow speed, increased fish in RME sites can lead to foraging behavior of larger predators such as marine mammals and birds, increasing the risk of collision of these species (Fraser *et al.*, 2018). The study was carried out in the Orkney Islands, Scotland, and according to the authors, the fish species likely to be present during data collection were mackerel (*Scomber scombrus*), pollack (*Pollachius pollachius*), saithe (*Pollachius virens*), sprat (*Sprattus sprattus*), herring (*Clupea harengus*) and sandeels (*Ammodytes spp.*).

Likewise, Williamson *et al.* (2019) pointed out the aggregation and concentration of fish close to turbine structures, which could attract the foraging of predators and, consequently, increase the risk of their collision. In addition, it was observed that predatory fish began to occupy deeper areas at night, which can result in greater energy expenditure and increase the risk of collision with operating turbines, due to poor visual detection in low light, with insufficient detection of changes in the flow field or noise for an avoidance action. The authors reported using observational data on fish behavior change in models that estimate the cumulative effects on the predator population and in ecosystem models. Due to the high tidal energy conditions, it was not possible to use trawls to distinguish the species. However, other studies have suggested possible species present at the site, such as Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*), Atlantic herring (*Clupea harengus*), sprat (*Sprattus sprattus*), sandeel (*Ammodytes spp.*), haddock (*Melanogrammus aeglefinus*), ling (*Molva molva*), saithe (*Pollachius virens*), Atlantic cod (*Gadus morhua*), butterfish (*Pholis gunnellus*), scorpion fish (*Taurulus bubalis*) and pollack (*Pollachius pollachius*) (Williamson *et al.*, 2019).

Collision risk or encounter risk models (also used to estimate the probability of the animal occupying the same space as the device) typically use a physical description of the turbine and fish

characteristics to estimate the potential collision rate. Studies even in worst-case scenarios have revealed small collision/encounter risk rates for fish, such as Shen *et al.* (2016) and Grippo *et al.* (2017), in Maine, in the United States; and Xodus Group (2016), in the Orkney Islands, Scotland.

Seabirds dive at operational turbine depths, presenting a collision risk that involves various behavioral movements, such as geographic distribution, seasonal habitat use, diving time and depth, among others (Sparling *et al.*, 2020). Thus, the behavior of seabirds can increase or reduce the risk of collision. In the following studies, behavior determined an increased risk of collision due to: diving depth in European shags (*Phalacrocorax aristotelis*) and black guillemot (*Cepphus grylle*) (Langton *et al.*, 2011; Furness *et al.*, 2012); the association with sites of rapid horizontal flow, such as Atlantic puffins (*Fratercula arctica*) (Waggitt *et al.*, 2016); and foraging terns (*Sterna sandvicensis*, *Sterna hirundo*, *Sterna paradisaea*) on device mats (ecological trap) (Lieber *et al.*, 2019). In addition to that, the location of RME structures, such as floating wave energy devices on the surface, can increase the risk of collision due to their use for resting seabirds, especially Arctic terns (*Sterna paradisaea*), Jackson *et al.* (2014). Collision risks were considered lower when the probability of diving close to turbines was greater in high tides than in ebb tides, and when this probability was lower in faster tidal flow (Cooper *et al.*, 2020), according to a study made with black guillemots (*Cepphus grylle*), European shags (*Phalacrocorax aristotelis*), Atlantic puffins (*Fratercula arctica*), Northern gannets (*Morus bassanus*), common guillemots (*Uria aalge*) and red-throated divers (*Gavia stellata*).

Despite these studies, foraging sites and diving behavior are highly variable among bird species, habitat use is site-specific and may vary within a site (Sparling *et al.*, 2020), making it difficult to calculate a specific risk even for the studied region. Therefore, the Scottish Natural Heritage (2016) guidance for collision risk models (using turbine and animal pattern data for estimation) can be used to choose a model suitable for the specific circumstance of the enterprise and the available data, thus avoiding generalizations.

4. PRIORITY SPECIES FOR MONITORING THE RISK OF COLLISION WITH MARINE RENEWABLE ENERGY HARVESTING SYSTEMS IN BRAZIL

Brazil was the first country in Latin America to install a wave plant, located in the port of Pecém, in the state of Ceará. In

the Bacunga estuary, in the state of Maranhão, studies point to the technical feasibility of installing a tidal power plant (Ferreira and Estefen, 2009). Although the projects are not in force, the existence of dozens of bays with tidal heights between 3.7 and 8 m along the north coast of the country, and the announcement of the partnership between the Pecém Complex and the Swedish-Israeli company Eco Wave Power, for the implementation of a clean wave energy generation plant by the Ceará government, accelerate the concern with the Brazilian marine fauna (Piacentini, 2016; Ceará, 2021). In this section, a brief review of marine species found off the Brazilian coast susceptible to the risk of collision with marine renewable energy devices was carried out.

4.1 Marine mammals

In Brazil, 56 species of marine mammals have been found by 2020, of which 47 belong to the Cetacea order (whales, dolphins, porpoises), one species belongs to Sirenia and eight belong to Carnivores (seals, fur seals, elephant seal) (Santos, 2021a). Many of these marine species are called “vagrant”, as they are occasional visitors to the Brazilian coast and are not part of the national survey on the risk of extinction published in 2018. According to this survey, eight species were considered threatened, with the main threats being pollution, including noise, collision with vessels and accidental fishing (ICMBio, 2018). Table 1 groups the species of marine mammals that are threatened and found in conservation areas. These species deserve special attention in monitoring the risk of collision with RME devices and vessels, when the installation, operation and maintenance of the enterprise are carried out.

RME projects are developed to operate in the coastal zone up to the maritime limit of the Exclusive Economic Zone – EEZ. These zones are located within the continental shelf according to the boundaries shown in Figure 4. Thus, the threatened species of the order Cetacea, *Balaenoptera borealis* (sei whale), *Balaenoptera physalus* (fin whale) and *Balaenoptera musculus* (blue whale) were not included in the Table 1, as records on the continental shelf are rare.

This survey does not aim to exclude the monitoring of other species of marine mammals (whales, dolphins, seals, fur seals, etc.) occurring in Brazil in areas where marine energy systems are deployed, because species that are not threatened must maintain or improve its state of conservation.

The species *Phocoena phocoena* (harbor porpoises), *Phoca vitulina* (harbor seal) and *Halichoerus grypus* (grey seals)

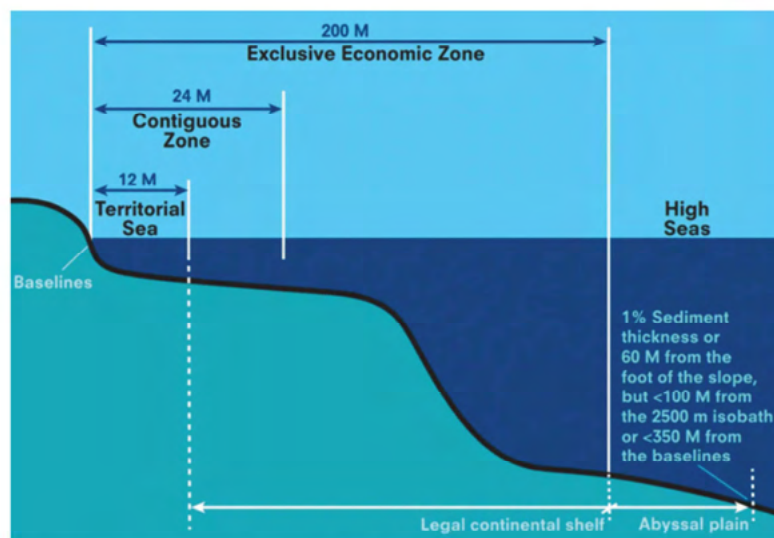


Figure 4. Maritime zones under the United Nations Convention of the Law of the Sea – UNCLOS (UNCLOS, 2012).

Table 1. Endangered species of marine mammals found in Brazilian protected areas (ICMBio, 2018; Monteiro-Filho *et al.*, 2013).

Order	Species	Common name	Category of extinction risk / Geographical distribution in Brazil / Presence in protected areas
Cetacea	<i>Physeter macrocephalus</i>	Sperm whale	Vulnerable species. Occurrence throughout the Brazilian coast, mainly in oceanic habitat. <u>Rio Grande do Norte</u> : REBIO Atol das Rocas. <u>Santa Catarina</u> : - APA Baleia Franca and REBIO Marinha do Arvoredo.
Cetacea	<i>Sotalia guianensis</i>	Guiana dolphin	Vulnerable species. Occurrence from the state of Amapá to Santa Catarina, mainly in coastal ecosystems such as bays, inlets and estuaries. The Guiana dolphin is found in 162 Brazilian conservation units, however, only the APA of Anhatomirim (SC) and REFAU Tibau do Sul (RN) have among their objectives the protection of the species.
Cetacea	<i>Eubalaena australis</i>	Southern right whale	Endangered species. Occurrence from the state of Bahia to Rio Grande do Sul, being recorded, in most cases, in places less than 10 m deep. <u>Bahia</u> : PARNA Marinho de Abrolhos, APA Ponta da Baleia; <u>Santa Catarina</u> : APA Baleia Franca; <u>Rio Grande do Sul</u> : REVIS Ilha dos Lobos, potentially, PARNA Lagoa do Peixe.
	<i>Pontoporia blainvillei</i>	Franciscana whale	Critically endangered species. It occurs from the state of Espírito Santo to Rio Grande do Sul; its preferred habitat includes coastal regions up to 50 m deep and some estuarine complexes. The species occurs in more than 70 conservation units.
Sirenia	<i>Trichechus manatus</i>	West Indian manatee	Endangered species. It occurs in the state of Alagoas, Pernambuco to the east of Ceará, appearing again on the west coast of Ceará to the Paruaíba delta, in Piauí. It reappears on Ilha do Gato, on the east coast of Maranhão, as far as the municipality of Oiapoque, in Amapá state. <u>Alagoas</u> : APA Piaçabuçu; <u>Pernambuco/Alagoas</u> : APA Costa dos Corais; <u>Paraíba</u> : ARIE Manguezais da Foz do Rio Mamanguape, RESEX Acaú-Goiana, APA Barra do Rio Mamanguape; <u>Ceará</u> : RESEX Prainha do Canto Verde; <u>Maranhão/Piauí/Ceará</u> : APA Delta do Paruaíba; <u>Maranhão</u> : RESEX Cururupu and Quilombo do Frexal; <u>Pará</u> : RESEX Chocoaré-Mato Grosso, São João da Ponta, Mãe Grande de Curuçá, Maracaná, Gurupi-Piriá, Marinha de Caeté-Taperaçu, Marinha de Tracuateua, Marinha de Soure; <u>Amapá</u> : ESEC Maracá-Jipioca, PARNA Cabo Orange.

Note: The following are Portuguese acronyms whose meanings have been translated into English: APA - Environmental Preservation Area; ARIE – Area of Relevant Ecological Interest; ESEC – Ecological Station; PARNA – National Park; REBIO - Biological Reserve; REFAU – Fauna Reserve; RESEX – Extractive Reserve and REVIS – Wildlife Refuge.

are not found on the Brazilian coast but were surveyed in Europe, and studies assessed their behavior with underwater devices and the risk of collision. This fact attests the need for conducting similar research on the installation and operation of these systems in Brazil. In addition, the behavioral differences of animals in nearby locations reaffirm the need for research on the interaction of Brazilian marine mammals (receptors) with RME devices and turbines (stressors).

4.2 Marine fish community

In Brazil, more than 1 300 species of marine fish are known, of which 98 have been classified as threatened with extinction. Of the species threatened with extinction, 72 were registered in conservation units, which keep the integrity of portions of the habitat, contributing to its preservation. It is advisable, in areas where RME systems are installed, to observe the occurrence of species threatened with extinction on the list of the Ministry of the Environment, according to Ordinance No. 445/2014.

According to Copping *et al.* (2020), commercially important fish species are included in the environmental monitoring carried out in international marine energy undertakings. The extinct Ministry of Fisheries and Aquaculture, in 2012, listed 121 species or groups of fish, 12 crustaceans and 10 molluscs (total: 143) as part of the marine biodiversity of commercial fisheries. From this biodiversity, 25 species or group of species are responsible for about 60% of the marine fishery production in Brazil. These species had an average production of more than 4 000 tons or relevant social and economic importance for national marine fisheries from 1995 to 2010 (Dias-Neto and Dias, 2015).

Table 2 presents the 18 main species or group of fish species of economic importance for Brazil. Crustacean species, such as shrimp, lobsters and crabs, were removed as they are not the target of this article. Table 2 also informs the use status of this set of species or group of fish species. Marine fish produced by aquaculture were not considered, as this activity usually takes place in a confined and controlled space. Thus, they would hardly be part of a collision risk analysis with RME devices.

In addition to the related species, the following are important for Brazilian commercial fisheries: swordfish (*Xhipias gladius*), common dolphinfish (*Coryphaena hippurus*), king mackerel (*Scomberomorus cavalla*), blackfin tuna (*Thunnus atlanticus*), frigate tuna (*Auxis thazard*), wahoo (*Acanthocybium solandri*), opah or moonfish (*Lampris guttatus*), bluefish (*Pomatomus saltatrix*), striped bass (*Centropomus spp.*), dusky grouper (*Epinephelus marginatus* and others), Atlantic goliath grouper

(*Epinephelus itajara* and others), flounder (several species), Atlantic promfret (*Brama spp.*), red porgy (*Pagrus pagrus*), crucifix sea catfish (*Sciades proops*), among others (Dias-Neto and Dias, 2015).

Other species such as white marlin (*Tetrapterus albidus*), Atlantic sailfish (*Istiophorus albicans*) and Atlantic blue marlin (*Makaira nigricans*) are important for sport fishing. Due to the critical situation of stocks, they face restrictions on commercial fishing, as recommended by the International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas - ICCAT (Dias-Neto and Dias, 2015). Therefore, they should also be part of environmental monitoring programs when they occur in areas of RME systems.

Research related to the interaction of fish with RME devices has mostly taken place in the United States, Canada and the United Kingdom, in the temperate zone of the Northern Hemisphere. It was expected that few species would occur in Brazil, as much of its territory is in the tropical zone. Only two species of shark/dogfish were found in Brazilian waters: porbeagle (*Lamna nasus*) and picked dogfish (*Squalus acanthias*). Porbeagles occur off the southern coast of Brazil and are often found in groups in both coastal and oceanic waters up to 1 800m deep (Silveira, 2020). In Brazil, the porbeagle (*Lamna nasus*) was not considered endangered (EN), being classified as insufficient data (DD). The picked dogfish (*Squalus acanthias*) is restricted to the coast of the southern region of the country and occurs sporadically in the states of Santa Catarina and Rio Grande do Sul. It is a demersal specie of cold and temperate waters, occurring on the continental shelf and higher slope. Picked dogfish was considered critically endangered (CR) in the country, with a declining population trend, and is included in the National Action Plan for the Conservation of Endangered Sharks and Marine Rays (ICMBio, 2018). Although studies carried out near the Bay of Fundy, Maine (USA) and Nova Scotia (Canada) do not assess the specific interaction of these animals with RME devices, these works are reference for future studies and environmental monitoring of marine energy projects that may be installed in the south of the country, where porbeagles and picked dogfish occur.

4.3 Seabirds

Seabirds are those that depend on the resources existing in marine environments for their survival, being highly adapted to live in the sea (Branco, 2004). They spend most of their lives moving across the oceans, remaining on land only for breeding. They can also be called oceanic or pelagic birds.

Table 2. Marine fish economically important for Brazil (Source: Dias-Neto and Dias, 2015).

Species or species groups	Common name	Fishing area / Habitat	Average production for the period 1995 to 2010 (tons)	Use status / source
<i>Sardinella brasiliensis</i>	Brazilian sardine	Southeast and South. It inhabits coastal waters, entering bays and estuaries. It is found between 30 and 100 meters deep.	56 334	Overexploited
<i>Micropogonias furnieri</i>	Whitemouth croaker	Southeast and South, but it is also found along the entire Brazilian coast. It is a coastal demersal species, associated with freshwater mouths.	28 319	Overexploited
<i>Opistonema oglinum</i> (Atlantic thread-herring), <i>Harengula jaguana</i> (scaled sardine) and others.	Other sardines (Atlantic thread-herring, scaled sardine and others)	Brazil. They inhabit coastal areas and usually form schools.	21 842	Fully exploited
<i>Katsuwonus pelamis</i>	Skipjack tuna	Southeast and South. They occur in oceanic areas, therefore, are exploited by industrial fishing.	23 449	Fully exploited
<i>Thunnus obesus</i> (bigeye tuna), <i>Thunnus alalunga</i> (albacore), <i>Thunnus albacares</i> (yellowfin tuna)	Other tuna (albacore, bigeye tuna and yellowfin tuna)	Brazil. They occur in oceanic areas, therefore, it is exploited by industrial fishing.	19 520	Full / in recovery
<i>Cynoscion acoupa</i>	Acoupa weakfish	North and Northeast, but occurs along the entire Brazilian coast. It has demersal and coastal habits, in shallow and brackish waters of estuaries and river mouths.	16 981	Fully exploited
<i>Mugil spp.</i>	Mugil	Brazil. Species with wide distribution, occurring in coastal, marine and estuarine waters.	13 623	Fully exploited
Species of the Ariidae family.	Catfish	Brazil. Most of the species occur in coastal areas, shallow, with muddy or sandy bottoms.	10 669	Fully exploited
<i>Umbrina canosai</i>	Argentine croaker	Southeast and South. Demersal species, occurring in coastal and marine areas.	9 969	Overexploited
Several species	Dogfish / sharks	Brazil. The vast majority of species are considered predators and occupy pelagic, demersal, abyssal, coastal, estuarine or freshwater environments.	9 946	Fully exploited
<i>Scomberomorus brasiliensis</i>	Serra Spanish mackerel	Brazil. They have pelagic behavior and a more coastal geographic distribution, being caught in small-scale fisheries.	9 883	Fully exploited
<i>Sciades parkeri</i> (VU).	Gillbacker sea catfish	North. It is a demersal species, found in estuaries and coastal waters up to 20 meters deep in northern Brazil, and can also be found in fresh water.	7 749	Fully exploited
<i>Cynoscion guatucupa</i>	Stripped weakfish	Southeast and South. In southern Brazil, they occur in coastal waters, generally at depths below 50 m, but specimens have already been captured at 150 m.	7 180	Overexploited
<i>Lutjanus purpureus</i> (VU)	Southern red snapper	North and Northeast. It is a marine demersal species, from tropical reef environments, occurring at depths from 26 to 340 m.	6 281	Overexploited
<i>Macrodon ancylodon</i>	King weakfish	North and Northeast. Demersal fish found in shallow coastal waters, in sand and mud bottoms, occurring at depths of 30 to 70 m.	5 753	Fully exploited
<i>Urophycis brasiliensis</i>	Brazilian codling	Southeast and South. Inhabits shallow coastal waters up to 190 m deep. Adults are close to the bottom, while young people are pelagic.	4 427	Fully exploited
<i>Macrodon ancylodon</i>	King weakfish	Southeast and South. Demersal fish found in shallow coastal waters, inhabits sand and mud bottoms, occurring at depths of 30 to 70 m.	4 064	Overexploited
<i>Lophius gastrophysus</i>	Blackfin goosefish	Southeast and South. It is a fish that inhabits the continental shelf and the upper slope, with reduced mobility, and is found between 40 m and 620 m in depth.	2 221	Overexploited

In Brazil, there are 13 taxa (species and subspecies) threatened with extinction according to the National Action Plan for the Conservation of Seabirds - PAN Aves Marinhas (Table 3), approved by Ordinance MMA/ICMBio No. 286, of 4 April of 2018.

In addition to these taxa, *Procellaria aequinoctialis* (white-chinned petrel), *Procellaria conspicillata* (spectacled petrel), *Thalassarche chlororhynchos* (Atlantic yellow-nosed albatross), *Diomedea epomophora* (Southern royal albatross), *Diomedea sanfordi* (Northern royal albatross), *Diomedea exulans* (wandering albatross), and *Diomedea dabbenena* (Tristan's albatross), of the Procellariiformes order, deserve attention in the assessment of the risk of collision, as they are seabirds and appear in the red book of endangered Brazilian fauna, despite not being included in the priority conservation strategies of the PAN Aves Marinhas. These birds occur mainly in the south and southeast of Brazil.

Of the species studied to assess the risk of seabirds colliding with

RME devices, only the common tern (*Sterna hirundo*) and the Arctic tern (*Sterna paradisaea*) occur in Brazil. Lieber *et al.* (2019) observed in Northern Ireland that these species preferred to forage in device wake locations, which may increase the risk of collision with turbulent structures (shallow pinnacle at 5 m depth) as they forage close to the surface. Jackson *et al.* (2014) found that Arctic terns used floating wave energy devices to rest and potentially forage, which could increase the risk of collision. Thus, studies aimed at evaluating the stressor-receptor interaction of these species in the country already have data to be compared.

The neotropical cormorant (*Nannopterum brasilianus*), traditionally found in Brazil, is considered to be of the *Phalacrocorax* genus. Kennedy and Spencer (2014), however, showed that neotropical species, including the Galapagos Islands, belong to distinct clades and should be recognized in another genus (Piacentini *et al.*, 2015), which makes the European shag (*Phalacrocorax aristotelis*), studied in Scotland, United Kingdom, a different species of cormorant.

Table 3. Endangered bird taxa according to the PAN Aves Marinhas (Source: ICMBio, 2018).

Order	Species	Common name	Category of extinction risk / Geographical distribution in Brazil
Suliformes	<i>Sula sula</i>	Red-footed booby	Endangered (EN). In Brazil, it occurs in Fernando de Noronha, Atol das Rocas and the São Pedro and São Paulo archipelago. Strictly pelagic.
Suliformes	<i>Fregata ariel</i>	Lesser frigatebird	Critically endangered (CR). Occurrence of the subspecies <i>Fregata ariel trinitatis</i> , restricted to the islands of Trindade and Martin Vaz, in Espírito Santo, inhabits tropical and subtropical seas.
Suliformes	<i>Fregata minor</i>	Great frigatebird	Critically Endangered (CR). Occurrence of the subspecies <i>Fregata minor nicolli</i> on the islands of Trindade and Martin Vaz, Espírito Santo, inhabits tropical and subtropical seas.
Phaethoniformes	<i>Phaethon aethereus</i>	Red-billed tropicbird	Endangered (EN). Occurrence only of the subspecies <i>Phaethon a. aethereus</i> , with reproduction in Abrolhos and Fernando de Noronha. There are occasional records on the coast of Maranhão, Atol das Rocas, north and south of Bahia. They are mainly pelagic, inhabiting tropical and subtropical seas.
Phaethoniformes	<i>Phaethon lepturus</i>	White-tailed tropicbird	Endangered (EN). Occurrence in Abrolhos and Fernando de Noronha, also breeding sites. They are mainly pelagic, inhabiting tropical and subtropical seas.
Procellariiformes	<i>Pterodroma madeira</i>	Zino's petrel	Endangered (EN). There are records, by geolocators, on the coast of northeastern Brazil, a probable wintering area. Pelagic species.
Procellariiformes	<i>Pterodroma deserta</i>	Desertas petrel	Critically Endangered (CR). Overwintering areas between the coast of Ceará and Pernambuco, Espírito Santo and north of São Paulo. Pelagic species.
Procellariiformes	<i>Pterodroma incerta</i>	Atlantic petrel	Endangered (EN). Regular occurrence in waters adjacent to the south and southeast coast of Brazil, but there are records in the North and Northeast regions. Pelagic species.
Procellariiformes	<i>Pterodroma arminjoniana</i>	Trindade petrel	Critically endangered (CR). It takes place on Trindade Island, in Espírito Santo. Highly pelagic species, rarely approaching land.
Procellariiformes	<i>Puffinus lherminieri</i>	Dusky-backed shearwater	Critically endangered (CR). In Brazil, it only reproduces on two islands of Fernando de Noronha. Pelagic species.
Charadriiformes	<i>Sterna dougallii</i>	Roseate tern	Vulnerable (VU). There are records of passage in the Southeast, Northeast and North, but the wintering area occurs only in Bahia.
Charadriiformes	<i>Sterna hirundinacea</i>	South American tern	Vulnerable (VU). Largest records occur from Espírito Santo to Rio Grande do Sul. It nests in Brazil and is almost exclusively coastal.
Charadriiformes	<i>Thalasseus maximus</i>	Royal tern	Endangered (EN). Largest records occur from Espírito Santo to Rio Grande do Sul, but there are occurrences in the North and Bahia. It nests in islands of São Paulo. Inhabits coastal areas.

It is advisable that international studies be carried out in Brazil, even with common species and similar devices, when installation, operation and decommissioning of RME systems occur, as species tend to have behavioral variations (foraging and diving) in different locations. The search for local research in the region of the project should also be considered, so to obtain behavioral data on the species to be applied in the collision risk models.

4.4 Marine reptiles

The Reptilia class has some marine species of the orders Squamata, Crocodylia and Testudines. In Brazil, marine reptiles are represented by 5 of the 7 species of marine turtles (Table 4) existing in the world (Sforza *et al.*, 2017). Belonging to the Testudines order, sea turtles use estuaries and/or oceans in their life cycle (Santos, 2021b). Sea turtles have great ecological importance, due to the cycling of energy and nutrients between different environments, in the control of the species they feed on and as a food source for crustaceans, birds, fish and mammals, although their predators are more restricted in the adult phase (Bjorndal, 1997).

Most of the world's sea turtles (*Caretta caretta*, *Chelonia mydas*, *Dermochelys coriacea*, *Eretmochelys imbricata*, *Lepidochelys olivacea*, *Natator depressus* and *Lepidochelys kempi*) are threatened with extinction, except for *Natator depressus* (Salvarani *et al.*, 2013). The decline of populations is associated with human activities on their habitat, such as incidental capture through the use of different fishing gears and pollution by solid waste, which can hinder female access to the spawning site (compromising reproductive success) and become food (Mascarenhas *et al.*, 2008), and climate change, due to the role of temperature in determining the sex of embryos.

A 2°C increase in sand temperature can lead to the feminization of the entire population (Salvarani *et al.*, 2013).

The life cycle of sea turtles is long and has a wide geographic distribution between feeding and reproduction areas, in a marine environment, and spawning sites, in a terrestrial environment. The sexual maturation of sea turtles varies between 10 and 50 years, depending on the species. For example, the maturation of *Chelonia mydas* can range between 25 and 50 years (Sforza *et al.*, 2017). These characteristics (late maturation, long life cycle and migratory behavior) imply a slow population replacement capacity which, added to anthropic actions, make sea turtles vulnerable species and, therefore, the target of various protection programs and projects. In Brazil, several federal, state and municipal marine and coastal protection areas were created to protect these species, such as the National Marine Park of Fernando de Noronha-PE and the Biological Reserves of Atol das Rocas-RN, of Santa Isabel-SE, and Train-ES (Sforza *et al.*, 2017).

Based on the above, sea turtles are vulnerable to marine developments and, therefore, were included in this list of priority species for monitoring RME systems. Even though there are no studies that monitor the interaction of these animals with EMR devices in Copping *et al.* (2020). This fact agrees with Sforza *et al.* (2017), who developed a guide with information on areas of relevance for the conservation of turtles, in order to guide entrepreneurs, environmental agencies, consultants and researchers involved in the environmental licensing process in these areas. The publication attests the potential impacts of the implementation and operation of the main types of enterprise, with an indication of mitigation and monitoring measures. However, marine energy projects were not analyzed by Sforza *et al.* (2017), but due to damage caused by other

Table 4. Species of sea turtles from Brazil (Source: ICMBio, 2018).

Family	Species	Common name	Category of extinction risk / Geographical distribution in Brazil
Cheloniidae	<i>Caretta caretta</i>	Loggerhead turtle	Endangered (EN). Occurrence of individuals between Pará and Rio Grande do Sul, in coastal or oceanic areas. Priority spawning areas: north coast of Rio de Janeiro, Espírito Santo, north of Bahia and Sergipe.
Cheloniidae	<i>Chelonia mydas</i>	Green sea turtle	Vulnerable (VU). They are registered throughout the Brazilian coast and show more coastal habits. Priority spawning areas: Ilha da Trindade (ES), Atol das Rocas (RN) and Fernando de Noronha (PE).
Cheloniidae	<i>Eretmochelys imbricata</i>	Hawksbill turtle	Critically endangered (CR). Occurrence throughout the Brazilian coast. Priority spawning areas: northern Bahia and the state of Sergipe; and south of Rio Grande do Norte.
Cheloniidae	<i>Lepidochelys olivacea</i>	Olive ridley turtle	Endangered (EN). Occurrence records throughout the Brazilian coast. Priority spawning areas: north of Bahia to the south coast of Alagoas.
Dermochelyidae	<i>Dermochelys coriacea</i>	Leatherback turtle	Critically Endangered (CR). Occurrence records throughout the Brazilian coast. Priority spawning area: north coast of Espírito Santo.

types of projects (collision with tourist or industrial vessels, with rocky blocks in the construction of breakwaters and rockfall in coastal works, and entanglement by garbage, which make them more susceptible to collision with vessels), sea turtles must be included in research on the risk of collision with RME systems in what concerns the following behavior patterns: (1) evasion or attraction, (2) migration from preferred locations, and (3) vertical distribution in the water column due to the flow generated by turbines.

5. CONCLUSIONS

The pressing need to reduce greenhouse gas emissions to slow global warming is the driving force behind the development of the renewable energy sector. Brazil's potential to develop marine renewable energy systems touches upon the discussion about the environmental impacts of these technologies on ecosystems. The risk of collision of marine animals such as mammals, fish and birds is a factor of concern for the environmental monitoring of international RME projects.

The surveys evaluated did not record the occurrence of collisions with marine animals, which does not mean that they did not occur, but that they may not have been registered, due to the limitation of implemented projects and the significant challenges of monitoring. Furthermore, some studies have great data uncertainty. These factors allow gaps in knowledge of RME collision risk.

The integration of research from the fields of engineering, technology and biology is a solution, both for improving the understanding of the risks of collision of marine animals and for reducing this risk. Improving the knowledge of the risk of collision of marine animals can reduce barriers in the consent of RME projects, by adopting conservative levels of risk of collision, without considering the parameter of evasion of animals, preventing the development of the marine renewable energy sector in the world. In the review, no studies were identified with sea turtles, an animal that is the target of several environmental conservation projects in Brazil and with a strong influence on environmental conditions. Only four species, two of fish (*Lamna nasus* and *Squalus acanthias*) and two of birds (*Sterna hirundo* and *Sterna paradisaea*) occurring in the country were found in the analyzed studies, revealing the little knowledge of the interaction of Brazilian marine fauna with RME devices.

The need for future studies, even on prototypes or individual equipment, is essential to assess the potential risks of

collision and other impacts of marine animal portrayed in this article (underwater noise, electromagnetic fields, mooring entanglement and changes in habitat). Therefore, fostering the development of these RME systems in the country is essential. Towards a future with zero GHG emissions, this article provides information for entrepreneurs, researchers and environmental agencies involved in environmental licensing, by indicating priority species for monitoring the interaction and risk of collision with RME devices in Brazil, with information on geographic distribution, habitats and extinction risk category or exploitation status necessary for environmental impact studies.

CONTRIBUTIONS

Catarina Luiza Damasceno Lima da Silva: Study design, methodology development, data collection and analysis, and manuscript writing.

Luís Felipe Umbelino dos Santos: Conception of the study, review of data analysis, suggestions and study advisorship, writing of the manuscript.

Marcos Antônio Cruz Moreira: Conception of the study, review of data analysis, suggestions and study advisorship, writing of the manuscript.

Pedro Henrique Castello Branco Dágola: Data analysis, work suggestions, writing and translation of the manuscript.

All authors contributed to the writing (reviewing and editing) of the manuscript.

REFERENCES

- Ahmadian, R.; Falconer, R.; Bockelmann-Evans, B. (2012) - Far-field modelling of the hydro-environmental impact of tidal stream turbines. *Renewable Energy*, 38 (1): 107-116. DOI: 10.1016/j.renene.2011.07.005.
- Band, B. (2014) - Detailed Collision Risk Assessment: Marine Mammals, Basking Shark, and Diving Birds (Report No. REP 443-04-01 20141120). 233p. European Marine Energy Centre, Annex 3, Stromness, Orkney. <https://tethys.pnnl.gov/publications/emec-fall-warness-test-site-environmental-appraisal>.
- Barros, S. R.; Wasserman, J. C.; Lima, G. B. (2010) - Risco Ambiental na zona costeira: uma proposta interdisciplinar de gestão participativa para os Planos de Controle a Emergências dos portos brasileiros. *Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 10 (2): 217-227. DOI: 10.5894 / rgci173.
- Bevelhimer, M.; Scherelis, C.; Colby, J.; Adonizio, M. A. (2017) - Hydroacoustic Assessment of Behavioral Responses by Fish Passing

- Near an Operating Tidal Turbine in the East River, New York. *Transactions of the American Fisheries Society*, 146 (5): 1028-1042. DOI: 10.1080/00028487.2017.1339637.
- Benjamins, S.; van Geel, N.; Hastie, G.; Elliott, J.; Wilson, B. (2017) - Harbour porpoise distribution can vary at small spatiotemporal scales in energetic habitats. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 141: 191-202. DOI: 10.1016/j.dsr2.2016.07.002.
- Bjorndal, K. A. (1997) - Foraging ecology and nutrition of sea turtles. In: Lutz, P. L.; Musick, J. A. (eds.), *The biology of sea turtles*, pp.199-231, CRC Press, Boca Raton, FL, EUA. ISBN: 0849384222. Disponível on-line em: http://www.seaturtle.org/library/BjorndalKA_1997_InThebiologyofseaturtles_p199-231.pdf.
- Boehlert, G.; Gill, A. (2010) - Environmental and ecological effects of ocean renewable energy development: A current synthesis. *Oceanography* 23 (2): 68-81. DOI: 10.5670/oceanog.2010.46.
- Branco, J. O. (2004) - Aves marinhas das Ilhas de Santa Catarina. In: Branco, J. O. (org.), *Aves marinhas e insulares brasileiras: bioecologia e conservação*, pp.15-36, UNIVALI, Itajaí, SC, Brasil. ISBN: 8586447919. Disponível on-line em: <http://www.avesmarinhas.com.br/Cap%C3%ADtulo%201.pdf>.
- Ceará (2021) - Complexo do Pecém e Eco Wave Power assinam Memorando de Entendimento para implantação de Usina de Ondas. Governo do Estado do Ceará, Brasil. Disponível online em: <https://www.ceara.gov.br/2021/06/01/complexo-do-pecem-e-eco-wave-power-assinam-memorando-de-entendimento-para-implantacao-de-usina-de-ondas/>. Acesso em: 10 set. 2021.
- Cooper, E.; Brocklehurst, J.; Smith, K. (2020) - ENFAIT - Enabling Future Arrays in Tidal Year 3 Environmental Monitoring Report. 23p., Nova Innovation Ltd., Edinburgh, Scotland. <https://www.enfait.eu/wp-content/uploads/2020/10/EnFAIT-EU-0057-Y3-Environmental-Monitoring-Report-v1.0.pdf>.
- Copping, A. E., Battey, H.; Brown-Saracino, J.; Massaua, M.; Smith, C. (2014) - An international assessment of the environmental effects of marine energy development. *Ocean and coastal management*, 99: 3-13. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2014.04.002.
- Copping, A. E.; Grear, M. E. (2018) - Applying a simple model for estimating the likelihood of collision of marine mammals with tidal turbines. *International Marine Energy Journal*, 1 (1): 27-33. DOI: 10.36688/imej.1.27-33.
- Copping, A. E.; Hemery, L.G. (2020) - OES-Environmental 2020 State of the Science Report: Environmental Effects of Marine Renewable Energy Development Around the World. Ocean Energy Systems (OES), Richland, WA, U.S. <https://doi.org/10.2172/1632878>.
- Dias-Neto, J.; Dias, J. de F. O. (2015) - O uso da biodiversidade aquática no Brasil: uma avaliação com foco na pesca, 288p., Ibmama, Brasília, DF, Brasil.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética (s/d) (2020a) - Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020. 256p., Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética (s/d) (2020b) - Balanço Energético Nacional 2020: Ano base 2019. 292p., Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética (s/d) (2021) - Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2021- Ano base 2020. 73p., Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>.
- Fairley, I.; Karunaratna, H.; Chatzirodou, A. (2017) - Modelling the Effects of Marine Energy Extraction on Non-Cohesive Sediment Transport and Morphological Change in the Pentland Firth and Orkney Waters. Report by Swansea University for Marine Scotland Science, Swansea, UK. <https://data.marine.gov.scot/sites/default/files/SMFS%200807.pdf>.
- Ferreira, R. M.; Estefen, S. F. (2009) - Alternative concept for tidal power plant with reservoir restrictions, *Renewable Energy*, 34: 1151-1157. DOI: 10.1016/j.renene.2008.08.014.
- Florêncio, M.; Trigo, F. B. M. (2020) - Pesquisas e projetos desenvolvidos no Brasil para o aproveitamento do potencial de geração de energia elétrica com ondas e marés. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar - Anais CBENS 2020 (ISBN: 978-65-993338-0-4), Fortaleza, CE, Brasil. <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/972>.
- Fraser, S.; Williamson, B. J.; Nikora, V.; Scott, B. E. (2018) - Fish distributions in a tidal channel indicate the behavioural impact of a marine renewable energy installation. *Energy Reports*, 4: 65-69. DOI:10.1016/j.egy.2018.01.008.
- Froese, R.; D. Pauly. (Eds) (2021) - FishBase (06/2021) [banco de dados]. Disponível em: www.fishbase.org.
- Furness, R. W.; Wade, H. M.; Robbins, A. M. C.; Masden, E. A. (2012) - Assessing the sensitivity of seabird populations to adverse effects from tidal stream turbines and wave energy devices. *ICES Journal of Marine Science*, 69 (8): 1466-1479. DOI: 10.1093/icesjms/fss131.
- Grippe, M.; Shen, H.; Zydlewski, G.; Rao, S.; Goodwin, A. (2017) - Behavioral Responses of Fish to a Current-Based Hydrokinetic Turbine Under Multiple Operational Conditions: Final Report (ANL/EVS-17/6). 42p., Report by Argonne National Laboratory for U.S. Department of Energy, Illinois, U.S. In: <https://publications.anl.gov/anlpubs/2017/02/129701.pdf>.

- Halvorsen, M. B.; Casper, B. M.; Woodley, C. M.; Carlson, T. J.; Popper, A. N. (2012) - Threshold for onset of injury in Chinook salmon from exposure to impulsive pile driving sounds. *Plos One*, 7 (6): e38968. DOI: 10.1371/journal.pone.0038968.
- Hastie, G. D.; Russell, D. J. F.; Benjamins, S.; Moss, S.; Wilson, B.; Thompson, D. (2016) - Dynamic habitat corridors for marine predators; intensive use of a coastal channel by harbour seals is modulated by tidal currents. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 70 (12): 2161-2174. DOI:10.1007/s00265-016-2219-7.
- Holdman, A. K.; Haxel, J. H.; Klinck, H.; Torres, L. G. (2019) - Acoustic monitoring reveals the times and tides of harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) distribution off central Oregon, U.S.A. *Marine Mammal Science*, 35 (1): 164-186. DOI:10.1111/mms.12537.
- ICMbio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (2018) - *Livro Vermelho da Fauna Brasileira Ameaçada de Extinção*. 4162p., Ministério do Meio Ambiente, Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, Brasília, DF, Brasil.
- IEA - International Energy Agency (s/d) (2020) - Mix de geração de eletricidade global, 2010-2020. International Energy Agency, Paris, France. In: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electricity-generation-mix-2010-2020>.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) - Summary for Policymakers. In: Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A.; Connors, S. L.; Péan, C.; Berger, S.; Caud, N.; Chen, Y.; Goldfarb, L.; Gomis, M. I.; Huang, M.; Leitzell, K.; Lonnoy, E.; Matthews, J. B. R.; Maycock, T. K.; Waterfield, T.; Yelekçi, O.; Yu, R. and Zhou, B. (eds.) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 3-32. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. DOI:10.1017/9781009157896.001.
- IRENA - International Renewable Energy Agency (s/d) (2020) - Innovation outlook: Ocean energy technologies. 112p., International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, United Arab Emirates. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Innovation_Outlook_Ocean_Energy_2020.pdf.
- IRENA - International Renewable Energy Agency (s/d) (2021) - World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway. 312p., International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, United Arab Emirates. <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook>.
- IUCN - International Union for Conservation of Nature (2001). Red List Categories and Criteria: Version 3.1. 30p., IUCN Species Survival Commission, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/RL-2001-001.pdf>.
- Jackson, A. C. (2014) - Riding the waves: use of the Pelamis device by seabirds. Proceedings of the 2nd International Conference on Environmental Interactions of Marine Renewable Energy Technologies (EIMR) 2014, Stomoway, Isle of Lewis, Outer Hebrides, Scotland. Disponível on-line em <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/jacksonetal2014.pdf>.
- Jones, C.; Magalen, J.; Roberts, J. (2014) - Wave Energy Converter (WEC) Array Effects on Wave, Current, and Sediment Circulation: Monterey Bay, CA (Report No. SAND2014-17401). 39p., Report by Sandia National Laboratories for U.S. Department of Energy, Califórnia, U.S. <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Jones-et-al-2014.pdf>.
- Khaled, F.; Guillou, S.; Hadri, F.; Méar, Y. (2019) - Numerical modelling of the effect of the hydro-kinetic turbines on the transport of sediments - Application to the Rhone site. *MATEC Web Conference*, 261: 05003. DOI: 10.1051/mateconf/201926105003.
- Keenan, G.; Sparling, C.; Williams, H.; Fortune, F. (2011) - Sea Gen Environmental Monitoring Programme Final Report. 81p., Report by Royal Haskoning for Marine Current Turbines (MCT), Edinburgh, U.K. https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Final_EMP_report_SeaGen.pdf.
- Kennedy M.; Spencer H. G. (2014) - Classification of the cormorants of the world. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 79: 249-257. DOI: 10.1016/j.ympev.2014.06.020.
- Langton, R.; Davies, I. M.; Scott, B. E. (2011) - Seabird conservation and tidal stream and wave power generation: Information needs for predicting and managing potential impacts. *Marine Policy*, 35 (5): 623-630. DOI: 10.1016/j.marpol.2011.02.002.
- Lieber, L.; Nimmo-Smith, W. A. M.; Waggitt, J. J.; Kregting, L. (2018) - Fine-scale hydrodynamic metrics underlying predator occupancy patterns in tidal stream environments. *Ecological Indicators*, 94: 397-408. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.06.071.
- Lieber, L.; Nimmo-Smith, W. A. M.; Waggitt, J. J.; Kregting, L. (2019) - Localised anthropogenic wake generates a predictable foraging hotspot for top predators. *Communications Biology*, 2 (1): 123. DOI: 10.1038/s42003-019-0364-z.
- Macaulay, J.; Malinka, C.; Coram, A.; Gordon, J.; Northridge, S. (2015) - The density and behaviour of marine mammals in tidal rapids (Report No. MR 7.1.2). 53p., Sea Mammal Research Unit, University of St. Andrews, St. Andrews, Scotland. https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/MR7-1-2_porpoise_in_tidal_rapids_VF1.pdf.
- Macaulay, J.; Gordon, J.; Gillespie, D.; Malinka, C.; Northridge, S. (2017) - Passive acoustic methods for fine-scale tracking of harbour porpoises in tidal rapids. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141 (2): 1120-1132. DOI: 10.1121/1.4976077.
- Matzner, S.; Trostle, C.; Staines, G.; Hull, R.; Avila, A.; Harker-Klimes, G. (2017) - Triton: Igiugig Fish Video Analysis (PNNL-26576). 60p., Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, U.S. <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Triton-Igiugig-Report.pdf>.
- Mascarenhas, R.; Batista, C. P.; Moura, I. F.; Caldas, A. R.; da Costa Neto, J. M.; Vasconcelos, M. Q.; Rosa, S. S. et al. (2008) - Lixo marinho em área

- de reprodução de tartarugas marinhas no Estado da Paraíba (Nordeste do Brasil). *Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 8 (2): 221-231. DOI: 10.5894/rgci138.
- MMA- Ministério do Meio Ambiente (2008) - Macrodiagnóstico da Zona Costeira e Marinha do Brasil. 242p., Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF, Brasil.
- Monteiro-Filho, E. L. A.; Oliveira, L. V.; Monteiro, K. D. K. A.; Filla, G. F.; Quito, L.; Godoy, D. F. (2013) - Guia Ilustrado de Mamíferos Marinhos do Brasil. 106p., Instituto de Pesquisa Cananéia (IPEC), São Paulo, Brasil.
- Nedwell, J.; Brooker, A. (2008) - Measurement and Assessment of Background Underwater Noise and its Comparison with Noise from Pin Pile Drilling Operations During Installation of the SeaGen Tidal Turbine Device, Strangford Lough (Report No. 724R0120). 37p., Subacoustech Ltd., County of Down, Northern Ireland. <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Nedwell-Brooker-2008.pdf>.
- Piacentini, Patricia. (2016) - Faltam estratégias no Brasil para gerar energia das marés. *Ciência e Cultura*, 68 (3): 11-13. DOI: 10.21800/2317-66602016000300005.
- Piacentini, V. D. Q.; Aleixo, A.; Agne, C. E.; Maurício, G. N.; Pacheco, J. F.; Bravo, G. A.; Cesari, E. (2015) - Lista comentada das aves do Brasil pelo Comitê Brasileiro de Registros Ornitológicos. *Revista Brasileira de Ornitologia* (ISSN 2178-7875), 23 (2): 91-298. Disponível on-line em http://www.revbrasilornitol.com.br/BJO/article/view/1263/pdf_905.
- Salvarani, P. I.; de Menezes Fernandes, A. C.; Morgado, F. M. R. (2013) - Percepção ambiental de estudantes na conservação das tartarugas marinhas em Aveiro, Portugal. *Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 13 (2): 137-144. DOI: 10.5894/rgci334.
- Santos, M. C. O. (2021a) - Mamíferos marinhos. In: Harari, J. (org.), *Noções de Oceanografia*, pp.627-646. Instituto Oceanográfico, São Paulo, Brasil. <https://www.inserver.com.br/usp/livros/nocoes-oceanografia.pdf>.
- Santos, M. C. O. (2021b) - Tartarugas marinhas. In: Harari, J. (org.), *Noções de Oceanografia*, pp.573-597. Instituto Oceanográfico, São Paulo, Brasil. <https://www.inserver.com.br/usp/livros/nocoes-oceanografia.pdf>.
- Sforza, R.; Marcondes, A. C. J.; Pizetta, G. T. (2017) - Guia de Licenciamento Tartarugas Marinhas-Diretrizes para avaliação e mitigação de impactos de empreendimentos costeiros e marinhos. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, Brasília, DF, Brasil. https://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/comunicacao/publicacoes/publicacoes-diversas/guia_licenciamento_tartarugas_marinhas_v8.pdf.
- Scottish Natural Heritage (s/d) (2016) - Assessing collision risk between underwater turbines and marine wildlife. 92p., Scottish Natural Heritage, Inverness, Scotland. In: <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/scottish-natural-heritage-report.pdf>.
- Shen, H.; Zydlewski, G. B.; Viehman, H. A.; Staines, G. (2016) - Estimating the probability of fish encountering a marine hydrokinetic device. *Renewable Energy*, 97: 746-756. DOI: 10.1016/j.renene.2016.06.026.
- Silveira, F. F. (2020) - Fauna digital do Rio Grande do Sul [banco de dados]. Disponível em <http://ufrgs.br/faunadigitalrs/lamna-nasutubarao-sardo/>.
- Sparling, C.E.; Seitz, A.C.; Masden, E.; Smith, K. (2020) - Collision Risk for Animals around Turbines. In A.E. Copping; L.G. Hemery (Eds.), *OES-Environmental 2020 State of the Science Report: Environmental Effects of Marine Renewable Energy Development Around the World*, pp.28-65, Ocean Energy Systems (OES), Richland, WA, U.S. <https://doi.org/10.2172/1632881>.
- Spellman, F. R. (2014) - Environmental impacts of renewable energy. 470p., CRC press, Boca Raton, U.S. <https://doi.org/10.1201/b17744>
- Staines, G.; Zydlewski, G.; Viehman, H. (2019) - Changes in Relative Fish Density Around a Deployed Tidal Turbine during on-Water Activities. *Sustainability*, 11 (22): 6262. DOI: 10.3390/su11226262.
- Tolmasquim, M. T. (2016) - Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. 452p., Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, Brasil. ISBN 978-85-60025-06-0.
- UNCLOS - United Nations Convention of the Law of the Sea (s/d) (2012) - UNCLOS at 30. 15p., United Nations, New York, USA. In: www.un.org/depts/los/convention_agreements/pamphlet_unclos_at_30.pdf.
- Viehman, H. A.; Zydlewski, G. B. (2017) - Multi-scale temporal patterns in fish presence in a high-velocity tidal channel. *PLOS ONE*, 12 (5): e0176405. DOI: 10.1371/journal.pone.0176405.
- Viehman, H.; Boucher, T.; Redden, A. (2018) - Winter and summer differences in probability of fish encounter (spatial overlap) with MHK devices. *International Marine Energy Journal*, 1(1): 9-18. DOI: 10.36688/imej.1.9-18 .
- Waggitt, J. J.; Cazenave, P. W.; Torres, R.; Williamson, B. J.; Scott, B. E. (2016) - Quantifying pursuit-diving seabirds' associations with fine-scale physical features in tidal stream environments. *Journal of Applied Ecology*, 53 (6): 1653-1666. DOI: 10.1111/1365-2664.12646
- Williamson, B.; Fraser, S.; Williamson, L.; Nikora, V.; Scott, B. (2019) - Predictable changes in fish school characteristics due to a tidal turbine support structure. *Renewable Energy*, 141: 1092-1102. DOI: 10.1016/j.renene.2019.04.065.
- Wilson, B.; Batty, R.; Daunt, F.; Carter, C. (2007) - Collision Risks Between Marine Renewable Energy Devices and Mammals, Fish and Diving Birds. 110p., Scottish Association for Marine Science, Oban, Scotland. <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Wilson-et-al-2007.pdf>.

- Whitton, T. A.; Jackson, S. E.; Hiddink, J. G.; Scoulding, B.; Bowers, D.; Powell, B.; D'Urban Jackson, T.; Gimenez, L.; Davies, A. G. (2020) - Vertical migrations of fish schools determine overlap with a mobile tidal stream marine renewable energy device. *Journal of Applied Ecology*, 57 (4): 729-741. DOI: 10.1111/1365-2664.13582.
- Xodus Group (s/d) (2016) - Brims Tidal Array Collision Risk Modelling - Atlantic Salmon (Report No. A-100242-S02-TECH-001). 11p., Xodus Group, London, UK. In: <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Brims-Tidal-Array-Collision-Modeling-2016.pdf>.
- Yoshida, T.; Zhou, J.; Park, S.; Muto, H.; Kitazawa, D. (2020) - Use of a model turbine to investigate the high striking risk of fish with tidal and oceanic current turbine blades under slow rotational speed. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37: 100634. DOI: 10.1016/j.seta.2020.100634.
- Zhang, J.; Kitazawa, D.; Taya, S.; Mizukami, Y. (2017) - Impact assessment of marine current turbines on fish behavior using an experimental approach based on the similarity law. *Journal of Marine Science and Technology*, 22 (2): 219-230. DOI: 10.1007/s00773-016-0405-y.

ARTIGO CIENTÍFICO 3

PROJETO DE GERADOR LINEAR COM NÚCLEO DE AR PARA CONVERSORES DE ENERGIA DE ONDAS

Pedro Henrique Castello Branco Dágola e Marcos Antônio Cruz Moreira

Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
Fluminense - Campus Macaé

e-mail: pedro.dagola@iff.edu.br, macruz@iff.edu.br

I. Introdução

O relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), intitulado “Mudança do Cima 2021: A Base Científica” de 2021, informa que a temperatura mundial irá atingir ou exceder 1,5 °C entre 2021 e 2040. Na última Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP 27), realizada em 2022, foi reafirmado o objetivo de conter o aquecimento global em 1,5°C, além da manutenção da necessidade de medidas e métodos para realizar profundos cortes nas emissões dos gases do efeito estufa. Nesse sentido, segundo IRENA (2021), a participação da energia renovável no mundo deve crescer de 14% em 2018 para 74% em 2050.

Niknafs (2022a) relata que o aumento das preocupações ambientais e climáticas tem impulsionado consideráveis tentativas de desenvolvimento das fontes de energia renováveis para redução das emissões de carbono e gases do efeito estufa. A autora destaca que a energia das ondas do mar pode ser uma das principais fontes de geração de eletricidade. A disponibilidade de geração de energia oceânica pode alcançar o intervalo de 45.000 a 130.000 terawatts-hora (TWh) por ano, o que representa mais de duas vezes a demanda global por eletricidade (IRENA, 2020). A energia das ondas do mar possui relevantes vantagens, tais como: grande densidade energética, alta disponibilidade de energia temporal, além do diferencial de ter maior previsibilidade em comparação a outras fontes de energias renováveis (NIKNAFS, 2022b).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em 2019, a contribuição da produção de energia marinha para a matriz elétrica mundial era muito tímida, representando apenas 0,1% (EPE, 2020). Esta produção está ganhando cada vez mais atenção como um potencial contribuinte para atender a crescente demanda global de energia, mitigar as mudanças climáticas e contribuir para uma matriz global diversificada (FAIAD, 2018).

O método de geração de energia a partir das ondas é realizado, principalmente, pelo movimento de um dispositivo flutuante na superfície conhecido como WEC – *Wave Energy Converter* (conversor de energia de ondas) (FAIAD, 2018). Atualmente, a maioria dos WECs instalados no mundo utiliza tecnologias com conexões mecânicas complexas na parte de extração da força e a energia é utilizada para acionar geradores rotativos tradicionais. Os complexos sistemas mecânicos e hidráulicos nesses WECs têm a função de converter o movimento lento, linear e o curso curto das ondas para um movimento rotativo e de alta velocidade. A utilização de geradores lineares simplifica o sistema de extração de força devido à possibilidade de remover toda a interface mecânica de caixa de engrenagens, o sistema hidráulico e/ou o sistema pneumático por um WEC de acionamento direto (*Direct Drive - WECs*). O funcionamento básico de um sistema de DD-WEC acontece com o acoplamento direto do translador do gerador linear ao flutuador (FAIZ, 2010; WAHYUDIE, 2017; SOUSOUNIS, 2017).

Apesar das vantagens mecânicas, os geradores lineares também possuem algumas desvantagens apontadas por Faiad (2018). O autor cita que, normalmente, os geradores lineares têm grandes dimensões físicas; força de atração alta devido ao volume de materiais magnéticos e eficiência reduzida mediante à baixa velocidade. Diversas topologias de WECs e de geradores lineares têm sido pesquisadas para reduzir essas dificuldades e tornar os WECs uma tecnologia promissora e comercialmente madura.

Os princípios de funcionamento de máquinas rotativas e lineares são idênticos. A diferença é com relação ao plano de movimento que em uma máquina linear é a circunferência achatada de suas contrapartes rotativas, como mostrado na Figura 1.

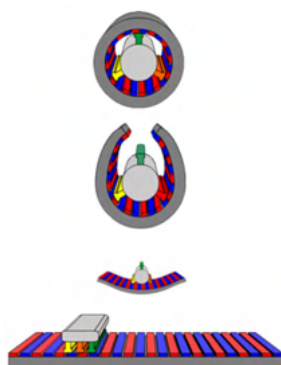


Figura 1: Linearização de um gerador rotativo de ímã permanente.
Fonte: <httpscommons.wikimedia.org/windex.phpcurid=23665274>.

A concepção básica de um gerador linear está em sua parte móvel, chamada de translador, no qual, normalmente, os ímãs são fixados com alternância de polaridade. O translador é diretamente acoplado à boia de elevação, configurando um DD-WEC. A parte fixa do gerador é chamada de estator que, comumente, contém os enrolamentos montados em uma estrutura estacionária fixada ao fundo do mar ou conectada a uma grande massa de inércia (POLINDER, 2005; FAIZ, 2017).

Existem algumas categorias para a topologia construtiva do gerador linear de ímã permanente que promovem um *tradeoff* entre as diversas variáveis de projeto. Elas podem ser usadas para comparar outros tipos de geradores, além dos lineares. A seguir, essas categorias são analisadas.

A) Estrutura Plana x Estrutura Tubular:

A estrutura de um gerador linear pode ter a configuração tubular (Figura 2a) ou planar de um, dois ou quatro lados. Na Figura 2b está representada uma estrutura de dois lados com os ímãs permanentes fixados no translador e os enrolamentos, no estator.

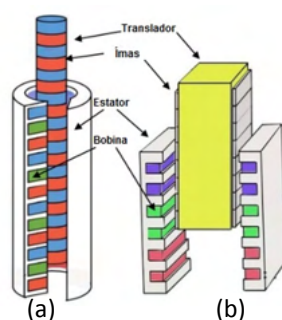


Figura 2: Gerador Linear de Ímã Permanente Tubular (a) e Planar de dois lados (b).
Fonte: Azhari (2017) adaptado pelo autor.

O diferencial na fabricação do gerador planar é a facilidade construtiva e a possibilidade de ser projetado com um número diferente de lados. Os méritos deste tipo de gerador incluem o custo de fabricação reduzido, a simplicidade de instalação e manutenção dos rolamentos. Sua topologia tem o objetivo de equilibrar as forças de atração magnéticas entre o translador e o estator. Na Figura 3 está representado um gerador de dois lados com os enrolamentos fixados no translador e os ímãs no estator.

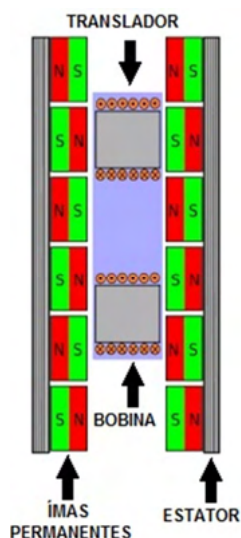


Figura 3: Gerador Linear de Ímã Permanente Planar de dois lados.
Fonte: Elaboração Própria.

As tolerâncias de fabricação dos suportes e rolamentos nessa topologia de gerador devem ser precisamente projetadas, pois podem causar uma distância de entreferro desbalanceada em um dos lados. Esse desequilíbrio faz com que ainda exista força de atração entre o translador e o estator, prejudicando o funcionamento e o rendimento do gerador. Conforme aumentamos o número de lados do estator, o desempenho do gerador é aprimorado até o limite de se tornar uma topologia tubular. A principal dificuldade dessa estrutura é a complexidade dos encaixes das laminações paralelas ao eixo do translador, o que gera um expressivo aumento no custo de fabricação (FAIAD, 2018).

Em contrapartida, devido à forma fechada da estrutura tubular e à geometria cilíndrica, essa configuração tem menor fuga de fluxo magnético em comparação com a planar de um, dois ou quatro lados. No entanto, o resultado das tensões induzidas para ambas as topologias é semelhante, com a diferença de que o projeto com a topologia planar tem dimensões maiores que geram maiores perdas no ferro e cobre (WAHYUDIE, 2018).

B) Estator x Translador de Ímã Permanente:

A montagem do ímã permanente no translador tem um nível de complexidade elevada, alta instabilidade mecânica e risco de desmagnetização. Uma solução proposta para esses problemas consiste na fixação dos ímãs permanentes no estator, e não na armadura das bobinas. Desta forma, o translador é somente composto por material ferromagnético. Esta configuração possibilita que todos os ímãs sejam utilizados de forma eficiente, sendo necessária menor massa de ímã (FARROK, 2017).

C) Presença x Ausência de Ranhuras:

O gerador linear planar de dois lados de ranhuras pode apresentar dois tipos de configuração. Na Figura 4a é evidenciada uma estrutura de duas armaduras externas com ranhuras (estator) e uma excitação interna com os ímãs permanentes (translador). Já na Figura 4b é apresentada uma armadura interna com ranhuras e dois sistemas de excitação externa com ímãs permanentes.

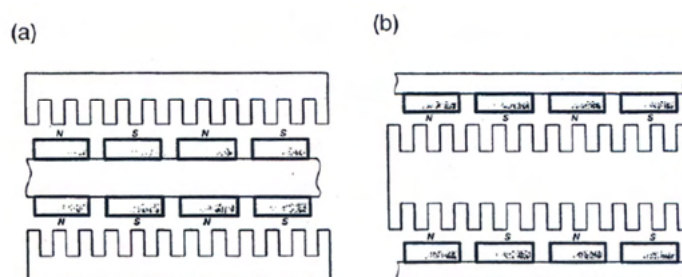


Figura 4: Gerador Linear planar de dois lados: a - com dois sistemas de armadura externa com ranhuras e b – com um sistema de armadura interna com ranhuras.

Fonte: Gieras (1999).

Nos geradores sem ranhuras, o enrolamento é distribuído uniformemente em um núcleo de armadura liso ou sem núcleo de armadura (núcleo de ar). Eles não têm força de retenção e fornecem menor variação de torque, além disso, podem atingir maior eficiência que os geradores com ranhuras, se operados em frequências mais elevadas de entrada. Em contrapartida, a corrente de entrada é maior e as reatâncias síncronas podem diminuir para um valor baixo indesejado devido à ausência de ranhuras. Na Figura 5a é evidenciado um gerador linear planar de um lado sem ranhuras, com núcleo de armadura e, na Figura 5b, um gerador linear planar de dois lados, com bobinas no translador e núcleo de ar (GIERAS, 1999).

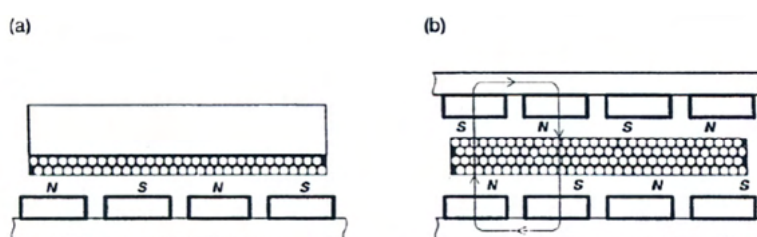


Figura 5: Gerador Linear Planar sem Fendas: (a) um lado com núcleo de armadura, (b) dois lados com núcleo de ar. Fonte: Gieras (1999).

D) Núcleo de ferro x Núcleo de ar:

O gerador com núcleo de ferro tem maior amplitude na tensão induzida gerada, deste modo, a potência de saída também é maior se comparada aos geradores com núcleo de ar. Isso ocorre devido à baixa relutância do núcleo de ferro que permite a passagem maior de fluxo de campo magnético por dentro do núcleo. No gerador com núcleo de ar, o fluxo magnético varia menos que no núcleo de ferro. Além disso, ele tem a força consideravelmente baixa no fechamento no espaçamento do entreferro, gerando uma carga menor na estrutura de suporte do gerador (MUELLER, 2005).

E) Geradores de Fluxo Transversal x Longitudinal

Nos geradores de fluxo transversal de ímã permanente, as bobinas do estator são posicionadas de forma transversal em relação ao comprimento do eixo do translador, enquanto nos geradores de fluxo longitudinal, o fluxo magnético gerado pelos ímãs é alinhado longitudinalmente, ou seja, paralelamente ao eixo do translador. Ambas as topologias podem ter os ímãs permanentes na superfície ou enterradas no estator ou translador. A topologia de fluxo transversal foi desenvolvida como uma configuração vantajosa para geradores lineares em sistemas de WEC, destacando-se pela alta eficiência em baixas velocidades do translador. A separação do carregamento elétrico e magnético desta configuração promove o desacoplamento entre as fases e, conseqüentemente, permite um maior número de polos. Além disso, essa configuração utiliza uma menor quantidade de ímãs permanentes, resultando em uma massa final menor, menor tensão de

cisalhamento e estatores mais longos em comparação com a topologia de fluxo longitudinal (DANIELSSON, 2007; BANG 2008; ZHU, 2011).

Diante das vantagens supracitadas, os geradores de fluxo transversal são mais recomendados para acionamento direto de conversores de energia de ondas em comparação com os geradores de fluxo longitudinal. No entanto, eles apresentam um fator de potência muito baixo devido ao vazamento do campo magnético, o que requer compensadores de reativos. Além disso, a fabricação desses geradores é mais complexa devido ao caminho tridimensional do fluxo, à alta indutância síncrona e à dificuldade de alcançar a estabilidade na configuração entre estator e translador (DANIELSSON, 2007; BANG 2008; ZHU, 2011). Considerando o exposto acima, o objetivo deste trabalho foi investigar e calcular as variáveis para o projeto de um gerador linear aplicado a conversores de energia de ondas.

II. Desenvolvimento do Cálculo do Gerador e resultados comparados

Este trabalho apresenta uma metodologia de cálculo de um gerador linear com núcleo de ar, de fluxo longitudinal para conversores de energia de ondas. A montagem da planilha de cálculos foi realizada no Programa *R*, software estatístico gratuito e de código aberto, e todo o código é apresentado no Apêndice A. Os cálculos foram norteados, principalmente, pelo trabalho de Wahyudie (2017)¹. O autor desenvolve um gerador linear de 1200W utilizando a topologia planar de dois lados, sem ranhuras, com núcleo de ar, fluxo longitudinal. Neste projeto, as bobinas foram montadas no translador em vez dos ímãs permanentes, pois isso resulta em um peso menor. Essa configuração oferece a possibilidade de forma reversa, com os ímãs permanentes conectados ao translador, que é acoplado à boia do captador de ondas. Além disso, foi utilizado um comprimento de seção de trabalho mais curto da bobina em comparação com o comprimento dos ímãs permanentes. Essa escolha foi motivada por uma restrição de projeto relacionado ao deslocamento máximo.

Ademais, outras fontes consultadas foram Niknafs(2022a), Gieras(1999) e Chapman(2013). O processo de desenvolvimento foi dividido em 6 etapas. As três primeiras consistem nos parâmetros gerais, da bobina e do ímã permanente. Estes são compostos por parâmetros básicos fixados pelo trabalho de Wahyudie (2017) orientados pelas restrições físicas e/ou de projeto, e por parâmetros derivados que foram calculados a partir dos primeiros. As três etapas finais consistem nos cálculos do modelo de relutância, do fluxo magnético e nas variáveis calculadas.

1. Parâmetros Gerais:

a) Parâmetros Básicos:

Inicialmente foram escolhidos os parâmetros básicos do gerador, sendo eles: curso máximo (d_s), número de bobinas (N_c), comprimento ativo (d_a), comprimento da seção de trabalho (d_w), velocidade linear

¹ Artigo intitulado: "Design and testing of a laboratory scale test rig for wave energy converters using a double-sided permanent magnet linear generator", publicado na revista IET Renewable Power Generation, 2017.

máxima (v_1) e número de fases do gerador (m_1). Na Figura 6a é representado um corte no modelo completo do gerador com evidência para a composição das bobinas no translador e dos ímãs no estator, juntamente com a estrutura de aço. Na Figura 6b e 6c, a variável d_a é evidenciada representando o comprimento ativo do gerador que é, ao mesmo tempo, o comprimento da bobina e o comprimento do ímã. A variável d_w é o comprimento da seção do gerador englobando a série de bobinas das 3 fases. A Tabela 1 apresenta uma compilação dos valores definidos no projeto de Wahyudie (2017) para um gerador de 1200 W.

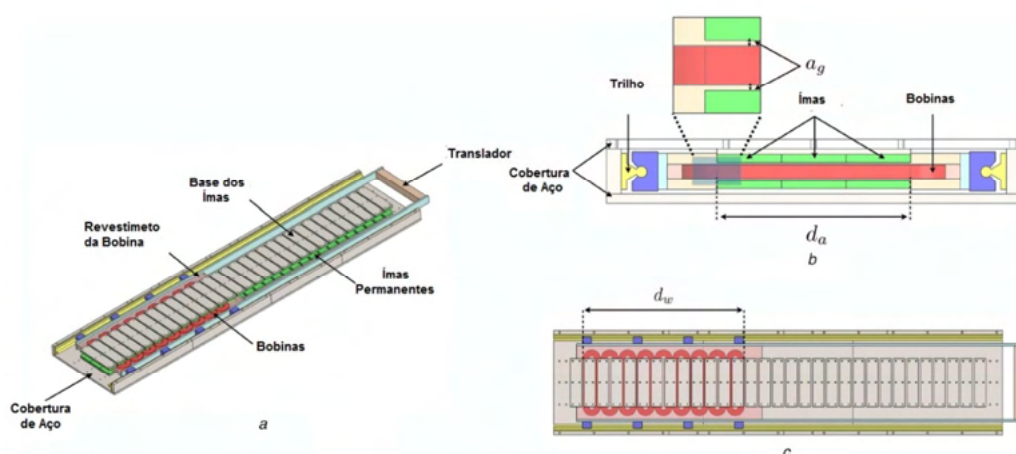


Figura 6: (a) Estrutura do Gerador de dois lados, (b) Vista Superior, (c) Vista Lateral.

Fonte: Wahyudie (2017) adaptado pelo autor.

Tabela 1 – Parâmetros Gerais (Básicos)

Parâmetro	Símbolo	Und.	Valor
Curso Máximo	d_s	m	1
Número de Bobinas	N_c	s/und.	9
Comprimento ativo	d_a	m	0,21
Comprimento da Seção de Trabalho	d_w	m	0,7
Velocidade Linear Máxima	v_1	m/s	1
Número de fases do Gerador	m_1	s/und.	3

*Compilação dos dados apresentados por Wahyudie (2017).

b) Parâmetros Derivados

Os parâmetros derivados calculados a partir da definição estrutural do gerador na etapa anterior foram: número de polos ativos por lado (N_a), passo do polo (τ_p), total de polos por lado (N_p) e frequência

máxima do gerador (f). O valor β utilizado no cálculo de τ_p é uma constante com valor menor que 1 definida com o valor de $\beta = 0,75$. Na Tabela 2 são apresentadas as equações, os valores apresentados por Wahyudie (2017) e a comparação com os cálculos realizados no Programa R.

Tabela 2 – Resultados comparados para os Parâmetros Gerais (Derivados).

Parâmetro	Símbolo	Und.	Equação	Wahyudie (2017)	Resultado Calculado
Número de Pólos Ativos por lado	N_a	s/und.	$N_a = \frac{N_c}{\beta}$	12	12
Passo do Pólo	τ_p	m	$\tau_p = \beta \cdot \frac{d_w}{N_c}$	0,0585	0,0583
Total de Pólos por lado	N_p	s/und.	$N_p = 1 + \left(\frac{d_w + d_s}{\tau_p} \right)$	30	30
*Frequência Máxima do Gerador	f	Hz	$f = \frac{v_l}{2 \cdot \tau_p}$	-	8,6

*Parâmetro calculado tendo como fonte o livro “Linear Synchronous Motors”, Gieras (1999).
O símbolo (-) representa que Wahyudie (2017) não cita o valor.

2. Parâmetros da Bobina

a) Parâmetros Básicos

Os Parâmetros da Bobina são mostrados na Figura 7, com os seguintes parâmetros básicos: largura interna da bobina (w_i), espessura da bobina (t_c), espaço entre as bobinas (s_c), fator de preenchimento (K_f), diâmetro do fio (w_d) e número de bobinas por fase (N). Os valores definidos por Wahyudie (2017) para esses parâmetros são apresentados na Tabela 3.

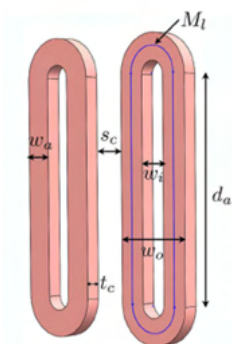


Figura 7: Parâmetros para a Bobina.
Fonte: Wahyudie (2017).

Tabela 3 – Parâmetros da Bobina (Básicos)

Parâmetro	Símbolo	Und.	Valor
Largura Interna	w_i	m	0,032
Espessura	t_c	m	0,015
Espaço entre as Bobinas	s_c	m	0,002
Fator de Preenchimento	K_f	s/und.	0,755
Diâmetro do Fio	w_d	m	0,001
Número de Bobinas por Fase	N	s/und.	3

*Compilação dos dados apresentados por Wahyudie (2017).

b) Parâmetros Derivados

Os parâmetros calculados nessa etapa foram: largura externa da bobina (w_o); passo médio (m_p); fator de passo (K_p) - relação entre a tensão induzida em um enrolamento de passo curto e a tensão induzida no enrolamento de passo completo; passo da bobina (C_s); fator de distribuição (K_s) - razão entre a tensão induzida em um enrolamento distribuído e a tensão induzida no enrolamento concentrado; comprimento médio por volta (M_l) - comprimento médio de fio utilizado em uma volta na bobina; seção reta do fio (A_w); número de voltas por bobina (N_t) e área da superfície da bobina (A_s).

No cálculo de N_t , o valor de 0,755 foi utilizado para o parâmetro fator de preenchimento da bobina (K_f) que indica a taxa de ocupação do espaço pelos condutores que formam a bobina e seus isolamentos. Esse fator é importante para determinar a capacidade da bobina em armazenar energia magnética e dissipar calor. Na Tabela 4 são comparados os resultados apresentados por Wahyudie (2017) e os cálculos realizados no Programa R. Destaca-se que somente o parâmetro M_l teve uma diferença entre o calculado e a referência de 6,3 cm de fio por volta da bobina.

Tabela 4 – Resultados comparados para os Parâmetros da Bobina (Derivados).

Parâmetro	Símbolo	Und.	Equação	Wahyudie (2017)	Resultado Calculado
Largura Externa	w_o	m	$w_o = \left(\frac{\tau_p \cdot N_a}{N_c} \right) - s_c$	0,076	0,076
Passo Médio	m_p	rad	$m_p = \frac{(w_o + w_i)}{2} \cdot \frac{\pi}{\tau_p}$	2,9	2,9

Fator de Passo	K_p	rad	$K_p = \cos\left(\frac{\pi - m_p}{2}\right)$	0,99	0,99
Passo da Bobina	C_s	rad	$c_s = \frac{(w_o - w_i)}{2} \cdot \frac{\pi}{\tau_p}$	1,18	1,18
Fator de Distribuição	K_s	rad	$K_s = \frac{\sin\left(\frac{c_s}{2}\right)}{\frac{c_s}{2}}$	0,94	0,94
Comprimento Médio por Volta	M_l	m	$M_l = 2 \cdot d_a + \pi \cdot \frac{w_o + w_i}{2}$	0,526	0,589
Seção Reta do Fio	A_w	m ²	$A_w = \pi \cdot \frac{(w_d)^2}{4}$	-	$7,85 \cdot 10^{-7}$
Número de Voltas por Bobina	N_t	s/und.	$N_t = \frac{\left(\frac{(w_o - w_a)}{2}\right) \cdot t_c \cdot K_f}{A_w}$	317	316
Área da Superfície da Bobina	A_s	m ²	$A_s = M_l \cdot (w_o - w_i)$	0,026	0,026

*O símbolo (-) representa que Wahyudie (2017) não cita o valor.

3. Parâmetros do Ímã Permanente

a) Parâmetros Básicos

Para o Ímã Permanente, os parâmetros básicos escolhidos foram a espessura do ímã (t_m) e a largura do ímã (w_m). Na Figura 8 são evidenciados esses parâmetros, além do passo polar (τ_p) que é definido como a distância linear entre qualquer ponto idêntico com relação ao polo adjacente. O parâmetro d_a do ímã permanente representa o comprimento do ímã. Este parâmetro deve ter o mesmo comprimento ativo da bobina (d_a) para proporcionar o casamento dos comprimentos da bobina e do ímã.

Um parâmetro construtivo importante do gerador é a distância do entreferro (a_g) evidenciada na Figura 6b. A distância do entreferro, também chamada de distância de ar, é a separação física entre as superfícies dos materiais que compõem um circuito magnético. É a região vazia entre essas superfícies, onde não há material magnético preenchendo o espaço. O entreferro é uma parte essencial que influencia diretamente a relutância do circuito magnético. A Tabela 5 apresenta os parâmetros acima explicitados.

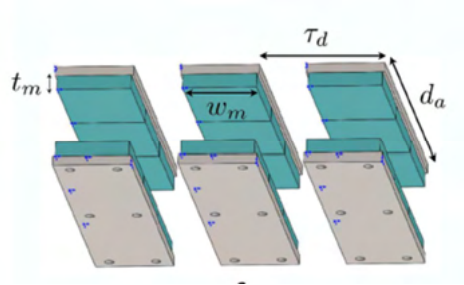


Figura 8: Parâmetros para Ímãs Permanentes.
Fonte: Wahyudie (2017).

Tabela 5 - Parâmetros do Ímã permanente (Básicos).

Parâmetro	Símbolo	Und.	Valor
Espessura do Ímã	t_m	m	0,009
Largura do Ímã	w_m	m	0,047
Distância do Entreferro	a_g	m	0,0025

*Compilação dos dados apresentados por Wahyudie (2017).

b) Parâmetros Derivados

Os parâmetros derivados dessa etapa foram a área da superfície do ímã e a força magneto motriz (Tabela 6). Para o cálculo da força magneto motriz foram utilizadas as seguintes constantes:

*Constante de Remanência (B_r): força do campo magnético residual presente no ímã permanente. Representa a magnetização retida no ímã após a remoção da fonte de campo magnético externo. No estator do gerador, Wahyudie (2017) utilizou ímãs permanente de terras raras de neodímio-ferro-boro (NdFeB) grade N45 que tem o valor de B_r de 1,3 teslas(T).

*Constante de permeabilidade magnética do ímã no vácuo (μ_0): com valor de $1,25 \cdot 10^{-6}$ T.m/A. Representa a capacidade do vácuo permitir a passagem de fluxo magnético.

*Constante de permeabilidade magnética relativa ao ímã (μ_d) com valor de 1,05.

*Constante de permeabilidade magnética relativa à estrutura de aço do gerador (μ_{st}), com valor de 1900.

Tabela 6 – Resultados calculados para os Parâmetros do Ímã permanente (Derivados).

Parâmetro	Símbolo	Und.	Equação	Wahyudie (2017)	Resultado Calculado
Área da Superfície do Ímã	A	m ²	$A = w_m \cdot d_a$	-	0,010
Força Magneto Motriz	F	Ae	$F = \frac{2 \cdot t_m \cdot B_r}{\mu_0 \cdot \mu_d}$	-	$1,77 \cdot 10^4$

*O símbolo (-) representa que Wahyudie (2017) não cita o valor.

4. Cálculo da Relutância Magnética do Gerador

O modelo de relutância magnética de Niknafs (2022a) foi utilizado para o cálculo do fluxo magnético, no lugar do modelo apresentado por Wahyudie (2017). Os caminhos do fluxo magnético apresentado por Niknafs (2022a) consideram sete itens: relutância do ímã permanente (R_m), relutância da seção vertical do aço (R_{iv}), relutância da seção horizontal do aço (R_{ih}), relutância do entreferro (R_{ag}), relutância do fluxo de dispersão do ímã para o aço (R_{mi}), relutância do fluxo de dispersão entre 2 ímãs adjacentes (R_{mm}) e relutância do fluxo de dispersão entre o aço (R_{ij}). Na Figura 9 são evidenciados estes itens, além da distância $d_{mm}=d_{ii}$ que representa a distância entre os magnetos/dormentes de aço e foi calculada pela diferença de τ_p e w_m .

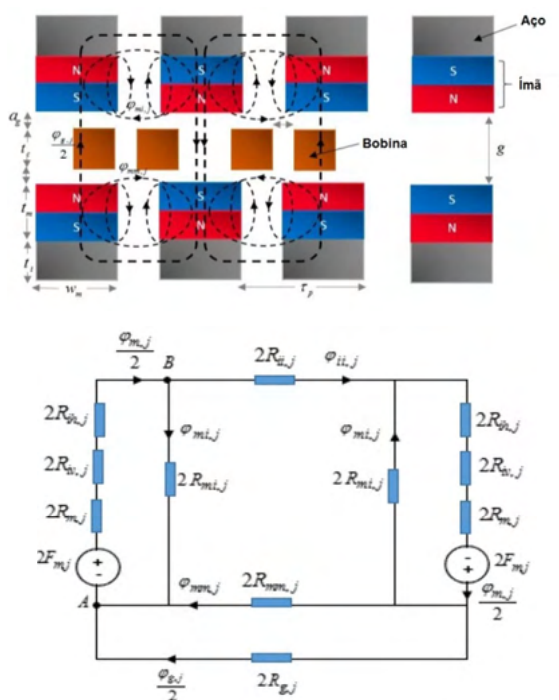


Figura 9: Circuito Magnético Equivalente.
Fonte: Niknafs (2022a).

Os parâmetros construtivos do gerador utilizados para o cálculo do modelo de relutância são: t_{st} , t_{st1} , t_m , a_g , t_c com as respectivas espessuras em metros: 0,01; 0,006; 0,009; 0,0025; 0,0015. Esses valores são apresentados na Figura 10.

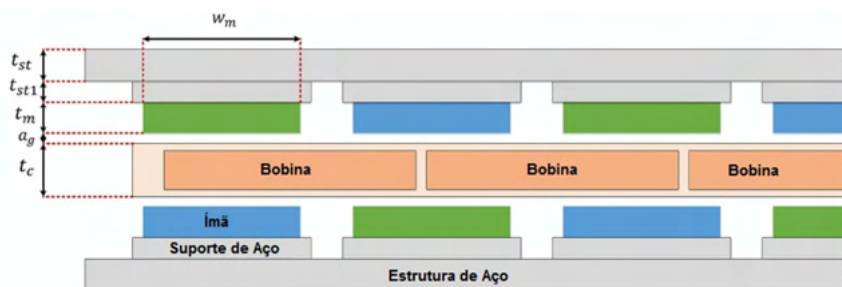


Figura 10: Parâmetros para o Modelo de Relutância.
Fonte: Wahyudie (2017).

Tabela 7 – Resultados calculados para o Modelo de Relutância.

Parâmetro	Símbolo	Und.	Equação	Niknafs (2022a)	Resultado Calculado
Relutância do ímã permanente	R_m	Ae/Wb	$R_m = \frac{t_m}{w_m \cdot d_a \cdot \mu_0 \cdot \mu_d}$	-	$6,91 \cdot 10^5$
Relutância da seção vertical do aço	R_{iv}	Ae/Wb	$R_{iv} = \frac{\left(\frac{t_{st} + t_{st1}}{2}\right)}{w_m \cdot d_a \cdot \mu_0 \cdot \mu_{st}}$	-	$6,79 \cdot 10^2$
Relutância da seção horizontal do aço	R_{ih}	Ae/Wb	$R_{ih} = \frac{\frac{w_m}{2}}{(t_{st} + t_{st1}) \cdot d_a \cdot \mu_0 \cdot \mu_{st}}$	-	$2,93 \cdot 10^3$
Relutância do entreferro	R_g	Ae/Wb	$R_g = \frac{2 \cdot a_g + t_c}{w_m \cdot d_a \cdot \mu_0}$	-	$1,61 \cdot 10^6$
Relutância do fluxo de dispersão do ímã para o aço	R_{mi}	Ae/Wb	$R_{mi} = \frac{t_m + t_{st} + t_{st1}}{w_m \cdot d_a \cdot \mu_0}$	-	$2,02 \cdot 10^6$
Relutância do fluxo de dispersão entre	R_{mm}	Ae/Wb	$R_{mm} = \frac{\tau_p}{\left(\frac{t_c}{2} + a_g\right) \cdot d_a \cdot \mu_0}$	-	$2,21 \cdot 10^7$

2 ímãs adjacentes				
Relutância do				
fluxo de	R_{ii}	Ae/Wb	$R_{ii} = \frac{\tau_p - w_m}{(t_{st} + t_{st1}) \cdot d_a \cdot \mu_0}$	-
dispersão entre				$2,68 \cdot 10^6$
o aço				

*O símbolo (-) representa que Niknafs (2022a) não cita o valor.

5. Cálculo do Fluxo Magnético

De acordo com o modelo de Niknafs (2022a), o fluxo magnético para cada caminho é calculado através da matriz apresentada na Figura 11. A Tabela 8 expõe os resultados deste cálculo.

$$\begin{bmatrix} \Phi_m \\ \Phi_g \\ \Phi_{mi} \\ \Phi_{mm} \\ \Phi_{ii} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_m + R_{iv} + R_{ih} & 0 & 2 \cdot R_{mi} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_g & 0 & -2 \cdot R_{mm} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -4 \cdot R_{mi} & 2 \cdot R_{mm} & 2 \cdot R_{ii} & 0 \\ -0,5 & 0,5 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0,5 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} F \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Figura 11: Matriz do cálculo dos caminhos do fluxo magnético.
Fonte: Niknafs (2022a).

Tabela 8 – Resultados calculados para os Caminhos do Fluxo Magnético.

Parâmetro	Símbolo	Und.	Niknafs (2022a)	Resultado Calculado
Fluxo Magnético do Ímã	Φ_m	Wb	-	$1,03 \cdot 10^{-2}$
Fluxo Magnético no Entreferro	Φ_g	Wb	-	$4,71 \cdot 10^{-3}$
Fluxo de Dispersão do Ímã para o Aço	Φ_{mi}	Wb	-	$2,62 \cdot 10^{-3}$
Fluxo de Dispersão entre ímãs	Φ_{mm}	Wb	-	$1,72 \cdot 10^{-4}$
Fluxo de Dispersão entre os Dormentes de	Φ_{ii}	Wb	-	$2,53 \cdot 10^{-3}$

Aço					
Fluxo do Campo Magnético	$\Phi = \Phi_m + \Phi_g + \Phi_{mi} + \Phi_{mm} + \Phi_{ii}$	Wb	-		$2,03 \cdot 10^{-02}$

*O símbolo (-) representa que Niknafs (2022a) não cita o valor.

6. Variáveis Calculadas

O agrupamento de dados para as variáveis calculadas do gerador (Tabela 9) foi proposto tendo-se como base os parâmetros básicos e derivados calculados nas seções anteriores. Essas variáveis consistem no campo magnético no entreferro (B_g); tensão de pico por volta (V_t); ajuste do efeito de fim (η_e); tensão de pico da bobina (V_c); força eletromotriz (V_p); resistência da bobina por fase (R_c); reatância da bobina por fase (X_c) que engloba a reatância da bobina, a reatância de fuga e a reatância devido à reação da armadura; impedância total por fase (Z_p); corrente de fase do translador (I); tensão de saída de fase (V_{out}); potência de saída do gerador (P_{out}); perda do gerador (P_{loss}); potência de entrada do gerador (P_{in}) e eficiência do gerador (η). A resistência da carga do gerador (R_l) é um parâmetro que compõe a impedância total do gerador (Z_p).

Tabela 9 – Resultados comparados para as Variáveis Calculadas.

Parâmetro	Símbolo	Und.	Equação	Wahyudie (2017)	Resultado Calculado
Fluxo do Campo Magnético	Φ	Wb	Modelo de Relutância	-	0,0203
Campo Magnético no Entreferro	B_g	T	$B_g = \frac{\Phi}{A}$	0,67	2,06
Tensão de Pico por Volta	V_t	V	$V_t = 2 \cdot B_g \cdot v_l \cdot d_a$	0,28	0,28
Ajuste do Efeito de Fim	η_e	s/und.	$\eta_e = \left(1 - \frac{\tau_p}{4 \cdot d_a}\right)$	0,93	0,93
Tensão de Pico da	V_c	V	$V_c = N_t \cdot V_t \cdot K_s \cdot K_p \cdot \eta_e$	78	78

Bobina					
Força Eletromotriz	V_p	V	$V_p = N \cdot V_c$	232	233
Resistência da Bobina por fase	R_c	Ω	$R_c = \frac{\rho_{cu} \cdot N \cdot N_t \cdot M_l}{A_w}$	4	12,22
Reatância da Bobina por fase*	X_c	Ω	$X_c = 4 \cdot m_1 \cdot \mu_0 \cdot f \cdot \frac{(N \cdot N_t \cdot K_p \cdot K_s)^2}{\pi \cdot N_p} \cdot \frac{\tau_p \cdot d_w}{A_w}$	-	17,52
Impedância Total por Fase**	Z_p	Ω	$Z_p = R_l + R_c + jX_c$	-	33,2+17,5j 37,56
Corrente de Fase do Translador	I	A	$I = \frac{V_p}{\sqrt{2} \cdot Z_p}$	-	3,90-2,06j 4,41
Tensão de Saída de Fase	V_{out}	V	$V_{out} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} - (R_c + jX_c) \cdot I$	-	81,86- 4318j 92,55
Potência de Saída do Gerador	P_{out}	W	$P_{out} = 3 \cdot V_{out} \cdot I$	1200	1223,66
Perda do Gerador	P_{loss}	W	$P_{loss} = 3 \cdot R_c \cdot I ^2$	-	161,56
Potência de Entrada do Gerador	P_{in}	W	$P_{in} = P_{loss} + P_{out}$	-	1385,23
Eficiência do Gerador	η	s/und.	$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$	0,886	0,883

* Parâmetro calculado tendo como fonte o livro “Fundamentos de Máquinas Elétricas”, Chapman (2013).

**O valor de R_l foi determinado como 21 Ω , pois neste ponto ocorre a máxima transferência de potência para a carga devido ao casamento das impedâncias entre o gerador e carga externa.

***O valor utilizado para a resistividade do Cobre (ρ_{cu}) foi $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega/m$.

O símbolo (-) representa que Wahyudie (2017) não cita o valor.

Na Tabela 9, o valor de 2,06 T calculado para o Campo Magnético no Entreferro (B_g) apresentou um valor divergente de 0,67 T, publicado por Niknafs (2022a). O resultado calculado carece de coerência física,

uma vez que o maior campo possível está limitado pela constante de remanência do ímã utilizado, com valor de 1,3 T. Com o intuito de não propagar uma constante de erro nos cálculos seguintes, optou-se por utilizar o valor de 0,67 T para B_g . Como segunda tentativa, os cálculos para determinar B_g também foram realizados segundo o modelo de relutância e de cálculo do fluxo magnético de Wahyudie (2017). Esse modelo resultou em um valor de B_g de 4,05 T, distanciando-se ainda mais de 0,67 T.

Wahyudie (2017) publicou o valor de 4 Ω para a resistência da bobina por fase (R_c), já no presente estudo calculou-se o valor de 12,22 Ω . Esta diferença de um fator de 3 vezes entre os resultados pode ser devido à resistência total da bobina por fase que é composta pelo arranjo de 3 bobinas ligadas em série. Considerando-se esta inferência, depreende-se que não seria encontrada uma diferença tão significativa para os valores de R_c . Portanto, optou-se por utilizar o valor calculado de 12,2 Ω para esta variável.

Na sequência são apresentados os gráficos elaborados no programa *R* contendo as simulações realizadas variando-se somente um parâmetro construtivo do gerador por vez, com o intuito de evidenciar o comportamento da potência de saída do gerador. Na Figura 12a foi plotada a resistência de carga (R_l) em função da potência de saída do gerador (P_{out}). R_l varia no intervalo de 0 Ω até 400 Ω e o ponto de operação de máxima transferência de potência do gerador é determinado para o valor de R_l de 21 Ω . Na Figura 12b, o gráfico plotado representa a variação da velocidade linear (V_l) e a potência de saída do gerador (P_{out}) apresentando o ponto de operação em 1 m/s. Neste gráfico, pode-se extrair que, caso o gerador funcione em uma velocidade menor, por exemplo, na metade da velocidade máxima (0,5 m/s), a potência de saída será menor que a metade.

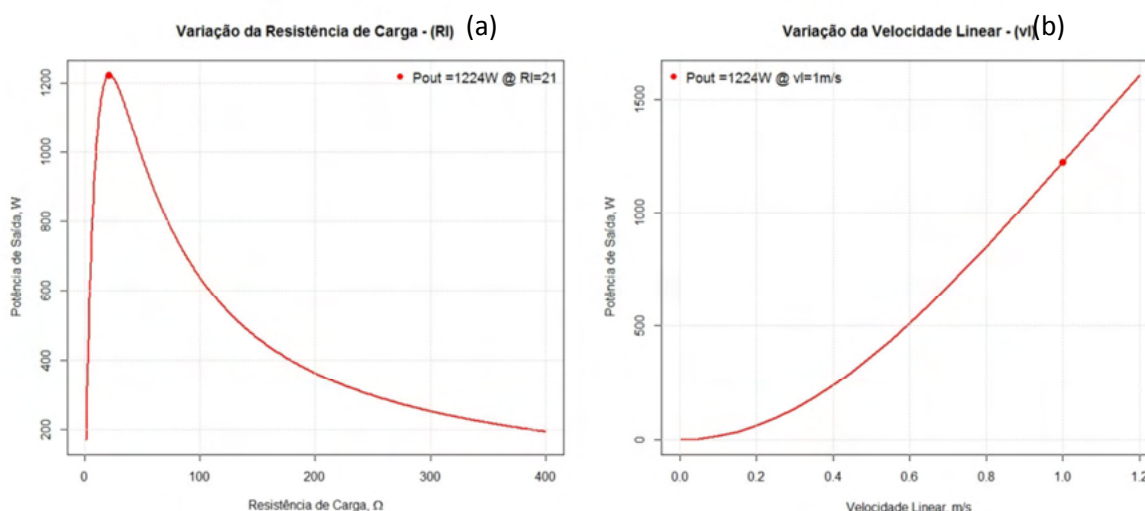
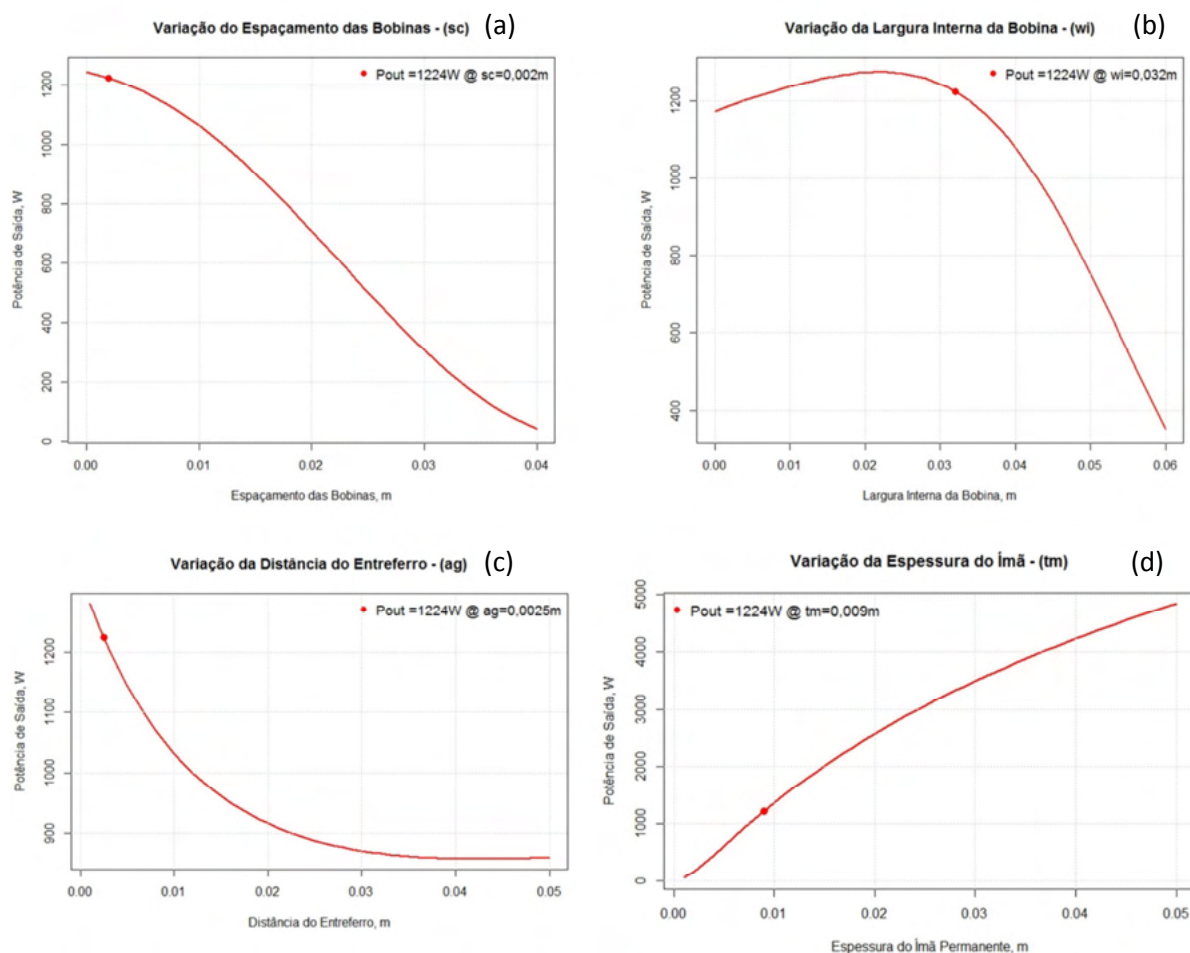


Figura 12: Potência de Saída versus: (a) Resistência de Carga, (b) Velocidade Linear.
Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 13a, o espaçamento entre as bobinas foi calculado considerando-se as bobinas sem nenhum espaçamento até a distância de 0,04m. Esse parâmetro demonstra um afundamento na potência gerada bastante significativo conforme a distância é aumentada. Já da Figura 13b, pode-se extrair que a menor largura interna da bobina não promove a maior geração de potência. A análise da Figura 13c mostra que a variação da distância entreferro tem o comportamento de uma assíntota em torno da potência de 850W. Em 13d, pode-se perceber que a espessura do ímã promove um aumento expressivo na potência gerada. E, por último, em 13e, nota-se que a variação do comprimento ativo tem um comportamento de aumento da potência de saída semelhante ao da espessura do ímã. Esse comportamento é esperado, pois a variação do comprimento ativo prevê o aumento do comprimento do ímã.



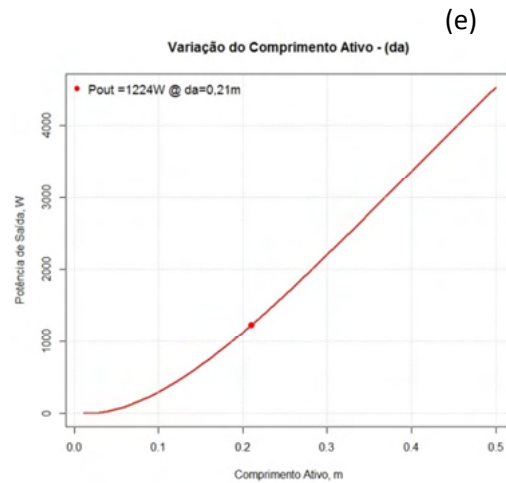


Figura 13: Potência de Saída versus: (a) Espaçamento das Bobinas, (b) Largura Interna, (c) Distância do Entreferro, (d) Espessura do Ímã, (e) Comprimento Ativo.
Fonte: Elaboração Própria.

III. Considerações Finais

Os resultados calculados no presente projeto de gerador linear tiveram alto grau de paridade com os valores publicados por Wahyudie (2017), um modelo que contou com a validação por simulação de elementos finitos e por um protótipo. Apesar disso, alguns detalhamentos de cálculos e resultados esbarraram na dificuldade de comparação com os resultados na literatura sobre o tema. Este fato impulsionou a confecção de uma sequência bem detalhada e esmiuçada de cálculos conforme apresentando no presente trabalho, possibilitando, portanto, novas aplicações em projetos de geradores de outras potências.

Futuros trabalhos são necessários para a pesquisa e o recálculo do método de determinação do fluxo magnético do entreferro, já que este foi o único parâmetro que apresentou um valor discrepante do publicado por Wahyudie (2017).

IV. Referências

- Azhari, B., Danang Wijaya, F., Prawinnetou, W., Dewangga Adhyaksa, H. (2017). Analytical design of sea wave energy power plant using tubular linear PM generator in southern coast of Yogyakarta, Indonesia. *Proceedings - 2016 3rd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering, ICITACEE 2016*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICITACEE.2016.7892433>
- Bang, D. J., Polinder, H., Shrestha, G., Ferreira, J. A.(2008). Design of a lightweight transverse flux permanent magnet machine for direct-drive wind turbines. in Proc. 2008 Industry Appl. Soc. Annu. Meeting, pp. 1–7.
- Chapman, S.J.(2013). *Fundamentos de Máquinas Elétricas*, 5ª Edição. Brasil: Editora AMGH.
- Danielsson, O., Leijon, M.(2007). Flux distribution in linear permanentmagnet synchronous machines including longitudinal end effects. *IEEE Trans. Magn.*, 2007, 43, (7), pp. 3197–3201.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética (2020) - Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020. 256p., Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>
- FAIAD (2018) - Glasgow Caledonian University, & Institute of Electrical and Electronics Engineers. . *2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC2018): proceedings: 4th-7th September 2018, Glasgow, United Kingdom*.
- Faiz, J., Ebrahimi-Salari, M., Shahgholian, G.(2010). Reduction of cogging force in linear permanent-magnet generators. *IEEE Trans. Magn.*, 2010, 46, (1), pp. 135–140.
- Faiz, J., Nematsaberi, A. (2017). Linear electrical generator topologies for direct-drive marine wave energy conversion- an overview. *IET Renewable Power Generation*, 11(9), 1163–1176.
- Farrok, O., Islam, M. R., Sheikh, M. R. I., Guo, Y., Zhu, J. (2017). Design and Analysis of a Novel Lightweight Translator Permanent Magnet Linear Generator for Oceanic Wave Energy Conversion. *IEEE Transactions on Magnetics*, 9464(c), 1–1.
- Gieras, J. F., Piech Z.J.(1999). *Linear Synchronous Motors Transportation and Automation Syst*. New York: CRC Press.
- IRENA - International Renewable Energy Agency (2020) - Innovation outlook: Ocean energy technologies. 112p., International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, United Arab Emirates.https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Innovation_Outlook_Ocean_Energy_2020.pdf
- IRENA - International Renewable Energy Agency (2021) - World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway. 312p., International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, United Arab Emirates.
- Mueller, M.A., Baker, N.J.(2005). Direct drive electrical power take-off for offshore marine energy converters. *Proc. IMechE Part A – Journal of Power and Energy* 219 (A3):223-234 May 2005.

Niknafs, S., Shiri, A., Bagheri, S. (2022a). Modeling and Analysis of Flat Double-Sided Linear Permanent Magnet Synchronous Generator by Magnetic Equivalent Circuit Keywords: Linear permanent magnet synchronous generator Flat double-sided structure Magnetic equivalent circuit Finite element method. *Journal of Electrical and Computer Engineering Innovations*, 10(1), 17–24. <https://doi.org/10.22061/JECEI.2021.7782.434>.

Niknafs, S., Shiri, A., Bagheri, S. (2022b). Design and optimization of air-cored double-sided linear permanent magnet generators for wave energy conversion. *Energy Science and Engineering*, 10(12), 4481–4495. <https://doi.org/10.1002/ese3.1284>.

Polinder, H., Mecrow, B.C., Jack, A.G., et al.(2005). Conventional and TFPM Linear Generators for Direct-Drive Wave Energy Conversion. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2005, 20, (2), pp. 260–267.

Sousounis, M. C., Gan, L. K., Kiprakis, A. E., & Shek, J. K. H. (2017). Direct drive wave energy array with offshore energy storage supplying off-grid residential load. *IET Renewable Power Generation*, 11(9), 1081–1088.

Wahyudie, A., Jama, M., Susilo, T. B., Mon, B. F., Shaaref, H., Noura, H. (2017). Design and testing of a laboratory scale test rig for wave energy converters using a double-sided permanent magnet linear generator. *IET Renewable Power Generation*, 11(7), 922–930.

Wahyudie, A., Susilo, T. B., Jehangir, S. S. (2018). Design of A 100 W Mini Permanent Magnet Linear Generator for Wave Energy Converter System. 5th International Conference on Renewable Energy: Generation and Applications (ICREGA), 223-226.

Zhu, J. G., Guo, Y. G., Lin, Z. W., Lin, Y. J.(2011). Development of PM Transverse Flux Motors With Soft Magnetic Composite Cores. *IEEE Trans. On Magnetics*, 2011, pp. 4376-4383.

V. Apêndice A

```

setwd("~/IFF/Msc/08 - Projeto Maquina/Projeto Maq/coreless/Graficos")

#-----PARÂMETROS GERAIS-----
#Parâmetros Básicos
ds <- 1                # Curso Máximo - m
Nc <- 9                # Número de Bobinas
da <- 0.21             # Comprimento Ativo - m
dw <- 0.7              # Comprimento da Seção de Trabalho - m
vl <- 1                # Velocidade Linear Máxima - m/s
ml <- 3                # Número de fases do Gerador
beta <- 0.75

#Parâmetros Derivados
Na <- Nc/beta          # Número de Pólos Ativos por Lado
talp <- beta*(dw/Nc)   # Passo do Pólo - m
Np <- 1+((dw+ds)/talp) # Total de Pólos por Lado
f <- vl/(2*talp)       # Frequência Máxima do Gerador - Hz

#-----PARÂMETROS DA BOBINA-----
#Parâmetros Básicos
wi <- 0.032            # Largura Interna da bobina - m
tc <- 0.015            # Espessura da bobina - m
sc <- 0.002            # Espaçamento das Bobinas - m
Kf <- 0.755            # Fator de Preenchimento
wd <- 0.001            # Diâmetro do Fio - m
N <- 3                 # Número de Bobinas por fase

#Parâmetros Derivados
wo <- ((talp*Na)/Nc) - sc # Largura Externa da bobina - m
mp <- ((wo+wi)/2)*(pi/talp) # Passo Médio - rad
Kp <- cos((pi-mp)/2)      # Fator de Passo - rad
cs <- ((wo-wi)/2)*(pi/talp) # Espalhamento da Bobina - rad
Ks <- sin(cs/2)/(cs/2)    # Fator de Espalhamento - rad
Ml <- 2*da+(pi*((wo+wi)/2)) # Comprimento Médio por Volta - m
Aw <- ((pi*(wd)^2)/4)     # Seção Reta do Fio - m2
Nt <- (((wo-wi)/2)*tc*Kf)/Aw # Número de Voltas por Bobina
round(Nt)
As <- Ml*(wo-wi)          # Área da Superfície da Bobina - m2

#-----PARÂMETROS DO ÍMA PERMANENTE-----
#Parâmetros Básicos
tm <- 0.009            # Espessura do íma - m
wm <- 0.047            # Largura do Íma - m
ag <- 0.0025           # Distância do Entreferro - m
Br <- 1.3              # Constante de Remanência do Íma Grade N45 - T
u0 <- 4*pi*10^-7       # Permeabilidade Magnética no Vácuo - T.m/A
ud <- 1.05             # Permeabilidade Magnética Relativa do Íma
ust <- 1900            # Permeabilidade Magnética Relativa do Aço

#Parâmetros Derivados
A <- wm*da             # Área da Superfície do Íma - m2
F <- (2*tm*Br)/(u0*ud) # Força Magneto Motriz - Ae

#-----CALCULO DA RELUTÂNCIA DO GERADOR-----
tst <- 0.01            # Espessura da Tampa de Aço - m
tstl <- 0.006         # Espessura do dormente do Íma na Tampa de Aço - m

```

```

#Cálculo das Relutâncias

# Relutância do Íma Permanente - Ae/Wb
Rm <- tm/(wm*da*u0*ud)
# Relutância da Seção Vertical do Aço - Ae/Wb
Riv <- ((tst+tst1)/2)/(wm*da*u0*ust)
# Relutância da Seção Horizontal do Aço - Ae/Wb
Rih <- (wm/2)/((tst+tst1)*da*u0*ust)
# Relutância do Entreferro - Ae/Wb
Rg <- ((2*ag)+tc)/(wm*da*u0)
# Relutância do Fluxo de Dispersão do Íma para o Aço - Ae/Wb
Rmi <- (tm+tst+tst1)/(wm*da*u0)
# Relutância do Fluxo de Dispersão entre 2 Ímã Adjacentes - Ae/Wb
Rmm <- talp/(((tc/2)+ag)*da*u0)
# Relutância do Fluxo de Dispersão entre 2 Dormentes de Aço - Ae/Wb
Rii <- (talp-wm)/((tst+tst1)*da*u0)

#-----CALCULO DO FLUXO MAGNÉTICO DO GERADOR-----

#Criação e inserção dos valores na Matriz de Relutâncias (MR)
MR <- array(dim = c(5,5,1))
for(i in 1:1){

MR[, , i] <- matrix(c(Rm[i]+Riv[i]+Rih[i],      0,  2*Rmi[i],      0,      0,
                    0,  Rg[i],      0, -2*Rmm[i],      0,
                    0,  0, -4*Rmi[i],  2*Rmm[i],  2*Rii[i],
                    -0.5,  0.5,      1,      1,      0,
                    0.5,  0,      -1,      0,      -1),
                    nrow = 5, ncol = 5, byrow = TRUE)
}

# Cálculo da Inversa da Matriz de Relutância (MR_i)
MR_i <- array(dim = c(5,5,1))
for(i in 1:1){
  MR_i[, , i] <- solve(MR[, , i])
}

#Criação e inserção dos valores na matriz Força Magneto Motriz (F)
MF <- matrix(c(F,0,0,0,0),nrow = 5, ncol = 1)

#Cálculo da multiplicação MR_i * MF
PHI_a <- array(dim = c(1,5,1))
for(i in 1:1){
  PHI_a[, , i] <- (MR_i[, , i]) %*% (MF)
}

#Cálculo do Fluxo (PHI 1,50) - somatório de (PHIm, PHIg, PHImi, PHImm, PHIii)
PHI <- array(dim = c(1,1))
for(i in 1:1){
  PHI[, i] <- (PHI_a[, 1, i] + # PHIm - Fluxo Magnético do Íma
              PHI_a[, 2, i] + # PHIg - Fluxo no Entreferro
              PHI_a[, 3, i] + # PHImi - Fluxo de Dispersão do Íma para o
Aço
              PHI_a[, 4, i] + # PHImm - Fluxo de Dispersão entre os Ímas
              PHI_a[, 5, i]) # PHIii - Fluxo de Dispersão entre os Aços
}

```

```

#-----VARIÁVEIS CALCULADAS-----
PHI<-0.67
Bg <- PHI/A # Campo Magnético no Entreferro - T

Vt <- 2*Bg*vl*da # Tensão de Pico por Volta - V
etae <- 1-(talp/(4*da)) # Ajuste de Efeito de Fim
Vc <- Nt*Vt*Ks*Kp*etae # Tensão de Pico da bobina - V
Vp <- N*Vc # Força Eletromotriz - V

RoCu <- 1.72*10^-8 # Resistividade do Cobre - ohm/m
Rc <- (RoCu*N*Nt*Ml)/Aw # Resistência Total da Bobina por fase - ohm
Xc <- 4*ml*u0*f*((N*Nt*Kp*Ks)^2)*(talp*dw)/(pi*Np*ag) # Reatância da Bobina - ohm

Rl <- seq(1,400,1) # Resistência de Carga - ohm
Zp <- Rl+complex(real=Rc,imaginary=Xc) # Impedância Total de Cada Fase

I <- Vp/(sqrt(2)*Zp) # Corrente de Fase do Translador - A
# Tensão de Saída - V
Vout <- (Vp/sqrt(2))-(complex(real=Rc, imaginary=Xc)*I)

Pout_i <- 3*Vout*I # Potência de Saída do Gerador - W
Pout <- Mod(Pout_i)
Ploss <- 3*Rc*Mod(I) # Potência Perdida no Gerador - W
Pin <- Ploss+Pout # Potência de Entrada - W

eta <- Pout/Pin # Eficiência do Gerador

plot(Rl, Pout, type = "l", main = "Variação da Resistência de Carga - (Rl)", xlab =
expression(Resistência*" "de*" "Carga*","*" "*Omega) , ylab = "Potência de Saída,
W",col="red", lwd="2")
legend(x="topright", legend = "Pout =1224W @ Rl=21", pch=19, col="red", cex = 1.1,
bty="n")
grid(nx=NULL, ny=NULL)
points(21,1224,pch=19,col="red", cex=1.3)

```

CONCLUSÃO DA PESQUISA:

A Energia das ondas é promissora no esforço de diversificação da matriz energética brasileira. As ondas agregam energia limpa, de distribuição planetária, com geração e consumo próximos, refletindo menor perda na transmissão. Por se tratar de uma fonte renovável, novos estudos são prementes para contribuir com a redução da emissão de gases estufa e os efeitos do aquecimento global.

Apesar das potencialidades, os aspectos ambientais não podem ser negligenciados, conforme apontado pelas pesquisas realizadas nos artigos 1 e 2 que compõem essa dissertação. Tal como discutido no artigo 1, o arcabouço legal brasileiro atua no sentido de promover a proteção ambiental terrestre e também da zona costeira. Estudos científicos auxiliam no diagnóstico dos riscos, principalmente, em relação à fauna da zona costeira. Esses estudos são fundamentais para o Princípio da Prevenção e Precaução que procura compatibilizar atividades potencialmente impactantes com a proteção do meio ambiente. O artigo 2 agregou apontamentos à necessidade de proteção da costa brasileira, identificando espécies prioritárias para o monitoramento ambiental.

O artigo 3 contribuiu com uma demanda do PPE/COPPE/UFRJ de projetar um gerador linear para o captador de energia de ondas do tipo ponto absorvedor. Foi delineado um roteiro promissor de um *cookbook* com os cálculos das variáveis de um gerador de topologia planar, de dois lados, com núcleo de ar e sem ranhuras que possibilita novas aplicações em projetos de geradores de outras potências.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DA DISSERTAÇÃO

CUNHA, I. P. C. (2014) – **Avaliação Ambiental dos Conversores de Energia das Ondas Aplicados à Geração Elétrica**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Macaé, RJ, 2014.

CUNHA, I. P. C., MOREIRA, M. A. C.; SANTOS, R. C.; SANTOS, J. A. M. (2017) **Estudo da Viabilidade de utilização de uma máquina de fluxo transversal linear como parte da estrutura do conversor de energia de ondas point absorber**. Revista Vértice, Campos dos Goytacazes, v.19, n. 2, 2017.

MARTINS, E. B. S. (2019) – **Desenvolvimento de um protótipo de gerador linear de fluxo transversal para aplicação em conversores de energia de ondas**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Campos dos Goytacazes, RJ, 2019.

MATTOS, A.D.M.; LOUREIRO, D.D.; KONZEN, G.; LOPES, L.S. (2016) **Oceânica**. In: Tolmasquim MT, Coordenador. Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar e Oceânica. Rio de Janeiro: EPE. pp. 409.

RICARTE, E. (2017) **Desenvolvimento de dispositivos de conversão de energias marinhas: O caso do modelo de energia das ondas no Programa de Planejamento Energético**. In: Cadernos de Energia, N. 5, maio – agosto (2017). PPE– Programa de Planejamento Energético da COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. UFRJ. – Rio de Janeiro: PPE, 2017. ISSN 2446-5275.

TOLMASQUIM, M. T. (2016) - **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. 452p., Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, Brasil. ISBN 978-85-60025-06-0.