



**UNIVERSIDADE CATÓLICA DO SALVADOR - UCSAL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM TERRITÓRIO,
AMBIENTE E SOCIEDADE - PPGTAS
MESTRADO EM TERRITÓRIO, AMBIENTE E SOCIEDADE**

FÁBIO TADEU CÔRTEZ MORAIS

**ENERGIA EÓLICA NO NORDESTE BRASILEIRO:
POTENCIAL E ANÁLISE MULTIDIMENSIONAL DOS ASPECTOS
SOCIOAMBIENTAIS, TECNOLÓGICOS E REGULATÓRIOS NOS
APROVEITAMENTOS TERRESTRES (*ONSHORES*) E COSTEIROS
(*OFFSHORES*)**

**Salvador / Ba
2025**

FÁBIO TADEU CÔRTEZ MORAIS

**ENERGIA EÓLICA NO NORDESTE BRASILEIRO:
POTENCIAL E ANÁLISE MULTIDIMENSIONAL DOS ASPECTOS
SOCIOAMBIENTAIS, TECNOLÓGICOS E REGULATÓRIOS NOS
APROVEITAMENTOS TERRESTRES (*ONSHORES*) E COSTEIROS
(*OFFSHORES*)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Território, Ambiente e Sociedade da Universidade Católica do Salvador (PPGTAS) para obtenção de Mestrado em Território, Ambiente e Sociedade.

Orientador: Prof. Dr. Amilcar Baiardi.

**Salvador / Ba
2025**

Dados de Catalogação na Publicação (CIP)
Ficha Catalográfica. UCSAL. Biblioteca Dom Geraldo Majella Agnelo

M828 Morais, Fábio Tadeu Côrtes

Energia eólica no Nordeste brasileiro: potencial e análise multidimensional dos aspectos socioambientais, tecnológicos e regulatórios nos aproveitamentos terrestres (ONSHORES) e costeiros (OFFSHORES) / Fábio Tadeu Côrtes Morais. – Salvador, 2025.

81 f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica do Salvador. Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação. Mestrado em Território, Ambiente e Sociedade.

Orientador: Prof. Dr. Amilcar Baiardi.

Energia Eólica 2. Nordeste Brasileiro 3. Impactos Ambientais
4. Sensoriamento Remoto 5. Marco Regulatório I. Baiardi, Amilcar – Orientador II. Universidade Católica do Salvador. Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação III. Título.

TERMO DE APROVAÇÃO

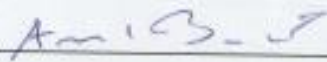
FÁBIO TADEU CÔRTEZ MORAIS

**"Energia Eólica No Nordeste Brasileiro: Potencial e Análise
Multidimensional dos Aspectos Socioambientais, Tecnológicos e
Regulatórios nos Aproveitamentos Terrestres (Onshores) e Costeiros
(Offshores)".**

Dissertação aprovada como requisito para obtenção do grau de
Mestre(a) em Território, Ambiente e Sociedade.

Salvador, 18 de julho de 2025.

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Amílcar Baiardi (orientador - UCSAL)



Prof. Dr. José Rodrigues Souza Filho (examinador interno - UCSAL)



Prof. Dr. André Pedral Sampaio de Sena (examinador externo - UNEB)

AGRADECIMENTOS

À minha amada esposa, companheira incansável nesta jornada acadêmica, que transformou as noites de estudo em momentos de cumplicidade e os desafios em oportunidades de crescimento conjunto. Seu olhar compreensivo nos momentos de ausência e seu sorriso encorajador nas horas de dúvida foram o combustível que alimentou minha determinação em alcançar este objetivo.

Sua paciência infinita diante dos fins de semana dedicados à pesquisa, sua capacidade de transformar meu cansaço em renovada motivação e seu amor incondicional que se manifestava nos pequenos gestos; um lanche nas noites de escrita, um abraço silencioso nos momentos de tensão, uma palavra de incentivo quando o caminho parecia incerto, foram fundamentais para a concretização deste sonho.

Em cada página desta dissertação há um pouco do seu amor, em cada conquista alcançada existe a marca do seu apoio. Você não foi apenas espectadora desta jornada, mas coautora de cada vitória, compartilhando as alegrias das descobertas e as ansiedades dos prazos, celebrando cada pequeno progresso e me ajudando a superar cada obstáculo que surgiu no caminho.

Este trabalho é tanto meu quanto seu, pois foi construído sobre os alicerces do nosso amor, da nossa parceria e da nossa cumplicidade. Obrigado por ser meu porto seguro, minha inspiração diária e minha maior incentivadora. A você, minha amada, dedico não apenas esta dissertação, mas todo o amor e gratidão que cabem em meu coração, pois sem você, este sonho não teria se tornado realidade.

Agradeço também à Companhia de Gás da Bahia - BAHIAGÁS, não apenas pelo programa de auxílio educação que viabilizou financeiramente esta etapa acadêmica, mas também pelo ambiente de crescimento profissional que me proporcionou. Sou grato aos colegas que me apoiaram durante este percurso, especialmente a Magno Silva da ASTEG, cujo suporte tecnológico foi fundamental para a realização deste trabalho.

RESUMO

Esta dissertação analisa o desenvolvimento da energia eólica no Nordeste brasileiro sob três perspectivas complementares: potencial de geração e impactos socioambientais, potencial do monitoramento tecnológico e aspectos regulatórios. A investigação fundamenta-se em pesquisa documental, revisão bibliográfica e análise legislativa, contemplando o período de 2019 a 2024. O primeiro artigo examina os efeitos ambientais dos parques eólicos no ambiente rural nordestino, identificando impactos sobre a fauna, especialmente aves, e alterações nos ecossistemas locais. Os resultados indicam a necessidade de aprimoramento nas medidas mitigatórias e maior engajamento das comunidades afetadas. O segundo estudo avalia as especificidades da geração offshore e a aplicação de sensoriamento remoto e inteligência artificial no monitoramento de impactos sobre aves migratórias nesses parques eólicos, demonstrando alta precisão (99,93%) na identificação de espécies por sensoriamento remoto e 87% de acurácia em modelos de IA. O terceiro artigo analisa as barreiras regulatórias e administrativas para investimentos no setor, com foco no PL 576/2021, evidenciando que a ausência de marco regulatório específico constitui o principal entrave ao desenvolvimento da energia eólica offshore no Brasil. A integração dos três estudos revela a complexidade do tema e a necessidade de uma abordagem multidimensional que contemple aspectos técnicos, ambientais e normativos. Conclui-se que o desenvolvimento sustentável da energia eólica no Nordeste requer: aperfeiçoamento dos mecanismos de monitoramento ambiental, implementação de tecnologias avançadas para mitigação de impactos e estabelecimento de um marco regulatório que proporcione segurança jurídica aos investimentos, garantindo a proteção ambiental e o desenvolvimento socioeconômico regional.

Palavras-chave: Energia eólica, Nordeste brasileiro, Impactos ambientais, Sensoriamento remoto, Marco regulatório.

ABSTRACT

This dissertation analyzes the development of wind energy in the Brazilian Northeast through three complementary perspectives: generation potential and socio-environmental impacts, technological monitoring potential, and regulatory aspects. The investigation is based on documentary research, literature review, and legislative analysis, covering the period from 2019 to 2024. The first article examines the environmental effects of wind farms in the northeastern rural environment, identifying impacts on fauna, especially birds, and changes in local ecosystems. The results indicate the need for improvement in mitigation measures and greater engagement of affected communities. The second study evaluates the specificities of offshore generation and the application of remote sensing and artificial intelligence in monitoring impacts on migratory birds in these wind farms, demonstrating high precision (99.93%) in species identification through remote sensing and 87% accuracy in AI models. The third article analyzes the regulatory and administrative barriers to investments in the sector, focusing on Bill 576/2021, showing that the absence of a specific regulatory framework constitutes the main obstacle to the development of offshore wind energy in Brazil. The integration of the three studies reveals the complexity of the topic and the need for a multidimensional approach that contemplates technical, environmental, and normative aspects. It is concluded that the sustainable development of wind energy in the Northeast requires: improvement of environmental monitoring mechanisms, implementation of advanced technologies for impact mitigation, and establishment of a regulatory framework that provides legal security for investments, ensuring environmental protection and regional socioeconomic development.

Keywords: Wind energy. Brazilian Northeast. Environmental impacts. Remote sensing. Regulatory framework.

RESUMEN

Esta disertación analiza el desarrollo de la energía eólica en el Nordeste brasileño desde tres perspectivas complementarias: potencial de generación e impactos socioambientales, potencial de monitoreo tecnológico y aspectos regulatorios. La investigación se fundamenta en investigación documental, revisión bibliográfica y análisis legislativo, contemplando el período de 2019 a 2024. El primer artículo examina los efectos ambientales de los parques eólicos en el ambiente rural nordestino, identificando impactos sobre la fauna, especialmente aves, y alteraciones en los ecosistemas locales. Los resultados indican la necesidad de perfeccionamiento en las medidas mitigatorias y mayor participación de las comunidades afectadas. El segundo estudio evalúa las especificidades de la generación offshore y la aplicación de sensores remotos e inteligencia artificial en el monitoreo de impactos sobre aves migratorias en estos parques eólicos, demostrando alta precisión (99,93%) en la identificación de especies por sensores remotos y 87% de exactitud en modelos de IA. El tercer artículo analiza las barreras regulatorias y administrativas para inversiones en el sector, con enfoque en el Proyecto de Ley 576/2021, evidenciando que la ausencia de un marco regulatorio específico constituye el principal obstáculo para el desarrollo de la energía eólica offshore en Brasil. La integración de los tres estudios revela la complejidad del tema y la necesidad de un enfoque multidimensional que contemple aspectos técnicos, ambientales y normativos. Se concluye que el desarrollo sostenible de la energía eólica en el Nordeste requiere: perfeccionamiento de los mecanismos de monitoreo ambiental, implementación de tecnologías avanzadas para mitigación de impactos y establecimiento de un marco regulatorio que proporcione seguridad jurídica a las inversiones, garantizando la protección ambiental y el desarrollo socioeconómico regional.

Palabras clave: Energía eólica, Nordeste brasileño, Impactos ambientales, Sensores remotos, Marco regulatorio.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT** - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABEEólica** - Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias
- ANEEL** - Agência Nacional de Energia Elétrica
- ANP** - Agência Nacional do Petróleo
- BNDES** - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
- EPE** - Empresa de Pesquisa Energética
- FCA** - Ficha de Caracterização da Atividade
- FPE** - Fundo de Participação dos Estados
- FPM** - Fundo de Participação dos Municípios
- GW** - Gigawatt
- IBAMA** - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
- ICMBio** - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
- INEMA** - Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos
- INPE** - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- kW** - Kilowatt
- MME** - Ministério de Minas e Energia
- MW** - Megawatt
- NEXRAD** - Next Generation Weather Radar
- ONS** - Operador Nacional do Sistema Elétrico
- OWP** - Offshore Wind Power (Energia Eólica Offshore)
- PEO** - Potencial Eólico Offshore
- PL** - Projeto de Lei
- RIMA** - Relatório de Impacto Ambiental
- SIN** - Sistema Interligado Nacional
- SPOT** - Satellite Pour l'Observation de la Terre
- TWh** - Terawatt-hora
- WHSRN** - Western Hemisphere Shorebird Reserve Network

LISTA DE FIGURAS E FOTOS

Figura 1 - Projeto Eólico Offshore.....	47
Figura 2 - Migração das aves: uma das grandes maravilhas da natureza.....	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Impactos ambientais RIMA	35
Quadro 2 - Impactos Ambientais Em Parques Eólicos baseado no Termo de Referência do IBAMA para Complexos Eólicos Marítimos.....	49

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS **Erro! Indicador não definido.**

SUMÁRIO **Erro! Indicador não definido.**

CAPÍTULO 1 – MOTIVAÇÃO DO TRABALHO E OBJETIVOS **Erro! Indicador não definido.**

1.1 Contextualização **Erro! Indicador não definido.**

1.2 Justificativa **Erro! Indicador não definido.**

1.3 Problema e sua delimitação **Erro! Indicador não definido.**

1.5 Objetivos **Erro! Indicador não definido.**

1.2 Metodologia **Erro! Indicador não definido.**

1.3 Fundamentação Teórica **Erro! Indicador não definido.**

CAPÍTULO 2 – UMA BRISA DE MUDANÇA: OS DESAFIOS DA ENERGIA EÓLICA NO NORDESTE BRASILEIRO EM BUSCA DE UM FUTURO SUSTENTÁVEL **Erro! Indicador não definido.**

2.1 Introdução **Erro! Indicador não definido.**

2.2 A Energia Eólica no Nordeste brasileiro **Erro! Indicador não definido.**

2.3 Sustentabilidade e Energia Eólica **Erro! Indicador não definido.**

2.4 Análise dos Impactos Ambientais da Energia Eólica no Nordeste do Brasil **Erro! Indicador não definido.**

2.5 Considerações Finais do Capítulo **Erro! Indicador não definido.**

REFERÊNCIAS **Erro! Indicador não definido.**

CAPÍTULO 3 – POTENCIAL DO SENSORIAMENTO REMOTO E DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DOS PARQUES EÓLICOS OFFSHORE DO NORDESTE SOBRE AS AVES MIGRATÓRIAS **Erro! Indicador não definido.**

3.1 Introdução **Erro! Indicador não definido.**

3.2 Ecossistemas Marinhos no Nordeste Brasileiro **Erro! Indicador não definido.**

3.3 Potencial Eólico Offshore (PEO) no Nordeste Brasileiro **Erro! Indicador não definido.**

3.4 Impactos Ambientais de Parques Eólicos Offshore na Costa Nordestina **Erro! Indicador não definido.**

3.5 Sensoriamento Remoto na Costa Nordestina como forma de redução de Impactos em aves migratórias **Erro! Indicador não definido.**

3.6 IA aplicada ao monitoramento ambiental no Nordeste **Erro! Indicador não definido.**

Considerações Finais do Capítulo **Erro! Indicador não definido.**

REFERÊNCIAS **Erro! Indicador não definido.**

CAPÍTULO 4 – BARREIRAS REGULATÓRIAS E ADMINISTRATIVAS PARA INVESTIMENTOS EM ENERGIA EÓLICA OFFSHORE NO BRASIL: PERSPECTIVAS DO PL 576/2021 **Erro! Indicador não definido.**

4.1 Introdução **Erro! Indicador não definido.**

4.2 Conceitos e Tecnologias da energia *offshore* **Erro! Indicador não definido.**

4.3 Marco regulatório internacional para energia eólica offshore**Erro! Indicador não definido.**

4.4 O setor elétrico brasileiro e a inserção da energia eólica**Erro! Indicador não definido.**

4.5 O PL 576/2021 e o Marco Regulatório para energia eólica *offshore* no Brasil**Erro! Indicador não definido.**

4.6 Barreiras administrativas para investimentos energia eólica *offshore***Erro! Indicador não definido.**

4.7 Considerações finais do capítulo**Erro! Indicador não definido.**

REFERÊNCIAS**Erro! Indicador não definido.**

5 ANÁLISE DOS ARTIGOS**Erro! Indicador não definido.**

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**Erro! Indicador não definido.**

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

A transição para fontes renováveis de energia é uma prioridade global, motivada pela crescente demanda energética e pela necessidade de mitigação dos efeitos das mudanças climáticas. Nesse contexto, a energia eólica surge como uma opção estratégica, reunindo vantagens ambientais, econômicas e sociais. O Brasil, devido ao seu vasto potencial natural, destaca-se nesse campo, com ênfase na região Nordeste, que oferece condições favoráveis para o desenvolvimento de projetos eólicos terrestres.

O Nordeste brasileiro possui características que o tornam um importante espaço de geração de energia eólica. A presença de ventos constantes e intensos tem favorecido a implementação de parques eólicos terrestres, promovendo o desenvolvimento socioeconômico e diversificando a matriz energética nacional. Contudo, essa expansão também traz à tona questões socioambientais, como a preservação dos biomas locais e os impactos nas comunidades da região. Simultaneamente, a exploração do potencial offshore emerge como uma fronteira inovadora, com capacidade estimada em 3000 MW.

O Nordeste brasileiro é a principal região produtora de energia eólica do país, concentrando cerca de 85% da capacidade instalada nacional (FIERN, 2020). Essa liderança se deve às condições favoráveis dos ventos, caracterizados por alta velocidade, estabilidade e unidirecionalidade, que resultam em um fator de capacidade médio de **39,8%**, significativamente superior à média global (ABEEólica, 2023).

Em 2023, o Brasil atingiu uma capacidade instalada de energia eólica de aproximadamente **30 GW**, com previsão de recorde anual (ABEEólica, 2023), o que representa aproximadamente 1% da possibilidade capacidade de geração disponível. No Nordeste, estima-se que cerca de **25,5 GW** estejam em operação, representando a maior parte desse total (FIERN, 2020). A região abriga centenas de parques eólicos, com destaque para estados como Rio Grande do Norte, Bahia, Piauí e Ceará, que juntos concentram a maioria dos aerogeradores instalados (FIERN, 2020).

No entanto, avanços nesse segmento enfrentam desafios como a conservação de ecossistemas marinhos mais sensíveis – incluindo recifes de coral e rotas migratórias de aves – e a proteção das atividades de pesca artesanal. Além

disso, a falta de regulamentações específicas para o setor offshore de geração de energia no Brasil é um obstáculo ao aproveitamento desse potencial, demandando avaliações críticas das propostas legislativas em discussão.

Além dos aspectos técnicos e regulatórios, é fundamental considerar a percepção das comunidades locais em relação aos projetos eólicos. A implementação de parques pode gerar divergências sociais, especialmente quando não há diálogo ou mecanismos de compensação adequados para populações diretamente afetadas ou que se julgam prejudicadas. Processos participativos, que integrem as perspectivas das comunidades e mitiguem conflitos, são essenciais para assegurar que os benefícios econômicos e sociais se distribuam de forma equitativa, promovendo justiça socioambiental.

Outro ponto relevante é o potencial de inovação tecnológica associado à energia eólica no Brasil. A integração de novas tecnologias, como sistemas de armazenamento de energia e inteligência artificial para gestão operacional, pode elevar a eficiência e a competitividade dos parques eólicos. Investimentos em pesquisa e desenvolvimento, aliados à parcerias com universidades e centros de inovação, podem posicionar o país como líder global em soluções energéticas avançadas, ampliando sua influência no mercado internacional.

A dissertação se estrutura em três artigos independentes e complementares. O primeiro investiga as transformações territoriais e sociais provocadas pelos parques eólicos terrestres no semiárido nordestino, analisando casos emblemáticos e suas implicações para as políticas públicas locais. O segundo artigo mapeia as potencialidades da energia eólica offshore no litoral do Nordeste, considerando aspectos técnicos, ambientais e econômicos específicos da região. O terceiro examina criticamente o quadro normativo atual e as propostas legislativas em discussão, identificando pontos críticos para o desenvolvimento do setor.

1.1 Contextualização

A transição energética global em direção a fontes renováveis emerge como uma das principais respostas aos desafios das mudanças climáticas e da crescente demanda por energia. Neste contexto, a energia eólica tem se destacado como uma das alternativas mais promissoras, apresentando evolução tecnológica consistente e

custos decrescentes de implementação. A trajetória histórica desta fonte energética remonta a tempos antigos, com registros de seu uso anteriores à era cristã em civilizações como Egito, China e Babilônia, inicialmente para navegação e posteriormente em moinhos de vento para processamento de grãos e bombeamento de água (Wade, 2022). O marco da geração elétrica através dos ventos ocorreu em 1883, quando Josef Friedländer construiu a primeira turbina eólica geradora de eletricidade, quatro anos antes do feito geralmente atribuído ao escocês James Blyth (Möllerström et al., 2024). O setor experimentou avanços significativos a partir da década de 1970, impulsionado pela crise do petróleo e pela crescente preocupação ambiental, culminando no atual estágio de desenvolvimento que apresenta turbinas de alta eficiência e capacidade de geração, consolidando a energia eólica como alternativa viável aos combustíveis fósseis no cenário energético global (A. & Dayal, 2024).

O Brasil ocupa posição singular no panorama global da energia eólica, especialmente devido às condições excepcionais encontradas na região Nordeste. Segundo dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2023), o sistema elétrico nordestino corresponde a aproximadamente 26% da geração nacional, com notáveis 90,2% dessa energia proveniente de fontes renováveis, distribuídas entre hidrelétrica (42%), eólica (27,8%), solar (20,4%) e outras fontes (9,8%). Este perfil de geração evidencia o papel estratégico da energia eólica na matriz energética regional e nacional. A região Nordeste reúne características naturais privilegiadas para o aproveitamento eólico, como ventos constantes e de alta intensidade, que favorecem a implementação de parques tanto terrestres quanto offshore. O potencial eólico offshore da região é particularmente expressivo, estimado em 3 TW, com capacidade de produção anual superior a 14.800 TWh nas plataformas de águas rasas, conforme apontam Gorayeb et al. (2022).

O desenvolvimento da energia eólica no Nordeste brasileiro, embora promissor, enfrenta desafios significativos que demandam uma abordagem multidimensional. A expansão do setor requer consideração criteriosa dos impactos socioambientais, incluindo efeitos sobre comunidades tradicionais, ecossistemas sensíveis e rotas migratórias de aves (Gorayeb & Brannstrom, 2020). No âmbito offshore, questões adicionais emergem, como a preservação de recifes de coral, a proteção da pesca artesanal e a necessidade de marcos regulatórios específicos (Xavier et al., 2023). O

PL 576/2021, recentemente aprovado na Comissão de Infraestrutura do Senado, representa um avanço significativo ao propor diretrizes para a exploração de energia eólica em alto-mar, abrangendo áreas do Mar Territorial, da Plataforma Continental e da Zona Econômica Exclusiva (Antas, 2024). Contudo, a efetiva implementação deste marco regulatório demandará harmonização com normas existentes e desenvolvimento de mecanismos eficientes para gestão e monitoramento ambiental (Melcop, 2022). A integração de tecnologias avançadas, como sensoriamento remoto e inteligência artificial, emerge como ferramenta promissora para o monitoramento e mitigação de impactos, especialmente sobre a avifauna marinha, alcançando precisão superior a 99% na identificação de espécies e 87% de acurácia em modelos de IA (Gopalakrishnan et al., 2024).

1.2 Justificativa

A expansão da energia eólica no Nordeste brasileiro representa um tema de pesquisa acadêmica e prática, especialmente considerando o atual contexto de transição energética global e a busca por fontes renováveis de energia. O potencial eólico offshore da região, estimado em 3000 MW (Gorayeb et al., 2022), demanda estudos aprofundados que contemplem não apenas aspectos técnicos e econômicos, mas também impactos socioambientais e questões regulatórias. A compreensão multidimensional destes aspectos poderá servir de entendimento para o desenvolvimento sustentável do setor e para a formulação de políticas públicas efetivas.

Com relação à definição do Nordeste como foco do estudo, justifica-se por suas características únicas para o aproveitamento da energia eólica. Conforme apontam Ortiz e Kampel (2011), a região apresenta condições excepcionais de vento, com velocidades médias entre 7 e 12 m/s a 80 metros de altura, superando índices de países pioneiros no setor. Contribuiu também na delimitação geográfica do objeto de pesquisa, o fato de ser a costa nordestina acolhedora de ecossistemas sensíveis e comunidades tradicionais que podem ser impactados pelo desenvolvimento de parques eólicos offshore, que sugere uma análise criteriosa destes aspectos, a qual possa garantir um desenvolvimento energético crescente e ambientalmente responsável.

O momento atual mostra-se particularmente oportuno para esta investigação,

considerando o recente avanço do marco regulatório do setor com a aprovação do PL 576/2021 na Comissão de Infraestrutura do Senado. Como destacam Xavier et al. (2023), a ausência de regulamentação específica tem sido um dos principais entraves para o desenvolvimento da energia eólica offshore no Brasil. A análise das barreiras regulatórias e administrativas, bem como das possíveis soluções para superá-las, pode contribuir para o aprimoramento do arcabouço legal e institucional do setor.

A incorporação de tecnologias avançadas de monitoramento ambiental, como sensoriamento remoto e inteligência artificial, representa outro viés que justifica esta pesquisa. Estudos recentes demonstram a precisão destas ferramentas na identificação e monitoramento de espécies (Gopalakrishnan et al., 2024), oferecendo novas possibilidades para a mitigação de impactos ambientais. A avaliação do potencial destas tecnologias no contexto específico do Nordeste brasileiro pode contribuir para o desenvolvimento de protocolos mais eficientes de proteção à biodiversidade marinha.

Convém destacar que esta pesquisa se justifica também pela necessidade de produção de conhecimento científico que possa orientar o desenvolvimento do setor eólico tanto onshore como offshore no Brasil. Como apontam Martins et al. (2022), o país possui condições naturais privilegiadas para este tipo de empreendimento, mas carece de estudos abrangentes que integrem aspectos técnicos, socioambientais e regulatórios. A análise plural proposta neste trabalho pretende preencher esta lacuna, fornecendo subsídios para gestores, empresas do setor e comunidade acadêmica, contribuindo assim para o desenvolvimento sustentável da energia eólica offshore no Nordeste brasileiro.

A pesquisa adota uma abordagem qualitativa e quantitativa, fundamentada em revisão bibliográfica sistemática, análise documental e estudo de casos, permitindo uma compreensão abrangente dos aspectos socioambientais, tecnológicos e regulatórios da energia eólica no Nordeste brasileiro.

O estudo é uma tentativa de construir procedimentos a serem empregados, no intuito de criar uma uniformização na transmissão de informações, responsáveis pelos critérios de levantamento e análise de requisitos.

1.3 Problema e sua delimitação

O problema de pesquisa sugere como questão a necessidade de analisar os

desafios e oportunidades do desenvolvimento da energia eólica onshore e offshore no Nordeste brasileiro, considerando seus aspectos técnicos, socioambientais e regulatórios. De acordo com Xavier et al. (2023), apesar do expressivo potencial eólico da região, estimado em 3 TW nas plataformas de águas rasas, existem barreiras significativas para sua plena exploração, incluindo questões ambientais, sociais e marcos regulatórios inadequados.

A delimitação do estudo abrange duas dimensões fundamentais: primeiro, a avaliação dos impactos ambientais dos parques eólicos no ambiente marinho do Nordeste, com ênfase nas rotas migratórias de aves e ecossistemas sensíveis; segundo, a análise do potencial de tecnologias avançadas de monitoramento, como sensoriamento remoto e inteligência artificial, para mitigação destes impactos; e terceiro, o exame das barreiras regulatórias e administrativas que afetam os investimentos no setor, com foco especial no PL 576/2021 (Gorayeb et al., 2022).

O recorte temporal da pesquisa compreende o período de 2019 a 2024, intervalo que abrange importantes marcos no desenvolvimento do setor eólico onshore e offshore no Brasil, incluindo a elaboração e tramitação do PL 576/2021 e a implementação do Decreto nº 10.946/2022 (Melcop, 2022). A delimitação geográfica concentra-se na região Nordeste, dos estados que apresentam maior potencial para desenvolvimento de parques eólicos offshore, como Ceará, Rio Grande do Norte e Bahia (Martins et al., 2022).

Esta dissertação se propõe a responder as seguintes questões específicas: Diante do potencial existente, quais são os principais impactos ambientais dos parques eólicos onshore e offshore sobre a fauna terrestre e marinha no Nordeste brasileiro? Como as tecnologias de sensoriamento remoto e inteligência artificial podem contribuir para o monitoramento e mitigação destes impactos? Quais são as principais barreiras regulatórias e administrativas para o desenvolvimento do setor, e como o PL 576/2021 pode contribuir para superá-las?

1.4 importância do problema

A importância de estudar o desenvolvimento da energia eólica offshore no Nordeste brasileiro transcende a questão energética, englobando aspectos ambientais, sociais e econômicos de significativa relevância para o desenvolvimento

regional e nacional. Como apontam Ferreira et al. (2021), o setor energético brasileiro encontra-se em um momento decisivo de transição, buscando diversificar sua matriz predominantemente hidrelétrica para reduzir vulnerabilidades climáticas e atender à crescente demanda por energia limpa.

O potencial eólico offshore do Nordeste, segundo estudos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), representa uma oportunidade estratégica para o país. A região possui capacidade estimada de geração superior a 700 GW em áreas de até 50 metros de profundidade, volume equivalente a mais de três vezes a atual capacidade instalada do Sistema Interligado Nacional. Esta magnitude evidencia como o aproveitamento adequado deste recurso pode transformar a dinâmica energética nacional e posicionar o Brasil como protagonista global em energia renovável offshore (Xavier et al., 2023).

Os desafios socioambientais associados a este desenvolvimento tornam o estudo ainda mais relevante. Gorayeb e Brannstrom (2020) identificaram impactos significativos dos parques eólicos sobre comunidades tradicionais e ecossistemas costeiros, destacando a necessidade de estabelecer protocolos efetivos de avaliação e mitigação. A preservação da biodiversidade das rotas migratórias de aves e áreas de reprodução de espécies ameaçadas, demanda análises técnicas aprofundadas e desenvolvimento de soluções inovadoras de monitoramento ambiental.

A dimensão regulatória adiciona outra camada de importância ao problema. O recente PL 576/2021 representa uma tentativa de estabelecer marcos legais adequados para o setor, mas sua implementação efetiva requer estudos detalhados sobre suas implicações práticas. Como argumentam Martins et al. (2022), a ausência de regulamentação específica tem sido um dos principais entraves ao desenvolvimento da energia eólica offshore no Brasil, afetando a segurança jurídica dos investimentos e a proteção ambiental.

Estudos do BNDES (2023) estimam que cada gigawatt de energia eólica offshore instalada pode gerar aproximadamente 10.000 empregos diretos e indiretos, além de estimular o desenvolvimento de cadeias produtivas locais e a revitalização de setores como o naval e o metalmeccânico. O desenvolvimento deste setor representa, portanto, uma oportunidade única para promover o desenvolvimento socioeconômico do Nordeste, tradicionalmente marcado por desigualdades regionais.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo geral

O foco principal dessa pesquisa é demonstrar a oportunidade e a complexidade do aproveitamento eólico para fins comerciais desta fonte energética; as peculiaridades de onde ele se dá e os respectivos impactos e as possibilidades de mitigá-los e as definições regulatórias ou legais, subjacentes a esses aproveitamentos.

1.1.2 Objetivos específicos

Sabendo-se, que atualmente, existe uma crescente demanda de produção de energia para atender as necessidades produtivas e humanas, com aceitabilidade por parte dos diversos setores, quer sejam administrativos, sociais e/ou produtivos dos impactos na saúde e ambiental de plantas de geração de energia, este projeto visa alcançar os seguintes objetivos específicos:

1. Identificar problemas estratégicos, econômicos e socioambientais na região nordeste decorrentes de implantação de parques eólicos, *onshore* e *offshore*;
2. Elaborar instrumentos cartográficos dos problemas encontrados;
3. Identificar que tipos de externalidades positivas e negativas estão sendo observadas na geração de energia eólica.

1.2 Metodologia

Esta dissertação por artigos fundamenta-se em três pilares metodológicos complementares: levantamento e revisão sistemática da literatura sobre o tema, extração de informações e dados secundários e análise dos mesmos. Esta estrutura metodológica permite explorar a complexidade da energia eólica *onshore* e *offshore* no Nordeste em suas múltiplas dimensões.

O levantamento bibliográfico foi realizado primordialmente através do Google Acadêmico, complementado por buscas nas bases Web of Science, Scopus e SciELO. Esta escolha permitiu maior abrangência na captação de estudos relevantes, incluindo dissertações, teses e artigos em diferentes idiomas. As

referências bibliográficas foram embasadas por chave de pesquisas tais como: priorização de publicações que abordam energia eólica *onshore e/ou offshore*, suas aplicações, seus impactos e regulamentações, com ênfase em estudos aplicáveis ao contexto brasileiro e sua legislação.

Na etapa documental, examinaram-se EIA/RIMAs de empreendimentos eólicos offshore nordestinos, marcos regulatórios do setor energético e pareceres técnicos de órgãos ambientais. Este material ofereceu dados e informações valiosos sobre o processo de licenciamento e as estratégias de mitigação de impactos ambientais.

Os dados secundários foram obtidos a partir de um conjunto diversificado de fontes institucionais estratégicas. Da ANEEL, foram extraídos dados sobre capacidade instalada, projetos em desenvolvimento e informações do atlas eólico nacional. As projeções de demanda energética e estudos de viabilidade técnica foram coletados junto à EPE, enquanto da SUDENE obtiveram-se os indicadores socioeconômicos das regiões impactadas pelos empreendimentos. Os relatórios técnicos do IBAMA e ICMBio forneceram informações cruciais sobre impactos ambientais e biodiversidade marinha. Para compreensão das tendências globais do setor eólico offshore, foram consultados relatórios do Global Wind Energy Council (GWEC). Complementarmente, dados sobre regime de ventos e condições oceanográficas foram obtidos através de diversos centros de pesquisa meteorológica. Este conjunto de informações forneceu base empírica sólida para as análises desenvolvidas nos três artigos.

Para cada capítulo que compõe esta dissertação, foram empregadas abordagens metodológicas específicas, adequadas aos seus objetivos particulares. O primeiro capítulo, focado no potencial e nos impactos socioambientais da energia eólica terrestre, utilizou principalmente análise documental de EIA/RIMAs e revisão sistemática de estudos de caso, complementadas por dados socioeconômicos das regiões afetadas. A metodologia incluiu a categorização dos impactos identificados e análise das medidas mitigatórias propostas nos documentos técnicos.

O segundo capítulo, que aborda os desafios tecnológicos e ambientais dos parques eólicos offshore, baseou-se em análise comparativa de experiências internacionais e estudos técnicos sobre as condições específicas do litoral nordestino. Foram examinados dados oceanográficos, meteorológicos e de biodiversidade marinha, além de relatórios sobre tecnologias disponíveis e em

desenvolvimento para o setor offshore.

O terceiro capítulo, dedicado às questões regulatórias, empregou metodologia de análise jurídica comparada, examinando marcos regulatórios internacionais e sua aplicabilidade ao contexto brasileiro.

A combinação destas abordagens proporcionou uma visão abrangente do objeto de estudo. O arcabouço teórico-conceitual, as evidências empíricas retiradas da literatura e os aspectos normativos e, sustentam as análises desenvolvidas nos três artigos, cada qual enfatizando aspectos específicos conforme seus objetivos.

Os desafios metodológicos encontrados, como acesso limitado a determinados dados e documentos técnicos, foram contornados pela amplitude das fontes consultadas. A abordagem qualitativa adotada mostrou-se adequada ao caráter exploratório da pesquisa, permitindo compreender as nuances deste setor em desenvolvimento.

1.3 Fundamentação Teórica

A análise integrada dos aspectos socioambientais, tecnológicos e regulatórios da energia eólica onshore e offshore no Nordeste brasileiro emerge como um tema de extraordinária relevância no atual cenário energético global. O Brasil, com sua extensa costa marítima e condições climáticas favoráveis, apresenta um potencial significativo para o desenvolvimento da energia eólica offshore, especialmente na região Nordeste. Este potencial, estimado em centenas de gigawatts, coloca o país em posição estratégica para liderar o desenvolvimento desta tecnologia no hemisfério sul. No entanto, a implementação bem-sucedida de parques eólicos offshore demanda uma compreensão aprofundada e integrada dos marcos regulatórios, das tecnologias de monitoramento ambiental e dos procedimentos de licenciamento, elementos que se entrelaçam de forma complexa e demandam uma análise multidimensional.

Do ponto de vista acadêmico, esta pesquisa oferece uma contribuição original ao campo do direito ambiental e energético ao examinar o emergente marco regulatório da energia eólica offshore no Brasil, com particular atenção ao PL 576/2021. A análise das barreiras administrativas e dos requisitos legais para implementação de parques eólicos offshore preenche uma lacuna importante na

literatura jurídica nacional, especialmente considerando o caráter pioneiro desta modalidade energética no país. Além disso, o estudo da aplicação de tecnologias avançadas de sensoriamento remoto e inteligência artificial no monitoramento ambiental representa uma interface inovadora entre direito e tecnologia, contribuindo para o desenvolvimento de protocolos mais eficientes de proteção à biodiversidade marinha. A investigação dos procedimentos de licenciamento ambiental, por sua vez, oferece subsídios valiosos para o aperfeiçoamento dos instrumentos regulatórios e das práticas de gestão ambiental no setor.

A motivação para esta pesquisa emerge da singular posição do pesquisador na intersecção entre a prática jurídica no setor energético e o estudo acadêmico de questões territoriais e ambientais. A experiência profissional com questões de servidão e desapropriação em uma empresa do setor de gás natural, aliada à participação em comitê de inovação, proporciona uma perspectiva privilegiada sobre os desafios técnicos e jurídicos da implementação de novos empreendimentos energéticos. Esta experiência, combinada com a formação jurídica e o interesse em tecnologia, permite uma abordagem única que integra aspectos práticos e teóricos do desenvolvimento da energia eólica offshore (ABEEólica, 2023). Portanto, concatenado com as *expertises* apreendidas no mestrado em Território, Ambiente e Sociedade constrói-se o arcabouço teórico-metodológico necessário para analisar as complexas interações entre desenvolvimento energético offshore, conservação da biodiversidade marinha e regulação ambiental.

Considerando este contexto, a presente pesquisa tem como objetivo geral analisar de forma integrada os aspectos socioambientais, tecnológicos e regulatórios da implementação de parques eólicos no Nordeste brasileiro.

A fim de alcançar este objetivo, FIERN (2020) estabeleceu uma série de desafios para estabelecer critérios embasados em uma legislação apropriada que discuta a questão do marco regulatório vigente e projetado para energia eólica no Brasil, identificando principais requisitos legais, barreiras administrativas e propostas de aperfeiçoamento a partir do PL 576/2021.

Portanto, o presente trabalho tenta avaliar a aplicabilidade e eficácia das tecnologias de sensoriamento remoto e inteligência artificial no monitoramento ambiental de parques eólicos offshore no Nordeste, com foco em rotas migratórias e biodiversidade marinha, fundamentado na revisão bibliográfica, principalmente em ABEEólica(2023).

CAPÍTULO 2 – UMA BRISA DE MUDANÇA: POTENCIAL E DESAFIOS DA ENERGIA EÓLICA NO NORDESTE BRASILEIRO EM BUSCA DE UM FUTURO SUSTENTÁVEL

Resumo

O artigo explora a expansão da energia eólica no Brasil, com ênfase na região Nordeste, reconhecida por seu elevado potencial para essa fonte renovável. A análise fundamenta-se na necessidade de fontes de energia limpa para suprir a crescente demanda nacional e promover o desenvolvimento sustentável. O texto aborda nos impactos ambientais e econômicos resultantes da instalação de parques eólicos, destacando as consequências para a biodiversidade e as comunidades locais. O principal objetivo é investigar como a expansão dessa modalidade energética influencia os habitats naturais, seres vivos como aves e morcegos, e os moradores das áreas adjacentes, ao mesmo tempo em que avalia os benefícios econômicos e sociais, como a criação de empregos e a diversificação da matriz energética. A metodologia adotada consiste em uma revisão documental, que permitiu a coleta de dados relevantes sobre impactos ambientais, sociais e políticas públicas relacionadas à energia eólica. Conclui-se que, para assegurar um desenvolvimento sustentável, é imprescindível um planejamento mais eficiente, que inclua políticas de mitigação, utilização de tecnologias avançadas e maior engajamento das comunidades locais.

Palavras-chave: Energia eólica, Sustentabilidade, Impactos ambientais, Desenvolvimento energético.

Abstract

The article explores the expansion of wind energy in Brazil, focusing on the Northeast region, recognized for its high potential for this renewable source. The analysis is grounded in the need for clean energy sources to meet the growing national demand and promote sustainable development. The text focuses on the environmental and economic impacts resulting from the installation of wind farms, highlighting the consequences for biodiversity and local communities. The main objective is to investigate how the expansion of this energy modality influences natural habitats, living beings such as birds and bats, and nearby residents, while also evaluating the economic and social benefits, such as job creation and diversification of the energy matrix. The adopted methodology consists of a documental review, which allowed the collection of relevant data on environmental and social impacts and public policies related to wind energy. It is concluded that to ensure sustainable development, more efficient planning is imperative, including mitigation policies, the use of advanced technologies, and greater engagement of local communities.

Keywords: Wind energy, Sustainability, Environmental impacts, Energy development.

2.1 Introdução

Em um cenário global de crescente demanda energética e urgência na busca

por alternativas mais limpas e sustentáveis, a energia eólica destaca-se como uma solução promissora, capaz de impulsionar o desenvolvimento econômico e social com impactos ambientais mínimos. O Brasil, com seu vasto território e condições climáticas favoráveis, possui um potencial eólico notável, especialmente na região Nordeste, que se consolida como um dos principais polos geradores de energia eólica do país.

O Nordeste brasileiro, conhecido por seus ventos fortes e constantes, vislumbra na energia eólica uma oportunidade singular para superar desafios históricos de desenvolvimento socioeconômico, fomentando a geração de empregos, a diversificação da matriz energética e a redução da dependência de combustíveis fósseis. Os parques eólicos, com suas imponentes turbinas, representam não apenas uma fonte de energia limpa, mas também um símbolo de progresso e inovação tecnológica para a região.

Entretanto, é crucial reconhecer que a implantação de parques eólicos, apesar de seu inegável potencial para um futuro mais sustentável, gera impactos socioambientais que demandam avaliações detalhadas para compensações e mitigação. Assim, torna-se essencial garantir que a transição para uma matriz energética mais limpa contribua para o bem-estar das comunidades locais e para a preservação da rica biodiversidade do Nordeste, especialmente do bioma Caatinga, conhecido por sua fragilidade e importância ecológica.

A origem da energia eólica remonta a tempos antigos, com registros de seu uso anteriores à era cristã. Civilizações como Egito, China e Babilônia foram pioneiras na utilização dos ventos para diversos fins (Wade, 2022). Inicialmente, o vento era empregado principalmente como meio de propulsão para embarcações, facilitando o desenvolvimento do comércio e a exploração marítima. Um exemplo notável é a frota liderada por Zheng He da Dinastia Ming no início do século XV, que realizou sete grandes expedições a mais de 30 países da Ásia e África utilizando navios à vela (Wade, 2022). Essa forma de aproveitamento da energia eólica persistiu como principal meio de navegação até o advento dos navios a vapor no século XIX, marcando um longo período em que o vento foi fundamental para o transporte e as trocas comerciais globais.

O desenvolvimento da tecnologia eólica para fins terrestres teve um marco significativo no século VII, com o surgimento dos primeiros moinhos de vento na região atualmente correspondente ao Irã (Who first invented the windmill?, 2022). Essa inovação disseminou-se rapidamente pela Europa, especialmente em áreas com

ventos fortes e constantes, como os Países Baixos. Os moinhos de vento, juntamente com os moinhos d'água, podem ser considerados os primeiros sistemas que substituíram o esforço humano no beneficiamento ou fabricação de bens, iniciando a transição do artesanato para a indústria ao combinar estruturas físicas, fontes de energia, maquinário e mão de obra (Who first invented the windmill?, 2022). No início do século XIV, estima-se que havia entre 10 e 12 mil moinhos na Inglaterra, evidenciando a ampla adoção dessa tecnologia (Who first invented the windmill?, 2022).

A utilização da energia eólica para a produção de eletricidade marca um novo capítulo na história dessa fonte renovável. Contrariando a crença comum, a primeira turbina eólica a gerar eletricidade foi construída em 1883 pelo austríaco Josef Friedländer, quatro anos antes do feito geralmente atribuído ao escocês James Blyth (Möllerström et al., 2024; A. & Dayal, 2024). Em 1919, a turbina dinamarquesa Agricol tornou-se a primeira a ser conectada à rede pública de energia (Möllerström et al., 2024). Apesar desses avanços iniciais, o interesse pela energia eólica para geração elétrica permaneceu modesto até a década de 1970, quando a busca por fontes alternativas de energia revitalizou o setor. Nesse período, enquanto empresas e governos focavam em turbinas de grande escala, foram desenvolvidos modelos menores para o mercado dinamarquês no final dos anos 1970, pavimentando o caminho para a indústria eólica moderna (Möllerström et al., 2024). Desde então, o setor amadureceu significativamente, evidenciado pela evolução tecnológica das turbinas, que hoje apresentam maior eficiência e capacidade de geração, consolidando a energia eólica como uma alternativa viável e sustentável aos combustíveis fósseis no cenário energético global.

Este artigo propõe analisar de forma inicial e exploratória o potencial de geração e os efeitos ambientais dos parques eólicos no ambiente rural do Nordeste brasileiro, buscando alternativas para mitigar impactos e contribuir para a construção de um modelo de desenvolvimento energético sustentável e inclusivo socialmente. Utiliza como metodologia a revisão da literatura e a exploração de controvérsias. Destina-se, principalmente aos policy makers e ao ambiente acadêmico.

2.2 A Energia Eólica no Nordeste brasileiro

A estrutura de geração de energia elétrica do Brasil é de grande porte e mista,

composta por fontes hidrelétrica, termelétrica e eólica, com predominância das usinas hidrelétricas. O Sistema Interligado Nacional (SIN) é conectado nacionalmente e constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte.

A interconexão dos sistemas elétricos, por meio da malha de transmissão, propicia a transferência de energia entre subsistemas, permite ganhos sinérgicos e explora a diversidade dos regimes hidrológicos das bacias. A integração dos recursos de geração e transmissão assegura o atendimento ao mercado com segurança e economicidade.

A capacidade instalada de geração do SIN é majoritariamente composta por usinas hidrelétricas distribuídas em dezesseis bacias hidrográficas nas diferentes regiões do país. Nos últimos anos, a instalação de usinas eólicas, principalmente nas regiões Nordeste e Sul, cresceu significativamente, aumentando a relevância dessa fonte para o atendimento do mercado.

Segundo dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) de 2023, as usinas termelétricas representavam 15% da matriz energética elétrica brasileira, conforme ilustrado no Gráfico 1. Esses empreendimentos estão, em sua maioria, localizados nas proximidades dos principais centros de consumo energético, com predominância na região Sudeste.

A localização estratégica dessas usinas confere-lhes papel significativo para a segurança e estabilidade do SIN. Essa disposição geográfica contribui para a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica, especialmente em períodos de alta demanda ou em situações de contingência no sistema elétrico nacional.

A proximidade dessas unidades geradoras aos centros de carga possibilita uma resposta mais ágil às flutuações de demanda, além de reduzir as perdas associadas à transmissão de energia a longas distâncias, fatores que corroboram para a eficiência e resiliência do sistema elétrico brasileiro.

Conforme relatórios do ONS de 2022 e 2023, as usinas termelétricas operam sob regime de standby, sendo ativadas de acordo com as condições hidrológicas vigentes. Essa estratégia visa otimizar a gestão dos recursos hídricos armazenados nos reservatórios das usinas hidrelétricas, assegurando o fornecimento ininterrupto de energia elétrica e preservando os níveis dos reservatórios. A ativação seletiva das termelétricas constitui um mecanismo de salvaguarda do sistema elétrico nacional, permitindo a manutenção de níveis adequados nos reservatórios hidrelétricos e

contribuindo para a segurança energética em períodos de estiagem ou baixa pluviosidade, refletindo uma gestão integrada dos recursos energéticos para maximizar a eficiência e garantir a continuidade do suprimento elétrico no âmbito do SIN.

De acordo com a legislação brasileira, o sistema elétrico opera em processo de integração com gerenciamento de demanda e geração. Assim, os sistemas de transmissão integram as diferentes fontes de produção de energia e possibilitam o suprimento do mercado consumidor conforme estabelecido pelo ONS.

Segundo o ONS (2022 e 2023), o sistema elétrico do Nordeste corresponde a quase 26% da geração nacional, sendo que 90,2% dessa energia gerada é oriunda de fontes renováveis, distribuídas da seguinte forma:

- 42,00% de origem hidrelétrica;
- 27,80% de origem eólica;
- 20,40% de origem solar;
- 9,80% de origem termoelétricas e biomassa.¹

A energia eólica destaca-se como uma das principais fontes de energia renovável no Nordeste brasileiro, uma região privilegiada por suas condições climáticas favoráveis, onde os ventos são constantes. O desenvolvimento de parques eólicos no Nordeste fortalece a segurança energética do Brasil e impulsiona o crescimento econômico regional, gerando empregos e estimulando a infraestrutura local.

No contexto da sustentabilidade, a energia eólica se apresenta como uma solução eficaz para enfrentar os desafios ambientais contemporâneos. A geração de energia a partir do vento preserva os recursos naturais e reduz o impacto ambiental, além de promover a conservação dos ecossistemas locais.

Estudos de Gorayeb et al. (2023), Carneiro et al. (2023) e Machado & Serrano (2023) indicam que a energia eólica pode ter impactos que merecem atenção. Esses estudos sugerem considerar efeitos sociais, na saúde e no meio ambiente ao planejar novos parques eólicos. A expansão desses parques poderia se beneficiar de um

¹ Estas são acionadas principalmente em períodos de baixa geração eólica ou solar, ou durante estiagens prolongadas. As usinas de biomassa no Nordeste, atualmente, usam bagaço de cana(ONS, 2023).

planejamento que leve em conta tanto os impactos positivos em termos ambientais, como a geração de empregos e renda, quanto os possíveis impactos negativos na biodiversidade e nas comunidades locais.

2.3 Sustentabilidade e Energia Eólica

A definição de desenvolvimento sustentável emergiu com destaque na década de 1980, quando a preservação ambiental começou a ocupar um lugar central na agenda global. Definido pela *World Commission on Environment and Development*, o conceito refere-se a atender às necessidades presentes sem comprometer a capacidade das futuras gerações de satisfazerem suas próprias necessidades (Hilson e Murck, 2000). Essa definição sublinha a harmonização do crescimento econômico com a conservação dos recursos naturais e a proteção ambiental. Sachs (2015) complementa essa visão ao afirmar que o desenvolvimento sustentável integra questões econômicas, sociais e ambientais, visando garantir qualidade de vida para gerações atuais e futuras.

O conceito surgiu como uma resposta às crescentes preocupações ambientais e socioeconômicas globais. Definido no relatório *Brundtland* de 1987, desenvolvimento sustentável é "satisfazer as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atenderem suas próprias necessidades". Este princípio baseia-se em três pilares fundamentais: ambiental, social e econômico. A importância das fontes de energia renováveis, como a eólica, destaca-se nesse contexto devido à sua capacidade de fornecer energia limpa e reduzir a emissão de gases de efeito estufa. As energias renováveis, incluindo a eólica e a solar, ganharam centralidade no debate sobre sustentabilidade por serem limpas e renováveis, além de contribuírem significativamente para a redução das emissões atmosféricas de gases poluentes (Noronha et al., 2021).

A abordagem interdisciplinar e participativa é essencial para alcançar o desenvolvimento sustentável, considerando as práticas culturais e sociais locais (Sachs, 2015). Diversos teóricos evoluíram o conceito nessa perspectiva. Sen (1997) amplia a ideia de sustentabilidade ao enfatizar que a liberdade no desenvolvimento vai além do crescimento econômico, incorporando a capacidade das pessoas de viverem vidas que valorizam. Para Sen (1997), a liberdade de escolha, participação política e garantia de direitos básicos são cruciais para um desenvolvimento

genuinamente sustentável (School et al., 2013). Na pesquisa de Silva e Baiardi (2022), o conceito de sustentabilidade refere-se à capacidade de utilizar recursos naturais de maneira contínua e equilibrada, sem prejudicar o meio ambiente ou comprometer as futuras gerações. Isso inclui a integração equilibrada dos aspectos ambientais, econômicos e sociais.

A perspectiva de Leff (2003) reforça a importância de uma abordagem que considere, além dos aspectos econômicos e ambientais, as questões sociais e culturais. Essas diversas abordagens evidenciam a complexidade do conceito de desenvolvimento sustentável, que continua a se aprimorar e adaptar às novas realidades. A interdependência dos desafios ambientais, sociais e econômicos é sublinhada pelas ideias de Ostrom (2009), que destaca a importância da governança descentralizada e da cooperação entre usuários locais para a sustentabilidade a longo prazo. Essa evolução do conceito demonstra que o desenvolvimento sustentável requer uma compreensão holística das interações entre sociedade, economia e meio ambiente.

A energia eólica, parte integrante da matriz energética, tem se mostrado uma opção estratégica para governos e empresas que buscam soluções sustentáveis, alinhadas às recomendações dos protocolos ambientais para redução das emissões de carbono. Sua capacidade de crescimento e a adoção de inovações tecnológicas a posicionam como uma das principais fontes de energia renovável no cenário global.

Conforme dados da Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias (ABEEólica) de 2022 e estudos de Noronha et al. (2021), os comitês Europeu e Americano projetam que, até 2050, as fontes eólicas e solares deverão compor cerca de 70% da matriz energética global. Essas estimativas apontam para uma transição na composição do abastecimento energético mundial nas próximas décadas. A perspectiva sugere uma reorientação dos investimentos e das políticas energéticas globais em direção a essas tecnologias renováveis, potencialmente alterando o modelo atual de geração e distribuição de energia elétrica internacionalmente. Esses dados resultam dos benefícios ambientais e da redução da dependência de combustíveis fósseis, características essenciais para a promoção do desenvolvimento sustentável. A energia eólica, em particular, destaca-se por sua pegada de carbono quase nula durante a operação, tornando-se uma das formas mais eficientes de reduzir os impactos ambientais associados à geração de energia (Manhães et al., 2021).

A pegada de carbono é uma medida que quantifica a quantidade total de gases de efeito estufa (GEE), expressa em equivalente de dióxido de carbono (CO₂e), emitidos direta ou indiretamente por atividades humanas, como produção, consumo, transporte ou estilo de vida. Esses gases incluem, além do CO₂, metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e outros, cuja emissão contribui para o aquecimento global. A pegada de carbono pode ser calculada para indivíduos, organizações, eventos, produtos ou países, considerando todo o ciclo de vida das atividades envolvidas. (Carbon Trust, 2024)

O Brasil, com uma matriz elétrica predominantemente renovável, tem se beneficiado da expansão da energia eólica. De acordo com dados do ONS de 2023, o Brasil possui uma capacidade instalada de 28,2 GW de energia eólica, posicionando-se como o segundo maior gerador de energia elétrica a partir de parques eólicos, atrás apenas do Uruguai. No contexto global, o Brasil ocupa a oitava posição no ranking de capacidade instalada de energia eólica. Esses dados refletem o desenvolvimento da matriz eólica brasileira e sua relevância no cenário energético nacional e internacional. A implantação de parques eólicos no Nordeste brasileiro, em especial, tem sido vista como uma solução vantajosa, atendendo à crescente demanda energética nacional sem desconsiderar os impactos negativos (Gorayeb e Brannstrom, 2020).

A adoção de tecnologias eólicas é incentivada pela necessidade de mitigar os impactos ambientais das fontes tradicionais de energia. Estudos indicam que a produção de energia eólica não apenas reduz as emissões de CO₂, como também apresenta menores impactos ao longo do ciclo de vida das turbinas, especialmente quando comparada a outras fontes de energia renovável (Manhães et al., 2021). A reciclagem de elementos de terras raras utilizados nas turbinas eólicas é uma prática que aumenta a sustentabilidade desse tipo de geração, diminuindo a dependência de importações e mitigando os impactos ambientais (Manhães et al., 2021).

O desenvolvimento sustentável e a energia eólica estão intrinsecamente ligados na busca por soluções energéticas que atendam às necessidades atuais sem comprometer o futuro. A expansão da energia eólica, impulsionada por inovações tecnológicas e políticas públicas favoráveis, representa uma resposta eficaz às demandas por energia limpa e renovável. A implementação estratégica de parques eólicos, especialmente em regiões com altos potenciais de vento, como o Nordeste brasileiro, deve alinhar o crescimento econômico, com geração de empregos e

aumento de rendas, à sustentabilidade ambiental por meio de estudos para minimizar ou evitar os impactos negativos provocados pela implantação desses parques. Assim, a energia eólica contribui para a diversificação da matriz energética, concomitantemente à promoção de um desenvolvimento mais equilibrado e responsável.

A análise do desenvolvimento sustentável e da energia eólica revela um panorama promissor para a integração de soluções energéticas renováveis que impulsionam o progresso econômico e social sem sacrificar a integridade ambiental. No entanto, a implementação de parques eólicos, especialmente no Nordeste do Brasil, não está isenta de desafios e controvérsias. É imperativo considerar os impactos ambientais e sociais decorrentes dessa expansão, incluindo a transformação do uso do solo, a interferência com a biodiversidade local e as reações das comunidades afetadas. Para compreender plenamente a contribuição da energia eólica para a sustentabilidade, é essencial examinar como esses projetos influenciam o meio ambiente e as populações locais, avaliando tanto os benefícios quanto as adversidades. A seguir, abordaremos detalhadamente os impactos ambientais e sociais dos parques eólicos no Nordeste brasileiro, explorando as dinâmicas de conflito e sustentabilidade que emergem dessa interseção.

2.4 Análise dos Impactos Ambientais da Energia Eólica no Nordeste do Brasil

A energia eólica tem se destacado como uma alternativa para diversificar a matriz energética, oferecendo uma fonte limpa e renovável de eletricidade. No entanto, sua implementação traz desafios ambientais que requerem atenção e estratégias de mitigação eficazes. Um dos principais impactos observados está relacionado à fauna, especialmente aves e mamíferos voadores como os morcegos. A instalação de parques eólicos pode interferir nos habitats naturais, afetando locais de nidificação, alimentação e rotas migratórias. O risco de colisão entre aves e aerogeradores é uma preocupação que tem limitado a expansão mais intensa desse tipo de energia limpa (Faustino, 2023).

Para abordar essa questão, diversos esforços estão sendo realizados para entender e mitigar os riscos das turbinas para as aves. Isso inclui a criação de mapas locais e globais de riscos de colisão (Faustino, 2023). Uma iniciativa notável nesse sentido é o software Avistep, desenvolvido pela organização ambiental Birdlife

International, que mapeia as regiões mais propensas a riscos para as aves, permitindo um uso mais seguro das turbinas (Faustino, 2023). Além disso, o setor está adotando novas tecnologias para tornar as turbinas eólicas mais seguras para os pássaros e morcegos. Mapeamentos atualizados, turbinas inteligentes e até mesmo a inteligência artificial estão sendo utilizados para evitar a morte de aves nos locais onde existem parques eólicos (Faustino, 2023).

Em contrapartida a esses efeitos ambientais que requerem atenção, a energia eólica apresenta vantagens em termos de sustentabilidade ambiental. Os parques eólicos em operação não emitem gases de efeito estufa, contribuindo para a redução das emissões a longo prazo. Estudos indicam que o balanço energético da tecnologia eólica moderna é favorável, com as emissões de CO² associadas à produção, instalação e operação sendo compensadas em poucos meses de funcionamento (Lucena & Lucena, 2019). No entanto, é importante reconhecer que as fases de fabricação, transporte e instalação dos aerogeradores geram emissões de carbono. Para abordar essa questão, a indústria eólica pode adotar práticas mais sustentáveis ao longo de toda a cadeia produtiva, incluindo o uso de materiais reciclados, a otimização dos processos de fabricação e a utilização de meios de transporte mais eficientes.

A implementação bem-sucedida de projetos eólicos requer uma abordagem abrangente que considere tanto os benefícios quanto os potenciais impactos negativos. É crucial buscar constantemente maneiras de mitigar os efeitos adversos, garantindo uma produção responsável que preserve ecossistemas e comunidades (Fernandes & Arrais Júnior, 2017). O envolvimento das comunidades no processo de planejamento e operação dos parques eólicos pode ajudar a identificar e abordar preocupações específicas, promovendo uma coexistência harmoniosa entre a produção de energia e a conservação ambiental.

Com o uso crescente de novas tecnologias, há expectativas de que as preocupações com colisões de aves possam ser significativamente reduzidas no futuro (Faustino, 2023). Ao adotar essas estratégias de mitigação e envolver todas as partes interessadas, a energia eólica pode desempenhar um papel crucial na transição para uma matriz energética mais sustentável, minimizando seus impactos negativos e maximizando seus benefícios para o meio ambiente e a sociedade.

Para fins de análise, foram levantados dados de Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA) dos dez maiores Complexos Eólicos instalados da região Nordeste

IMPACTO AMBIENTAL	FASE(S) DE OCORRÊNCIA	MEDIDAS MITIGADORAS
Afugentamento e deslocamento da fauna	Instalação e Operação	Monitoramento da fauna, afugentamento controlado, manejo e relocação quando necessário
Alteração da cobertura vegetal e supressão da vegetação nativa	Instalação	Realizar supressão apenas quando necessário, restringir às áreas estritamente necessárias, reflorestamento, recuperação de áreas degradadas e compensação ambiental
Alteração da camada superficial do solo, erosão e uso do solo	Instalação e Operação	Adoção de técnicas de manejo sustentável do solo, planejamento de uso do solo, técnicas de controle de erosão (barreiras), gestão adequada
Alteração da paisagem	Operação	Nada a fazer
Alteração de cursos d'água e recursos hídricos	Instalação e Operação	Implantação de sistemas de drenagem eficientes, construção de bacias de contenção, preservação do padrão de escoamento das águas pluviais
Alteração na qualidade do ar (poeira, gases, particulados)	Instalação	Controle de emissão de partículas através de umidificação de vias e áreas expostas, manutenção preventiva de equipamentos
Alteração na recarga do aquífero	Instalação	Preservar o padrão de escoamento das águas pluviais
Aumento do tráfego de veículos	Instalação	Priorizar mobilização em períodos de pouco movimento
Contaminação de solo e água	Instalação e Operação	Controle e gestão de produtos químicos, gestão adequada de resíduos químicos e perigosos, monitoramento
Emissão de ruídos	Instalação e Operação	Instalação de barreiras acústicas, controle de horários de atividades, manutenção de máquinas e equipamentos
Geração de resíduos sólidos	Instalação e Operação	Implementação de plano de gerenciamento de resíduos sólidos
Interferência no patrimônio arqueológico	Instalação	Executar programas de prospecção e resgate arqueológico
Risco de acidentes de trabalho	Instalação	Sinalização de segurança, exames médicos periódicos

Brasileiro, dos últimos cinco anos,

especialmente dos Complexos Lagoa dos Ventos (PI); Campo Largo (BA); OITIS (PI e BA); Rio do Vento (RN); Chafariz (PB); Chapada do Piauí (PI); Ventos do ARARIPE III (PE e PI); Delta do Maranhão (MA); Ventos de São Roque (PI); AROEIRA (BA). (Vide quadro 1)

Quadro 1 – Impactos ambientais RIMA

Fonte: Autor

Após a análise dos impactos ambientais causados durante a fase de instalação de projetos de infraestrutura de complexos eólicos citados acima, o estudo revela diversas consequências diretas ao meio ambiente, especialmente relacionadas à

vegetação, solo e recursos hídricos. Dentre elas, a supressão da vegetação nativa destaca-se como um dos principais impactos, resultando na perda de biodiversidade e na alteração dos habitats. Para mitigar esses efeitos, os relatórios analisados recomendam que a supressão seja restrita às áreas estritamente necessárias, acompanhada de ações de reflorestamento e compensação ambiental. Outro impacto relevante é a possibilidade de alteração da camada superficial do solo, gerando riscos de erosão. Nesse caso, a aplicação de técnicas de manejo sustentável do solo e a implementação de barreiras para controle de erosão são medidas recomendadas para reduzir esses danos.

Outro aspecto significativo na fase de instalação é a interferência nos recursos hídricos, como a alteração de cursos d'água. Para mitigar esses impactos, a implantação de sistemas de drenagem eficientes e a construção de bacias de contenção são medidas adotadas para preservar o padrão natural de escoamento das águas pluviais.

A geração de poeira e a emissão de particulados também afetam a qualidade do ar, sendo necessário o controle rigoroso dessas emissões através da umidificação de vias e da manutenção preventiva dos equipamentos utilizados na obra. Cada uma dessas ações visa minimizar os impactos negativos e garantir uma operação mais sustentável na fase de implantação do projeto.

Os relatórios apontam que, durante a fase de operação, os impactos ambientais tornam-se mais contínuos e prolongados, afetando aspectos como a fauna, a qualidade do ar e o uso do solo. O afugentamento e deslocamento da fauna, que também ocorre durante a instalação, persiste nessa fase, exigindo monitoramento constante e medidas de manejo controlado para reduzir os efeitos sobre os ecossistemas locais. A geração de ruídos durante a operação das instalações, especialmente em atividades industriais, é um impacto relevante, sendo necessário o uso de barreiras acústicas e a realização de manutenção periódica em equipamentos para minimizar a poluição sonora.

Outro impacto significativo durante a operação é a geração de resíduos sólidos, que demanda a implementação de um plano de gerenciamento eficaz para assegurar que os resíduos sejam adequadamente tratados e descartados, evitando a

contaminação do solo e da água. Ademais, a alteração da paisagem é uma consequência inerente à fase operacional, uma vez que a infraestrutura instalada modifica permanentemente o cenário natural. Embora não haja medidas de mitigação diretas para esse aspecto, é essencial que o planejamento inicial tenha considerado a preservação de áreas de valor paisagístico ou cultural sempre que possível.

2.5 Considerações Finais

O presente estudo evidencia o papel central da energia eólica na transição energética sustentável do Brasil, com foco específico no Nordeste, região que se destaca pela abundância de recursos eólicos. A análise revela que a energia eólica é uma alternativa promissora para diversificar a matriz energética, oferecendo uma fonte limpa e renovável de eletricidade. Contudo, conforme apontado por Faustino (2023), sua implementação traz desafios ambientais que demandam atenção e estratégias de mitigação cuidadosamente planejadas.

Um dos principais impactos observados, destacado tanto no texto quanto na tabela de impactos (Quadro 1), está relacionado à fauna voadora, especialmente às aves. Faustino (2023) ressalta que a instalação de parques eólicos pode interferir nos habitats naturais, afetando locais de nidificação, alimentação e rotas migratórias. Este ponto é corroborado pela tabela, que lista "Afugentamento da fauna" e "Deslocamento de fauna local" como impactos significativos tanto na fase de instalação quanto na de operação.

Para abordar essa questão, Faustino (2023) menciona diversos esforços, incluindo a criação de mapas locais e globais de riscos de colisão e o desenvolvimento de tecnologias. Essas iniciativas alinham-se com as medidas mitigadoras listadas na tabela, que incluem "Monitoramento da fauna, afugentamento controlado, manejo e relocação quando necessário". No entanto, é importante notar que a tabela oferece uma visão mais abrangente das medidas mitigadoras, demonstrando a preocupação dos empreendimentos na previsão desses impactos.

Assim, o presente artigo visa proporcionar uma visão mais abrangente das medidas mitigadoras, enriquecendo a discussão existente ao integrar uma análise detalhada dos efeitos ambientais atuais da energia eólica no Nordeste. Essa reflexão evidencia a necessidade de um planejamento integrado que considere tanto a sustentabilidade ambiental quanto o bem-estar das comunidades locais. Dessa forma,

o trabalho contribui para o avanço das discussões sobre a transição energética justa e os desafios que emergem na interface entre tecnologia e sociedade.

Entretanto, é importante reconhecer algumas limitações inerentes à metodologia adotada. A revisão bibliográfica, embora essencial para uma visão abrangente do tema, não abrange todos os efeitos diretos sobre as comunidades afetadas ou sobre a biodiversidade em áreas específicas. Outro desafio enfrentado foi a dificuldade em acessar dados atualizados e específicos sobre o impacto a longo prazo dos parques eólicos na fauna local. A falta de uniformidade nos dados disponíveis em diferentes fontes também representou uma barreira para uma análise comparativa mais robusta.

Para pesquisas futuras, sugere-se a realização de estudos de longo prazo que acompanhem os impactos sociais e ambientais dos parques eólicos ao longo do tempo, especialmente no que diz respeito à saúde das comunidades e à mortalidade de espécies de fauna. Além disso, investigações sobre o processo de consulta prévia e o engajamento das comunidades locais podem oferecer um panorama sobre como garantir que os benefícios econômicos da energia eólica sejam distribuídos de maneira mais equitativa. Por fim, estudos sobre tecnologias emergentes para minimizar os impactos ambientais, como o uso de inteligência artificial na mitigação de colisões de aves, seriam relevantes para aprimorar a gestão sustentável desses projetos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS (ABEEólica). **Boletim anual de produção de energia** – 2022. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2023/06/Boletim-de-Geracao-Eolica-2022.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2023.

AMBIENTE GAIA. **Licenciamento ambiental de parques eólicos no estado da Bahia. Salvador, BA.** Disponível em: <https://www.ambientegaia.com.br/blog/licenciamento-ambiental/licenciamento-ambiental-de-parques-eolicos-no-estado-da-bahia>. Acesso em: 01 out. 2024.

ARAÚJO, A. A.; MOURA, G. J. B. de. A literatura científica sobre os impactos causados pela instalação de parques eólicos: análise cienciométrica. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 13, n. 28, p. 207-223, maio 2017.

BOTASSIO, D. C.; BENEVENUTO, R. G.; TAVARES, F. de S. **Impacto socioeconômico dos parques eólicos: uma avaliação para políticas públicas.** Disponível em: Research Gate. 2022.

BRANDÃO, A. M. S. **A implantação de parques eólicos em Aranaú e as alterações na paisagem e vida comunitária.** Fortaleza: UFC, 2022.

BRANNSTROM, C.; GORAYEB, A.; MENDES, J. S.; LOUREIRO, C.; MEIRELES, A. J. A.; SILVA, E. V.; FREITAS, A. L. R.; OLIVEIRA, R. F. Is Brazilian wind power development sustainable? Insights from a review of conflicts in Ceará state. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 62-71, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.047>.

CARNEIRO, G.; SETE, A.; ZERO, M. **Comunidades rurais do Nordeste enfrentam desafios causados por parques eólicos.** Out. 2023. Mongabay. Disponível em: <https://brasil.mongabay.com/2023/10/comunidades-rurais-do-nordeste-enfrentam-desafios-causados-por-parques-eolicos/>. Acesso em: 27 jun. 2024.

CARVALHO, G. O. **Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável: uma visão contemporânea.** 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.19177/rgsa.v8e12019789-792>.

CEARÁ. **Atlas do potencial eólico do estado do Ceará.** Secretaria de Infraestrutura, Fortaleza, 32 p., 2001.

CER ENERGIA. **Estudo de impacto ambiental (EIA) e relatório de impacto ambiental (RIMA).** Curitiba, PR. Disponível em: <https://www.cer-energia.com.br/eia-rima/>. Acesso em: 01 out. 2024.

CLARK, S. S.; MILES, M. L. **Assessing the integration of environmental justice and sustainability in practice: a review of the literature.** 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su132011238>.

DA SILVA MENEZES, F. O.; GUIMARÃES, M. D. A. Os impactos socioambientais das fontes geradoras de energia alternativa nas comunidades do entorno dos parques eólicos da Serra da Babilônia e da Força Eólica do Brasil. **REMEA - Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental**, v. 39, n. 1, p. 328-349, 2022.

DULLEY, R. D. Noção de natureza, ambiente, meio ambiente, recursos ambientais e recursos naturais. **Agricultura em São Paulo**, São Paulo, v. 51, n. 2, p. 15-26, 2004.

FISCHER, J., et al. Advancing sustainability through mainstreaming a social–ecological systems perspective. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 14, p. 144-149, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.06.002>.

FISHER, R.; URY, W.; PATTON, B. **Getting to yes: negotiating agreement without giving in.** Penguin Books, 1991.

GAST, J.; GUNDOLF, K.; CESINGER, B. **Doing business in a green way: a systematic review of the ecological sustainability entrepreneurship literature and future research directions**. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.065>.

GÊ, D. R. F.; CARVALHO, R. G. de; BRANNSTROM, C.; GORAYEB, A.; SILVA, M. R. F. da. **Análise socioambiental do processo de implantação/operação de usinas eólicas na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual Ponta do Tubarão, Macau/Guamaré, Rio Grande do Norte – Brasil**. *Caminhos de Geografia*, v. 23, n. 85, p. 115-136, 2022. DOI: <http://doi.org/10.14393/RCG238557408>.

GEOCONSULT - PI PROJETOS E SERVIÇOS AMBIENTAIS LTDA. **Estudo de impacto ambiental (EIA) do Complexo Eólico Chapada do Piauí III. Simões e Curral Novo do Piauí, PI, 2015.** Disponível em: https://ewldata.rightsindevelopment.org/files/documents/74/IFC-38774_NliiTsd.pdf. Acesso em: 04 out. 2024.

GORAYEB, A.; BRANNSTROM, C.; MEIRELES, A. J. de A. Impactos socioambientais da implantação dos parques de energia eólica no Brasil. **1ª ed. Coletânea CAPES**. Fortaleza: UFC, 2019.

GORAYEB, A.; BRANNSTROM, C. Licenciamento ambiental e oposição social à energia eólica: estudo de caso com foco no social gap em comunidade litorânea do Ceará, Brasil. **Magazine of Geography** (Recife), v. 37, n. 3, 2020.

GORAYEB, A.; BRANNSTROM, C.; SOARES, M. de O.; XAVIER, T. Desafios sociais e ambientais da energia eólica offshore no Brasil. In: *Descarbonização na América do Sul: conexões entre o Brasil e a Argentina*. Cap XXV. p. 312-325, 2022.

GUIMARÃES, P. R.; FEICHAS, S. A. Q. Desafios na construção de indicadores de sustentabilidade. **Ambiente & Sociedade**, v. 12, n. 2, p. 307-323, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1414-753x2009000200007>.

HAESBAERT, R. Território e descolonialidade: sobre o giro (multi)territorial/de(s)colonial na América Latina. Buenos Aires: **CLACSO**, 2022.

HILSON, G.; MURCK, B. **Sustainable development in the mining industry: clarifying the corporate perspective**. 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s0301-4207\(00\)00041-6](https://doi.org/10.1016/s0301-4207(00)00041-6).

HOFSTAETTER, M.; PESSOA, Z. S. Energia eólica: um novo debate, entre defesas e contradições. In: **VII Jornada Internacional de Políticas Públicas**, São Luís, Maranhão, 2015.

INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E MEIO AMBIENTE DO RIO

GRANDE DO NORTE (IDEMA). **Sistema de licenciamento ambiental** - RIMAS. Natal, RN. Disponível em: <https://sislia.idema.rn.gov.br/rimas/rimas.php>. Acesso em: 01 out. 2024.

INSTITUTO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (INEMA). **Estudo de impacto ambiental dos parques eólicos Serra Negra e Serra Dourada**. Salvador, BA. Disponível em: http://www.inema.ba.gov.br/wp-content/files/EIA_Parques_Elicos_Serra_Negra_e_Serra_Dourada_-_III.pdf. Acesso em: 01 out. 2024.

KALDELLIS, J. K.; APOSTOLOU, D.; KAPSALI, M.; KONDILI, E. Environmental and social footprint of offshore wind energy. Comparison with onshore counterpart. **Renewable Energy**, v. 92, p. 543-556, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.018>.

KEAHEY, J. Sustainable development and participatory action research: a systematic review. **Systemic Practice and Action Research**, v. 34, n. 3, p. 291-306, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11213-020-09535-8>.

LEFF, E. **A complexidade ambiental**. São Paulo: Cortez, 2003.

MACHADO, L.; SERRANO, V. **Depressão, insônia, surdez: o drama dos agricultores que vivem embaixo de parque eólico em cidade de Lula**. BBC News, jan. 2023. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/articles/cglyg8np3mno>. Acesso em: 28 jun. 2024.

MANHÃES, R. R.; LIMA, F. M. da R. de S.; ALVARADO, L. M. T. Uma breve revisão sobre energia eólica, sustentabilidade, reciclagem e suas relações. **XXX Jornada de Iniciação Científica e VI Jornada de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação**, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/2614/1/Renan%20Rodrigues%20Manh%C3%AAs.pdf>.

MEIRELES, A. J. A. **Danos socioambientais originados pelas usinas eólicas nos campos de dunas do Nordeste brasileiro e critérios para definição de alternativas locais**. **Confins**, n. 11, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.4000/confins.6970>.

MIRANDA, J. A.; NASCIMENTO, J. C. **Portugal terra de moinhos**. Lisboa: Chronos Editora, 2008.

MOREIRA, R. N.; BIZARRIA, F. P. de A.; MARQUESAN, F. F. S.; BARBOSA, F. L. S. Sustentabilidade e energia eólica: percepções comunitárias no interior do Ceará - Brasil. **COLÓQUIO - Revista do Desenvolvimento Regional**, v. 14, n. 1, p. 79-97, jul. 2017.

MOREIRA, R. N.; VIDAL, F. A. B.; VIANA, A. F.; OLIVEIRA, D. A. B. Energia eólica no

quintal da nossa casa?! Percepção ambiental dos impactos sociambientais na instalação e operação de uma usina na comunidade de Sítio do Cumbe em Aracati-CE. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 2, n. 1, p. 45-73, jun. 2013.

NETO, M. C. P.; DE OLIVEIRA, D. V.; SILVA, J. V. Os refúgios da biodiversidade no Seridó Potiguar frente à instalação de parques eólicos. **Revista GeoInterações**, v. 8, n. 1, 2024.

NOGUEIRA, L. R. de S.; RIBEIRO, A. Í.; MEDEIROS, G. A.; MARTINS, A. C. G.; LONGO, R. M. Análise integrada dos aspectos e impactos ambientais da atividade operacional em parque eólico no sudoeste da Bahia / Brasil. **Revista Gestão Sustentabilidade Ambiental – UFSC**, Florianópolis, v. 9, n. 4, p. 40-63, out/dez. 2020.

NORONHA, M.; BENFATTI, G.; THEMOTEO, A.; GANNOUM, E. O papel do ecossistema de inovação e a estruturação de um arcabouço regulatório para o mercado de energia eólica offshore no Brasil. **International Journal of Business & Marketing (IJBMKT)**, v. 6, n. 2, p. 32-51, 2021. Disponível em: <https://www.ijbmkt.org/ijbmkt/article/view/219>.

OBSERVATÓRIO DA ENERGIA EÓLICA. **Impactos socioambientais da implantação dos parques de energia eólica no Brasil**. Fortaleza, CE: Universidade Federal do Ceará, 2019. Disponível em: https://www.observatoriodaenergiaeolica.ufc.br/wp-content/uploads/2019/07/livro_web.pdf. Acesso em: 01 out. 2024.

O POVO ON LINE. **Operação Marambaia: 11 condenados por crime ambiental**. Disponível em: <http://www.opovo.com.br/app/opovo/cotidiano/2014/12/03/noticiasjornalcotidiano,3357067/operacao-marambaia-11-condenados-por-crime-ambiental.shtml>. Acesso em: 01 out. 2024.

OLIVEIRA, A. J. D., et al. Cleaner production practices, motivators and performance in the Brazilian industrial companies. **Journal of Cleaner Production**, v. 231, p. 359-369, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.013>.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Relatório consolidado anual de produção de energia elétrica 2022**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/noticias/details.aspx?i=9839>. Acesso em: 20 abr. 2024.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Relatório consolidado anual de produção de energia elétrica 2023**. Disponível em: https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/2023-Relatorio-Anual-acessivel_21032024.pdf. Acesso em: 10 jun. 2024.

OSTROM, E. **A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems**. **Science**, v. 325, n. 5939, p. 419-422, 2009. Disponível em:

<https://doi.org/10.1126/science.1172133>.

PASQUALETTI, M. J. Social barriers to renewable energy landscapes. **Geographical Review**, v. 101, n. 2, p. 201-223, 2011.

PORTO-GONÇALVES, C. W. De caos sistêmico e de crise civilizatória: tensões territoriais em curso. **Territorium**, v. 27(II), p. 5-20, Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2020. Disponível em: <https://territorium.riscos.pt/numeros-publicados/>. DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_27-2_1.

SILVA, C. C.; BAIARDI, A. Desenvolvimento territorial com preceitos de sustentabilidade no trajeto da Ferrovia de Integração Oeste-Leste – FIOL. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 6, e31711629054, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i6.29054>. Acesso em: 01 out. 2024.

SOURCES, P. E. I. **The tragedy of the commons**. 1ª ed. New Jersey: Wiley, 1997.

SACHS, J. D. **The age of sustainable development**. Columbia University Press, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.7312/sach17314>.

SALVIA, A. L., et al. Assessing research trends related to sustainable development goals: local and global issues. **Journal of Cleaner Production**, v. 208, p. 841-849, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.242>.

SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS DO PIAUÍ (SEMAR). **Relatório de impacto ambiental**. Teresina, PI, 2023. Disponível em: <https://siga.semar.pi.gov.br/media/uploads/2023/02/27/822cdd36-778d-4729-89a8-96c745599f91.pdf>. Acesso em: 01 out. 2024.

SEN, Amartya. **On economic inequality**. SCHOOL of Business, London Metropolitan University. Expanded Edition. Oxford: Clarendon Press, 1997.

SUPERINTENDÊNCIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (SEMACE). **EIA/RIMA – estudos e relatórios de impacto ambiental**. Fortaleza, CE. Disponível em: <https://www.semace.ce.gov.br/eia-rima/>. Acesso em: 01 out. 2024.

TERCIOTE, R. A energia eólica e o meio ambiente. In: **Enciclopédia Energética Meio Rural**, v. 4, 2002. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000100002&script=sci_arttext&tlng=pt.

CAPÍTULO 3 – POTENCIAL DO SENSORIAMENTO REMOTO E DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DOS PARQUES EÓLICOS OFFSHORE DO NORDESTE SOBRE AS AVES MIGRATÓRIAS

Resumo

Considerando a expansão dos parques eólicos offshore no Nordeste brasileiro, este artigo avalia o uso de sensoriamento remoto e inteligência artificial para monitorar os impactos ambientais, especialmente sobre aves migratórias. A metodologia inclui levantamentos de Estudos e Relatórios de Impacto Ambiental sobre parques eólicos da região, revisão da literatura científica, análise do estado da arte das tecnologias de monitoramento e descrição das técnicas de sensoriamento e inteligência artificial aplicáveis. Resultados indicam alta precisão (99,93%) na identificação de espécies por sensoriamento remoto e 87% de acurácia em modelos de IA, como YOLOv5, sugerindo potencial para monitoramento ambiental com menor custo e alta confiabilidade.

Palavras-chave: Energia Eólica Offshore; Monitoramento Ambiental; Aves Migratórias; Sensoriamento Remoto; Inteligência Artificial; Impacto Ambiental.

Abstract

Considering the expansion of offshore wind farms in the Brazilian Northeast, this article evaluates the use of remote sensing and artificial intelligence to monitor environmental impacts, especially on migratory birds. The methodology includes surveys on Environmental Impact Studies and Reports on offshore wind farms in the region, a comprehensive review of scientific literature, analysis of the state of the art of monitoring technologies and description of applicable sensing and artificial intelligence techniques. Results indicate high precision (99.93%) in species identification by remote sensing and 87% accuracy in AI models, such as YOLOv5, suggesting potential for environmental monitoring with lower cost and high reliability.

Keywords: Offshore Wind Energy; Environmental Monitoring; Migratory Birds; Remote Sensing; Artificial Intelligence; Environmental Impact.

3.1 Introdução

Os ecossistemas marinhos do Nordeste brasileiro, que abrigam manguezais, recifes de coral e diversas espécies migratórias, enfrentam o desafio da expansão da energia eólica offshore. Este desenvolvimento, embora promissor, pode impactar habitats sensíveis e rotas migratórias de aves marinhas. Estima-se que a capacidade eólica offshore da região alcance 3 TW, com produção média anual superior a 14.800 TWh, atraindo crescente interesse e projetos de expansão. No entanto, a implementação desses parques exige avaliações ambientais rigorosas.

O Nordeste brasileiro destaca-se no cenário energético por seu potencial eólico offshore excepcional. De acordo com Gorayeb et al. (2022), a região possui capacidade estimada de 3 TW, com possibilidade de produção média anual de eletricidade superior a 14.800 TWh nas plataformas de águas rasas. Este potencial tem atraído interesse crescente do setor energético, resultando em um aumento significativo de projetos em fase de licenciamento ambiental, especialmente no estado do Ceará (XAVIER et al., 2023). No entanto, a implementação destes projetos requer uma avaliação criteriosa dos impactos ambientais.

A instalação de parques eólicos offshore pode trazer impactos aos ecossistemas marinhos, afetando habitats como recifes de coral e rotas de aves migratórias. Xavier et al. (2023) destacam efeitos sobre ecossistemas únicos, como tapetes de ervas marinhas, e mudanças nas rotas migratórias da avifauna. Além disso, a pesca artesanal, que sustenta muitas famílias, enfrenta potenciais impactos com mudanças na circulação marinha e restrições de acesso a áreas de pesca." (GRAY et al., 2005). Diante deste contexto, é pertinente avaliar como a literatura científica tem abordado os impactos ambientais dos parques eólicos offshore no Nordeste brasileiro, em especial com relação as aves migratórias, bem como prospectar se existem novas tecnologias de sensoriamento remoto e inteligência artificial que possa dar base científica no monitoramento destes impactos.

O objetivo central deste artigo foi destacar o potencial de novas tecnologias para subsidiar as avaliações e monitoramento de impactos ambientais dos parques eólicos *offshore* sobre aves migratórias no Nordeste brasileiro. Uma revisão da literatura científica sobre o tema informa que tecnologias de sensoriamento remoto e inteligência artificial podem ser ferramentas essenciais nesse processo. Buscou-se sintetizar o conhecimento existente, e propor direções para futuras investigações, fornecendo subsídios para pesquisadores, gestores ambientais e tomadores de decisão no setor energético. A pergunta guia para elaboração do artigo foi: Qual é a eficácia do uso combinado de sensoriamento remoto e IA na detecção precoce de impactos sobre a biodiversidade marinha em áreas próximas a parques eólicos *offshore* no litoral nordestino? Tentando responder a essa pergunta, o estudo procura contribuir para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes para a conservação da avifauna marinha em regiões com crescente desenvolvimento de energia eólica *offshore*.

A metodologia inclui revisão da literatura científica sobre o assunto,

levantamentos de Estudos e Relatórios de Impacto Ambiental sobre parques eólicos offshore da região, análise do estado da arte das tecnologias de monitoramento e descrição das técnicas de sensoriamento e inteligência artificial aplicáveis. Como resultado serão fornecidos subsídios para pesquisadores e gestores ambientais na tomada de decisões informadas sobre o desenvolvimento energético e a conservação ambiental.

3.2 Ecossistemas Marinhos no Nordeste Brasileiro

Os ecossistemas marinhos do Nordeste brasileiro representam uma das regiões mais biodiversas e ecologicamente relevantes do Atlântico Sul. Esta área abriga uma variedade de habitats críticos, incluindo a segunda maior área de manguezais do mundo (SPALDING et al., 2010), a maior extensão de recifes de coral do Atlântico Sul (LEÃO et al., 2019) e vastas pradarias de fanerógamas² marinhas, cuja extensão ainda é subestimada (COPERTINO et al., 2016). A complexidade destes ecossistemas é evidenciada pela presença de bancos de rodolitos³, os mais extensos do planeta (AMADO-FILHO et al., 2012). Esta diversidade de ambientes suporta uma rica fauna marinha, incluindo espécies migratórias de grande porte como mamíferos, aves marinhas e tartarugas, cujas áreas de reprodução, alimentação e berçário são cruciais para sua conservação.

² Fanerógamas, também conhecidas como plantas com sementes ou espermatófitas, são um grupo de plantas vasculares que produzem sementes. O termo "fanerógama" vem do grego e significa literalmente "casamento visível", referindo-se ao fato de que seus órgãos reprodutivos são facilmente observáveis, em contraste com as criptógamas (como musgos e samambaias). As fanerógamas incluem duas grandes divisões: 1. Gimnospermas: plantas com sementes nuas, não encerradas em frutos. Exemplos incluem pinheiros e icadáceas. 2. angiospermas: plantas com flores e sementes protegidas dentro de frutos. Esta é a divisão mais diversa e abundante de plantas terrestres. No contexto marinho, quando falamos de "fanerógamas marinhas", estamos nos referindo especificamente a um grupo de angiospermas que evoluiu para viver totalmente submersas em ambientes marinhos. Estas plantas, muitas vezes chamadas de "gramas marinhas", formam pradarias submarinas que são ecossistemas cruciais em muitas áreas costeiras, incluindo o Nordeste brasileiro.

³ Rodolitos são estruturas marinhas biogênicas formadas por algas vermelhas calcárias de crescimento livre. Estas algas da ordem Corallinales depositam carbonato de cálcio em suas paredes celulares, criando nódulos ou ramificações de formas variadas, geralmente arredondadas ou irregulares. Encontrados em águas rasas a moderadamente profundas das plataformas continentais, os rodolitos desempenham um papel ecológico crucial, formando habitats complexos que suportam alta biodiversidade marinha. AMADO-FILHO et al. (2012) destacam a presença do mais extenso banco de rodolitos do mundo no Nordeste brasileiro, enfatizando sua importância como "biofábricas" de carbonato de cálcio. Estes bancos contribuem significativamente para os ciclos biogeoquímicos oceânicos, capturando e armazenando carbono, além de fornecerem substrato duro em áreas predominantemente arenosas ou lamosas, aumentando assim a complexidade do habitat marinho.

Os meios ambientes da costa nordestina apresentam uma rica biodiversidade e desempenham um papel crucial na manutenção do equilíbrio ecológico da região. Ela é caracterizada por uma variedade de habitats, incluindo recifes de coral, manguezais e extensas áreas de planície costeira, que abrigam uma diversidade de espécies marinhas e terrestres. Esses ecossistemas são interconectados e influenciados por fatores como correntes oceânicas, regimes de marés e padrões climáticos sazonais. Os manguezais, por exemplo, atuam como berçários naturais para diversas espécies de peixes e crustáceos, além de fornecerem proteção contra erosão costeira e servirem como sumidouros de carbono (MEIRELES et al., 2016). Os recifes de coral, por sua vez, abrigam uma variedade de organismos marinhos e desempenham um papel importante na proteção da costa contra a ação das ondas, onde enfrentam problemas decorrentes do aquecimento global e acidificação dos oceanos que afetam estes ecossistemas. De um modo geral, essas perturbações têm resultado em uma perda de biodiversidade local e impactado os estoques pesqueiros, que são vitais para as comunidades de pesca artesanal da região (PRISCILLA et al., 2019). O desequilíbrio ecológico causado por estas pressões tem favorecido a proliferação de certas espécies, como o *Zoantídeo palythoa cf. variabilis*⁴, que ameaça as principais espécies formadoras de recifes. Por outro lado, os manguezais, embora não sejam o foco principal do estudo de PRISCILLA et al. (2019), desempenham um papel crítico na manutenção da saúde dos ambientes marinhos, incluindo os recifes de coral. Eles atuam como filtros naturais de poluentes e fornecem abrigo para uma variedade de espécies marinhas, incluindo peixes, crustáceos e aves. A importância destes ecossistemas se estende além de suas fronteiras imediatas, influenciando a produtividade marinha em uma escala regional e contribuindo para a resiliência costeira contra erosão e eventos climáticos extremos.

A região costeira do Nordeste também é reconhecida como uma importante rota de migração para diversas espécies de aves. Conforme destacado por Nascimento (2021), no litoral da Paraíba as aves são provenientes do hemisfério

⁴ O *zoantídeo Palythoa cf. variabilis* é uma espécie de cnidário marinho pertencente à ordem Zoantharia. Este organismo forma colônias incrustantes em substratos duros em ambientes marinhos rasos, como recifes de coral. O termo "cf." na nomenclatura indica uma incerteza na identificação exata da espécie, sugerindo que é muito similar ou próxima à espécie *Palythoa variabilis*. Como outros membros do gênero *Palythoa*, esta espécie possui tentáculos ao redor da boca para capturar alimento e pode conter palitoxina, uma potente toxina marinha. Sua presença em ecossistemas marinhos contribui para a biodiversidade e complexidade estrutural dos recifes, podendo servir como um indicador das condições ambientais locais.

norte, como o maçariquinho e a andorinha de bando, bem como para espécies consideradas visitantes ocasionais, como as araras. Além disso, espécies do Hemisfério Sul, como a arriboã, também utilizam a região em seus deslocamentos migratórios através do bioma caatinga. Essa diversidade de rotas migratórias ressalta a importância da costa nordestina como um corredor ecológico para diferentes espécies de aves.

O litoral brasileiro, incluindo a costa nordestina, compõe a Rota Atlântica de migração de aves costeiras, com diversos sítios-chave utilizados como áreas de invernagem ou pontos de parada, adjacentes às áreas com potencial eólico offshore. Exemplos notáveis incluem as praias arenosas do Ceará e Rio Grande do Norte, que desempenham um papel fundamental na manutenção dessas populações de aves migratórias (BUGONI et al., 2022). Além disso, a Área de Proteção Ambiental (APA) do Manguezal da Barra Grande, localizada no município de Icapuí, no extremo leste do Estado do Ceará, é reconhecida como um importante ponto de parada para aves limícolas, tendo sido classificada desde 2017 pela Western Hemisphere Shorebird Reserve Network (WHSRN) como um *stopover* de importância regional (BUGONI et al., 2022). (Vide fig. 3.2)



Figura 3.1 - **Projeto Eólico Offshore.**
Fonte: Petrobrás.

3.3 Potencial Eólico Offshore (PEO) no Nordeste Brasileiro

A região Nordeste do Brasil apresenta um elevado potencial para o desenvolvimento de energia eólica *offshore*, devido às suas características geográficas e condições climáticas favoráveis oeste. Neste sentido, o Nordeste se destaca como uma área promissora para a expansão deste modal, devido às suas condições favoráveis de vento e características geográficas. Ortiz e Kampel (2011) identificaram três regiões de alta magnitude de vento no Brasil, com destaque para a margem de Sergipe e Alagoas, e a costa do Rio Grande do Norte e Ceará. Essas áreas apresentam uma média da magnitude do vento *offshore* variando entre 7 e 12 m/s, com valores máximos próximos à costa de Sergipe e Alagoas. Essa combinação de fatores ambientais e potencial energético cria um cenário complexo para o desenvolvimento sustentável na região.

O potencial energético em questão, no Nordeste brasileiro, tem sido objeto de diversos estudos e análises. Gorayeb et al. (2022) destacam que a costa tropical nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste do país possui um alto potencial, estimado em cerca de 3 TW, com mais de 14.800 TWh de produção média anual de eletricidade para as plataformas de águas rasas viáveis. Esse potencial é particularmente notável quando consideramos a velocidade do vento, a profundidade da plataforma e a distância da costa. A Empresa Pública Brasileira de Pesquisa Energética (EPE) apontou em 2020 a existência de um potencial técnico de aproximadamente 700 GW em locais de até 50 m de profundidade e vento de até 100 m de altura. Comparativamente, a região Nordeste se destaca em relação a outras regiões costeiras do país, com os estados de Sergipe, Alagoas, Rio Grande do Norte e Ceará apresentando um maior potencial. Martins (2024) ressalta que o Nordeste combina ventos com velocidade, constância e direção adequadas, além de possuir águas relativamente rasas e proximidade com grandes centros consumidores de energia. O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) corrobora essa informação, indicando que o Nordeste brasileiro possui alguns dos melhores índices de capacidade eólica do mundo, tanto *onshore* quanto *offshore*.

O desenvolvimento da energia eólica *offshore* no Nordeste brasileiro, embora promissor, apresenta desafios significativos relacionados aos impactos ambientais, que serão avaliados a seguir.

3.4 Impactos Ambientais de Parques Eólicos Offshore na Costa Nordestina

A implementação destes complexos na costa nordestina, embora promissora do ponto de vista energético, requer uma análise cuidadosa dos potenciais impactos ambientais, vide quadro 3.1⁵.

Um dos aspectos mais relevantes a ser considerado e que vai ser o objeto deste artigo, é o efeito dessas estruturas nas rotas migratórias de aves marinhas e costeiras. Como destacado por Amaral (2021), o Nordeste do Brasil possui duas rotas principais de migração: a rota Nordeste e a rota Atlântica Ocidental, esta última abrangendo as regiões costeiras do país. A instalação de turbinas eólicas offshore pode representar obstáculos físicos e alterar os padrões de voo dessas aves, potencialmente impactando suas rotas migratórias e áreas de alimentação.

Tabela 2 – Impactos Ambientais Em Parques Eólicos baseado no Termo de Referência do IBAMA para Complexos Eólicos Marítimos

Impacto Ambiental	Descrição	Medida Mitigadora
Ruídos subaquáticos	Afeta peixes, mamíferos marinhos e tartarugas.	Modelagem de emissões sonoras, controle de vibrações e limitação da intensidade de ruídos durante operações.
Turbidez da água	Aumenta durante dragagem, afetando organismos aquáticos e atividades pesqueiras.	Monitoramento e controle da pluma de turbidez, uso de barreiras de contenção.
Mortandade de aves e quirópteros (morcegos)	Risco de colisões com pás das turbinas.	Monitoramento, uso de sistemas de detecção de fauna e paralisação temporária das turbinas.
Impacto visual	Alteração da paisagem, afetando áreas turísticas.	Determinar distanciamento mínimo da costa com base em estudos, e uso de cores que minimizem o impacto visual.
Interferência em rotas de navegação e pesca	Geração de áreas de exclusão e restrição.	Definir rotas alternativas de navegação, e distanciamento de áreas de pesca artesanal.
Interferência em rotas de migração	Afeta mamíferos marinhos, aves e peixes migratórios.	Definir layout das turbinas para evitar corredores migratórios importantes.
Geração de resíduos sólidos	Resíduos gerados nas fases de construção e operação.	Implementar plano de gerenciamento de resíduos sólidos, com reciclagem e descarte adequado.
Efluentes líquidos	Poluição por efluentes gerados durante a instalação e operação.	Implementar sistemas de tratamento e controle de efluentes.
Luminosidade artificial	Afeta padrões de comportamento de fauna, como aves e tartarugas marinhas.	Controle da intensidade e direcionamento da iluminação artificial, conforme legislação específica.
Alteração de habitats bentônicos	Impacto sobre as comunidades bentônicas	Monitoramento ambiental prévio e recuperação de áreas degradadas.

⁵ Disponível em https://www.ibama.gov.br/phocadownload/licenciamento/publicacoes/2020-11-TR_CEM.pdf

	(organismos no fundo do mar).	
Campos eletromagnéticos	Efeitos sobre espécies sensíveis, como tartarugas e peixes.	Implementar medidas de mitigação para minimizar a emissão de campos eletromagnéticos, como isolamento adequado.

Fonte: IBAMA 2020.

O banco dos Cajuais, por exemplo, reconhecido como o banco de algas mais expressivo do Ceará, desempenha um papel crucial na alimentação da fauna marinha, incluindo diversas espécies de aves limícolas⁶ (MEIRELES et al., 2006; MEIRELES et al., 2016). A presença de torres eólicas *offshore* nessa região poderia afetar a disponibilidade de alimento e os padrões de uso do habitat por essas aves. Além disso, os maçaricos e batuíras, que geralmente permanecem no Brasil de setembro a maio, formando bandos mistos de milhares de indivíduos na região da APA do Manguezal da Barra Grande para descanso e alimentação (ICMBIO, 2019), poderiam ser particularmente vulneráveis a essas alterações no ambiente marinho. Portanto, é essencial que o planejamento e a implementação de projetos eólicos offshore na costa nordestina levem em consideração esses aspectos ecológicos, buscando minimizar os impactos sobre as populações de aves migratórias e os ecossistemas marinhos locais.

No Termo de Referência do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) traz como forma de mitigação deste impacto, a definição dos *layout* das turbinas como forma de evitar os corredores de animais marítimos, em especial aves, peixes migratórios e mamíferos marinhos. Contudo torna-se necessário um monitoramento de maior escopo da avifauna migratória costeira.

3.5 Sensoriamento Remoto na Costa Nordestina como forma de redução de Impactos em aves migratórias

O sensoriamento remoto emerge como uma ferramenta promissora para o monitoramento da fauna marinha e aves na Costa Nordestina. Esta tecnologia se destaca por sua capacidade de coletar dados da superfície terrestre sem causar

⁶ Aves limícolas são espécies que vivem e se alimentam em áreas úmidas como praias, mangues e lagoas. Elas têm bicos e pernas compridas, que usam para buscar pequenos invertebrados enterrados na lama ou areia. Estas aves ajudam a indicar a qualidade ambiental dos ecossistemas costeiros.

perturbações aos animais estudados, uma característica decisiva para pesquisas em ambientes sensíveis como o litoral. Os avanços tecnológicos mais recentes nesta metodologia permitem realizar levantamentos a partir de longas distâncias, utilizando sistemas de sensores altamente sensíveis que possibilitam a aquisição de imagens com alta resolução espacial, mesmo em condições de baixa visibilidade, uma característica particularmente relevante para o monitoramento costeiro, onde as condições climáticas podem variar significativamente



Figura 3.2 - **Migração das aves: uma das grandes maravilhas da natureza.**
Fonte: NATIONAL GEOGRAPHIC BRASIL

A tecnologia envolve um sistema sofisticado de imageamento aéreo. Segundo Bakó et al. (2014), o processo utiliza câmeras digitais calibradas de alta velocidade, capazes de realizar exposições de até 1/8000s e produzir 5-7 disparos por segundo. Esta configuração permite mapear a superfície no espectro eletromagnético visível com resolução espacial de até 0,5 cm, sem necessidade de integração temporal ou compensação de movimento frontal. O sistema opera em altitudes de até 800 metros em condições climáticas favoráveis, embora em clima úmido seja recomendável voar mais baixo para manter a qualidade da imagem.

O levantamento aéreo é realizado utilizando aeronaves especialmente modificadas para missões de sensoriamento remoto, como o Piper PA-32 Cherokee Six 300, que oferece estabilidade mesmo em velocidades de 285 km/h. A aeronave é equipada com dois sistemas de câmeras voltados para baixo e detectores adicionais podem ser instalados nas janelas laterais. O sistema elétrico modificado inclui um gerador auxiliar e baterias de armazenamento adicionais, fornecendo até 24V para

operação dos instrumentos. Esta configuração permite cobrir grandes áreas em curto período, minimizando a possibilidade de movimentação dos animais entre as linhas de voo.

A capacidade das imagens aéreas de cobrir extensas áreas de estudo em um único levantamento representa uma vantagem significativa para o monitoramento de populações marinhas. Esta característica permite registrar todos os animais presentes em uma determinada região simultaneamente, oferecendo uma visão abrangente da distribuição e densidade populacional. A metodologia demonstrou alta precisão no reconhecimento e contagem de diferentes espécies de aves, alcançando uma taxa de confiabilidade de 99,93% para algumas espécies, um resultado que sugere grande potencial para aplicação no monitoramento de espécies típicas da costa nordestina.

O processamento das imagens envolve técnicas fotogramétricas avançadas, incluindo ortorretificação após triangulação em bloco e extração do modelo de terreno. O mosaico de ortoimagens é criado através de orientação direta e medição de pontos de controle geodésico, equalização de feixe, extração do modelo digital de terreno, reprojeção de imagens e mosaicagem final. A precisão geométrica do sistema permite um erro máximo de posicionamento de apenas 8 cm, suficientemente preciso para identificação e contagem de indivíduos.

Para maximizar a eficácia dos levantamentos, é recomendado realizar as observações durante o entardecer, quando o movimento das aves é naturalmente reduzido e elas tendem a permanecer em suas colônias. A altitude de voo aproximada de 800 metros mostrou-se ideal para não perturbar os animais, permitindo observações mais naturais de seu comportamento. Esta abordagem não invasiva é particularmente importante para estudos em áreas sensíveis ou protegidas, como unidades de conservação marinha.

O monitoramento efetivo requer uma abordagem sistemática e repetitiva. Os levantamentos devem ser conduzidos múltiplas vezes durante o período reprodutivo, pois uma única observação pode não capturar toda a população de uma colônia. A recomendação é realizar pelo menos três levantamentos em dias consecutivos para obter dados mais precisos sobre o número de indivíduos. Esta metodologia pode ser especialmente útil para monitorar espécies migratórias ou que apresentam padrões sazonais de ocupação do território.

A interpretação das imagens pode ser realizada em diferentes resoluções espaciais, permitindo a identificação precisa de diferentes espécies. Por exemplo,

garças-brancas-grandes podem ser identificadas com certeza em resoluções de 2,5 cm, enquanto gaivotas necessitam de resolução de 2 cm para identificação precisa das marcações das asas. O sistema permite ainda o mapeamento da vegetação e do habitat, contribuindo para uma compreensão mais ampla da ecologia das espécies estudadas. Esta metodologia apresenta uma taxa de confiabilidade superior a 99% para a maioria das espécies estudadas, demonstrando seu potencial para aplicação em programas de monitoramento da biodiversidade costeira.

A aplicação desta tecnologia na Costa Nordeste pode representar um avanço significativo nas práticas de conservação e manejo da fauna marinha. O método permite não apenas a contagem e identificação de espécies, mas também o estudo de padrões comportamentais e uso do habitat. A capacidade de realizar levantamentos sistemáticos sem perturbação física do ambiente oferece novas possibilidades para o monitoramento de longo prazo de populações animais em áreas costeiras, contribuindo para a compreensão das dinâmicas populacionais e para o desenvolvimento de estratégias mais efetivas de conservação.

3.6 IA aplicada ao monitoramento ambiental no Nordeste

O monitoramento ambiental por radar na região Nordeste pode ser implementado com a integração de sistemas de inteligência artificial. No Brasil, diversos órgãos são responsáveis pelo monitoramento ambiental no Nordeste, com destaque para o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), que atuam em nível federal (BRASIL, 2023). Além disso, cada estado possui seu próprio órgão ambiental, como o Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (INEMA) na Bahia (INEMA, 2023).

O sistema NEXRAD⁷, utilizado inicialmente nos Estados Unidos, serve como base metodológica para o desenvolvimento de técnicas adaptadas às condições

⁷ O NEXRAD (Next Generation Weather Radar), de acordo com a NOAA (https://www.weather.gov/jetstream/how_nexrad), é uma rede que compreende 154 estações de radar em todo os Estados Unidos, cada uma gerando centenas de varreduras volumétricas diárias. O sistema utiliza tecnologia Doppler para monitorar condições atmosféricas e movimentação de objetos no ar, incluindo a observação da migração de pássaros ao identificar grandes aglomerados de aves se aproximando e descendo em pontos de parada durante suas rotas migratórias. Este sistema é considerado referência para o desenvolvimento de técnicas de monitoramento ambiental por radar, embora o grande volume de dados gerado represente um desafio para a análise manual, motivando a implementação de soluções baseadas em IA.

brasileiras. De acordo com Mead, Paxton e Sonda (2023), este sistema permite observar grandes aglomerados de aves durante sua migração, identificando pontos de parada e padrões de movimento. A adaptação desta tecnologia para o contexto do Nordeste brasileiro considera particularidades como a presença de rotas migratórias específicas e características atmosféricas locais.

Para complementar o monitoramento por radar, são utilizados diversos satélites. Entre os principais estão o *Landsat*, amplamente utilizado para mapeamentos temáticos e monitoramento ambiental, e os satélites da família SPOT⁸, que operam com sensores ópticos em bandas do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio (EMBRAPA, 2023a; EMBRAPA, 2023b). Além disso, o satélite Meteosat é empregado para o monitoramento atmosférico de uma ampla região, incluindo o Nordeste brasileiro (APAC, 2023).

O processamento destes dados, antes realizado manualmente por técnicos especializados, agora conta com algoritmos de aprendizado de máquina que identificam padrões em varreduras de radar, reduzindo o tempo de análise e aumentando a precisão das observações.

A implementação de redes neurais profundas baseadas na arquitetura Faster R-CNN representa um avanço no processamento de dados de radar meteorológico. Cheng et al. (2021) demonstram que estes modelos incorporam informações espaciais e temporais, permitindo distinguir ecos biológicos de não biológicos com maior precisão. Os resultados obtidos por Perez et al. (2023) indicam um aumento na precisão média de detecção de 47,0% para 54,7% após a inclusão de dados temporais. Esta melhoria possibilita o monitoramento mais preciso das espécies migratórias que utilizam a costa nordestina como rota, auxiliando na preservação destes corredores ecológicos e na compreensão dos impactos das estruturas eólicas offshore sobre os padrões de voo.

O desenvolvimento de algoritmos específicos para as condições do Nordeste considera fatores como alta nebulosidade e características próprias da fauna local. Mead et al (2007) documentam a aplicação de diferentes algoritmos - florestas

⁸ A família de satélites SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) é uma série de satélites de observação da Terra de alta resolução, desenvolvida pela agência espacial francesa CNES. Lançada em 1986, a série SPOT opera com sensores ópticos capazes de capturar imagens nas bandas do visível e infravermelho. Estes satélites são amplamente utilizados para mapeamento, monitoramento ambiental, agricultura de precisão e planejamento urbano, oferecendo resolução espacial que varia de 2,5 a 20 metros, dependendo do modo de operação e da geração do satélite.(AIRBUS, 2023)

aleatórias, máquinas de vetores de suporte e redes neurais - na classificação de alvos de radar. Estes métodos apresentam alta precisão na identificação de aves, embora a diferenciação entre espécies ainda requeira conjuntos de dados de treinamento mais robustos. A integração destes sistemas com dados históricos da região⁹ permite criar modelos mais adaptados às condições locais, melhorando a eficácia do monitoramento ambiental.

A evolução dos sistemas de monitoramento incorporou recentemente o modelo YOLOv5, que segundo Gopalakrishnan et al. (2024), alcança precisão superior a 87% na identificação de espécies. Esta tecnologia auxilia especialmente no acompanhamento de espécies ameaçadas, complementando os dados de radar com análise visual. Dwivedi et al. (2023) ressaltam que esta abordagem permite avaliar o sucesso das estratégias de conservação através do monitoramento contínuo das populações.

As perspectivas futuras do monitoramento ambiental no Nordeste apontam para a integração de múltiplas fontes de dados. Feng et al. (2024) demonstram que as redes neurais convolucionais profundas, combinadas com técnicas de *transfer learning*, oferecem novas possibilidades para o reconhecimento de espécies. Esta integração tecnológica permite criar um sistema mais abrangente de monitoramento, essencial para a preservação da biodiversidade regional em face das mudanças ambientais e do desenvolvimento da energia eólica *offshore*.

3,7 Considerações Finais

Este artigo avaliou se os estudos sobre impactos ambientais de parques eólicos *offshore* sobre aves migratórias no Nordeste brasileiro poderiam ser mais eficientes na eventualidade de utilizarem sensoriamento remoto e inteligência artificial. Com base na metodologia de levantamento de dados nos principais portais de controle e monitoramento de impactos ambientais sobre a vida e comportamento de aves e passáros da região Nordeste, construiu-se uma abordagem direcionada, integrando o conhecimento teórico existente com as tecnologias de ponta para o monitoramento

⁹ A Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), em parceria com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), é responsável pela coleta e manutenção de dados históricos ambientais da região Nordeste, fornecendo uma base sólida para essas análises (SUDENE, 2023).

ambiental. A revisão bibliográfica forneceu o embasamento teórico para a pesquisa, enquanto a análise das tecnologias permitiu avaliar seu potencial para melhorar a mensuração dos impactos deste modal energético e construção de uma aplicação das tecnologias, na contribuição para a identificação de soluções práticas para a conservação da biodiversidade marinha.

Os resultados obtidos demonstram o potencial do uso combinado de sensoriamento remoto e IA para o monitoramento e mitigação dos impactos desses complexos energéticos sobre aves migratórias. Como já informado, o sistema de imageamento aéreo a 800m de altitude alcançou uma taxa de confiabilidade de 99,93% na identificação de espécies, permitindo um monitoramento não invasivo de grandes áreas. Por sua vez as redes neurais Faster R-CNN e o modelo YOLOv5 apresentaram alta precisão na detecção e identificação de espécies, processando eficientemente grandes volumes de dados de radar. A identificação de áreas críticas, como o Banco dos Cajuais (CE) e a APA do Manguezal da Barra Grande, como importantes pontos para aves migratórias, reforça a importância do monitoramento nessas regiões. Essas informações contribuem para a gestão ambiental, fornecendo dados precisos para a tomada de decisão, bem como para o desenvolvimento de estratégias para a redução dos impactos dos parques eólicos em rotas migratórias. O estudo sugere a viabilidade da aplicação dessas tecnologias para a conservação da biodiversidade em áreas de expansão da energia eólica offshore. O que seria um avanço do conhecimento sobre os impactos de parques eólicos offshore na avifauna, oferecendo ferramentas tecnológicas para o monitoramento e a mitigação desses impactos. Apesar dos resultados promissores que o levantamento apontou, algumas limitações devem ser consideradas, como a necessidade de aprimoramento dos algoritmos de IA para lidar com condições climáticas adversas e a disponibilidade de dados de alta resolução para áreas extensas. Sugere-se que em trabalhos futuros sobre a investigação da influência de variáveis ambientais, como ventos e correntes marítimas, no comportamento das aves e levem em consideração a existência dessas ferramentas de sensoriamento remoto e IA. Caso isso possa acontecer, a realização de estudos de longo prazo permitirá avaliar a eficácia das medidas de mitigação implementadas e o desenvolvimento de modelos preditivos para auxiliar na tomada de decisão em relação à localização e operação de parques eólicos offshore, minimizando os impactos sobre as aves migratórias.

REFERÊNCIAS

- AMADO-FILHO, Gilberto M. et al. Rhodolith beds are major CaCO₃ bio-factories in the tropical South West Atlantic. **PloS one**, v. 7, n. 4, p. e35171, 2012. Disponível em <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0035171>. Acesso em: 15 Out. 2024.
- AMARAL, L. N. de S. **Conhecimento ecológico de marisqueiras sobre a dieta de aves limícolas migratórias em Icapuí (Estado do Ceará, Nordeste do Brasil)**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2021. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas). Disponível em <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/60446>. Acesso em: 15 Out. 2024.
- AIRBUS. **Satellite imagery**: SPOT 6/7. 2023. Disponível em: <https://www.intelligence-airbusds.com/imagery/constellation/spot-6-7/>. Acesso em: 12 nov. 2024.
- APAC. **Satélites. 2023**. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/sobre-meteorologia/113-sobre-meteorologia/508-satelites>. Acesso em: 12 nov. 2024.
- BARBIER, E. B. et al. The value of estuarine and coastal ecosystem services. **Ecological Monographs**, v. 81, n. 2, p. 169–193, 2011.
- BRASIL. Governo Federal. Protocolar documentos junto ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBio. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/servicos/protocolar-documentos-junto-ao-instituto-chico-mendes-de-conservacao-da-biodiversidade-icmbio>. Acesso em: 25 abr. 2025.
- BRINK, T. S. T.; DALTON, T. Perceptions of Commercial and Recreational Fishers on the Potential Ecological Impacts of the Block Island Wind Farm (US). **Frontiers in Marine Science**, v. 5, p. 1-13, nov. 2018.
- BAKÓ, G.; TOLNAI, M.; TAKÁCS, A. Introduction and Testing of a Monitoring and Colony-Mapping Method for Waterbird Populations That Uses High-Speed and Ultra-Detailed Aerial Remote Sensing. **Sensors**, v. 14, n. 7, p. 12828-12846, 2014. doi:10.3390/s140712828
- BUGONI, L. et al. Eólicas offshore no Brasil: impactos potenciais, recomendações para o licenciamento e implicações para a conservação das aves marinhas e costeiras. In: CEMAVE. **Relatório de Áreas de Concentração de Aves Migratórias no Brasil**. 4. ed. Cabedelo: CEMAVE/ICMBio, 2022. p. 137-180.
- BUGONI, L. et al. Eólicas offshore no Brasil: impactos potenciais, recomendações para o licenciamento e implicações para a conservação das aves marinhas e costeiras. In: FIALHO, M. S.; GOMES FILHO, A. (Org.). **Relatório de Áreas de Concentração de Aves Migratórias no Brasil**. 4. ed. Cabedelo: CEMAVE/ICMBio, 2022. p. 137-180.
- CHENG, Z. et al. AI for conservation: learning to track birds with radar. **ACM Crossroads Student Magazine**, 2021. doi: 10.1145/3466859
- COPERTINO, M. S. et al. Seagrass and submerged aquatic vegetation (VAS)

habitats off the coast of Brazil: State of knowledge, conservation and main threats. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 64, p. 53–79, 2016. Disponível em <https://doi.org/10.1590/S1679-875920161036064sp2>. Acesso em 10 out. 2024

DWIVEDI, D. N.; MAHANTY, G.; DWIVEDI, V. N. Intelligent Conservation: A Comprehensive Study on AI-Enhanced Environmental Monitoring and Preservation. In: RAJAPPAN, R. C.; GANESH, N. G.; DANIEL, J.; AHMAD, A.; SANTHOSH, R. (Eds.). **The Convergence of Self-Sustaining Systems With AI and IoT**. Hershey: **IGI Global**, 2024. p. 215-226. DOI: 10.4018/979-8-3693-1702-0.ch011. Disponível em: <https://www.igi-global.com/chapter/intelligent-conservation/345513>. Acesso em: 12 nov. 2024.

EMBRAPA. **Landsat**. 2023a. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/landsat>. Acesso em: 12 nov. 2024.

EMBRAPA. **SPOT**. 2023b. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/spot>. Acesso em: 12 nov. 2024.

FARRELL, P. et al. **Development of Mitigation Measures to Address Potential Use Conflicts between Commercial Wind Energy Lessees/Grantees and Commercial Fishermen on the Atlantic Outer Continental Shelf: final report on best management practices and mitigation measures**. Herndon: United States Department of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Office of Renewable Energy Programs, 2014. 98 p. (OCS Study BOEM 2014-654).

FENG, J. et al. Utilizing deep convolutional neural networks and transfer learning for bird species recognition. **[Periódico]**, 2024. doi: 10.1117/12.3038576
GOMES, C. A. A. et al. Variação temporal da meiofauna em área de manguezal em Itamaracá - Pernambuco. **Atlântica**, v. 24, n. 2, p. 89–96, 2002.

GOPALAKRISHNAN, S. et al. Bird Species Detection Using Deep Learning Method. In: 2023 International Conference on Research Methodology in **Knowledge Acquisition, Technology Enhancement and Advanced Applications (RMKATE)**. IEEE, 2023. p. 1-6. DOI: 10.1109/RMKMATE59243.2023.10369870. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/377137006_Bird_Species_Detection_Using_Deep_Learning_Method. Acesso em: 12 nov. 2024.

GORAYEB, A. et al. Desafios sociais e ambientais da energia eólica offshore no Brasil. In: **Descarbonização na América do Sul: conexões entre o Brasil e a Argentina**. 2022. p. 312-328.

GORAYEB, A. et al. Wind power gone bad: Critiquing wind power planning processes in northeastern Brazil. **Energy Research and Social Science**, v. 40, p. 82-88, 2018.

GRAY, T.; HAGGETT, C.; BELL, D. Offshore wind farms and commercial fisheries in the UK: A study in stakeholder consultation. **Ethics, Place and Environment**, v. 8, n. 2, p. 127-140, 2005.

HARALDSSON, M. et al. How to model social-ecological systems?—A case study on the effects of a future offshore wind farm on the local society and ecosystem, and whether social compensation matters. **Marine Policy**, v. 119, p. 104031, 2020.

HERNANDEZ, M. et al. Environmental impacts of offshore wind installation, operation and maintenance, and decommissioning activities: A case study of Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 144, p. 110994, 2021.

IBAMA. **Diretrizes para avaliação de impactos de projetos de geração de energia eólica offshore sobre a avifauna**. Brasília, 2020.

INEMA. Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. 2023. Disponível em: <http://www.inema.ba.gov.br/>. Acesso em: 12 nov. 2024.

LEÃO, Z. M.; KIKUCHI, R. K.; OLIVEIRA, M. D. The Coral Reef Province of Brazil. In: SHEPPARD, C. (Ed.). **World seas: An environmental evaluation: Volume I: Europe, the Americas and West Africa**. 2. ed. : Academic Press, 2019. p. 813–833.

LESSA, R. P. et al. Multidimensional analysis of fishery production systems in the state of Pernambuco, Brazil. **Journal of Applied Ichthyology**, v. 25, n. 3, p. 256–268, 2009.

LUZ, C. D. da et al. Avaliação dos impactos ambientais em parques eólicos offshore e onshore utilizando a Matriz de Leopold. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 55, p. 206-225, 2020. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820200644>
MACHADO, J. T. M.; GARCÍA, M. de A. Parques Eólicos Offshore e o Setor de Turismo & Recreação: Uma Revisão de Conflitos e Sinergias. **Revista Costas**, n. esp. 2, p. 315-332, 2021. doi: 10.26359/costas.e1521

MARTINS, C. B. V. **Simulação de Instalação de Fundações de Aerogeradores Offshore: Proposta de Método**. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2024. 57 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção). Disponível em <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/60008>. Acesso em 10 out. 2024

MEAD, R.; PAXTON, J.; SOJDA, R. S. **Identifying Biological Echoes in Radar Scans Using Machine Learning**. 2007.

MEAD, R. et al. **Radar target classification of birds using support vector machines and neural networks**. Remote Sensing of Environment, v. 106, n. 2, p. 266-281, 2007.

MEDEIROS, C. et al. The Itamaracá estuarine ecosystem, Brazil. In: SEELIGER, U.; KJERFVE, B. (Ed.). **Coastal marine ecosystems of Latin America**. Berlin: Springer, 2001. p. 71–81.

MOURA, R. L. et al. An extensive reef system at the Amazon River mouth. **Science Advances**, v. 2, n. 4, p. 1–12, 2016. Disponível em

<https://doi.org/10.1126/sciadv.1501252>. Acesso em 10 out. 2024.

NASCIMENTO, P. C. S. **Aves migratórias do Estado da Paraíba**. Cuité: Universidade Federal de Campina Grande, 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Ciências Biológicas).

NATIONAL GEOGRAPHIC BRASIL. **Migração das aves: uma das grandes maravilhas da natureza**. 2021. Disponível em: <https://www.nationalgeographicbrasil.com/animais/2021/05/migracao-das-aves-e-uma-das-grandes-maravilhas-da-natureza-entenda-esse-fenomeno>. Acesso em: 25 out. 2024.

NEVES, C. F.; GUIMARÃES, R. C.; AGUILERA, L. Considerações sobre o clima de ondas na costa brasileira para o projeto e dimensionamento de parques eólicos offshore. In: CONGRESSO BRASIL WIND POWER, 2023, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Canal Energia, 2023. p. 1-14.

ORTIZ, G. P.; KAMPEL, M. Potencial de energia eólica offshore na margem do Brasil. In: **Oceanografia e Políticas Públicas**. Santos, 2011.

PACHECO, J. E. V. et al. O panorama atual da energia eólica no Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 12, p. 10-26, jul. 2024.

PEREZ, G. et al. **Usando informações espaço-temporais em dados de radar meteorológico para detectar e rastrear poleiros de pássaros comunitários**, 2023.

PETROBRAS. **Energia eólica offshore no Brasil: conheça nossos projetos**. 2023. Disponível em: <https://nossaenergia.petrobras.com.br/w/transicao-energetica/energia-eolica-offshore/acordo-equinor>. Acesso em: 25 out. 2024.

PLATIS, A. et al. First in situ evidence of wakes in the far field behind offshore wind farms. **Scientific Reports**, v. 8, p. 2163, 2018.

SANTOS, S. A. **Diagnóstico socioeconômico dos pescadores artesanais de lagosta em Fortaleza, CE**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2018. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Pesca).

SILVA, E. et al. Space-time analysis of environmental changes and your reflection on the development of phenological of vegetation of mangrove. **Journal of Agriculture and Environmental Sciences**, v. 4, n. 1, p. 245–253, 2015.

SILVA-FALCÃO, E. C.; SEVERI, W.; ARAUJO, M. E. de. Spatial–temporal variation of Achirus larvae (Actinopterygii: Achiridae) in mangrove, beach and reef habitats in north-eastern Brazil. **Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom**, v. 93, n. 2, p. 381–388, 2013.

SOARES, M. de O.; XAVIER, T. Desafios Sociais e Ambientais da Energia Eólica Offshore no Brasil. In: **Descarbonização na América do Sul: conexões entre o Brasil e a Argentina**. [S.l.: s.n.], 2024. p. 312-328.

SPALDING, M. D.; KAINUMA, M.; COLLINS, L. **World Atlas of Mangroves**. London: Earthscan, 2010.

VAN ERP, J. A. et al. A framework for post-processing bird tracks from automated tracking radar systems. **Methods in Ecology and Evolution**, 2023. doi: 10.1111/2041-210x.14249

XAVIER, T.; GORAYEB, A.; BRANNSTROM, C. Energia eólica offshore e pesca artesanal: impactos e desafios na costa oeste do Ceará, Brasil. In: MUEHE, D.; LINS-DE-BARROS, F. M.; PINHEIRO, L. S. (org.). **Geografia marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos**. Rio de Janeiro: Caroline Fontelles Ternes, 2020. p. 608-631.

XAVIER, T.; GORAYEB, A.; BRANNSTROM, C. Parques eólicos marítimos (offshore) como fronteira energética? Impactos e sinergias com os aspectos socioambientais e a atividade pesqueira no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Energia**, v. 3, p. 11-42, 2023.

XAVIER, T.; GORAYEB, A.; BRANNSTROM, C. Parques eólicos marítimos (offshore) como fronteira energética? Impactos e sinergias com os aspectos socioambientais e a atividade pesqueira no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Energia**, v. 29, n. 3, p. 11-42, 2023.

ZHANG, Y. et al. Offshore wind farm in marine spatial planning and the stakeholder's engagement: Opportunities and challenges for Taiwan. **Ocean & Coastal Management**, v. 149, 2017.

CAPÍTULO 4 – BARREIRAS REGULATÓRIAS E ADMINISTRATIVAS PARA INVESTIMENTOS EM ENERGIA EÓLICA OFFSHORE NO BRASIL: PERSPECTIVAS DO PL 576/2021

Resumo

Esta artigo examina os obstáculos regulatórios e administrativos que afetam os investimentos em energia eólica offshore no Brasil, analisando especialmente o PL 576/2021. O setor apresenta potencial estratégico para a diversificação da matriz energética brasileira e o desenvolvimento regional, mas enfrenta desafios decorrentes da inexistência de um marco regulatório específico. O estudo avalia a eficácia do PL 576/2021 em estabelecer a segurança jurídica necessária para atrair investimentos. A metodologia combinou revisão bibliográfica e análise legislativa. Os resultados apontam que a carência de um marco regulatório constitui o principal entrave ao desenvolvimento do setor, somada a conflitos legais e à complexidade dos processos administrativos. O PL, que acabou de ser aprovado na Comissão de Infraestrutura do Senado e seguirá para votação no Plenário, representa um movimento positivo, porém sua efetividade dependerá da implementação criteriosa e da harmonização com o ordenamento jurídico vigente.

Palavras-chave: Energia eólica offshore. Marco regulatório. PL 576/2021. Segurança jurídica. Investimentos.

Abstract

This article aims to investigate the regulatory and administrative obstacles that affect investments in offshore wind energy in Brazil, with a special focus on a draft of a proposed law presented to parliament, a Bill 576/2021. The sector has strategic potential for diversifying the Brazilian energy matrix and regional development but faces challenges due to the lack of a specific regulatory framework. This text assesses the effectiveness of Bill 576/2021 in establishing the legal certainty necessary to attract investments. The methodology combined a literature review and legislative analysis. The results indicate that the lack of a regulatory framework is the main obstacle to the development of the sector, together with legal conflicts and the complexity of administrative processes. The Bill 576/2021 represents a positive move, but its effectiveness will depend on careful implementation and harmonization with the current legal system.

Key words: Offshore wind energy. Regulatory framework. Bill 576/2021. Legal certainty. Investments.

4.1 Introdução

O cenário global de transição energética tem intensificado a busca por fontes renováveis, impulsionado pela necessidade de redução das emissões de gases de

efeito estufa e pelo aumento contínuo da demanda por energia. Neste contexto, a energia eólica offshore destaca-se por seu elevado potencial de geração, aproveitando as características favoráveis dos ventos marítimos.

O Brasil reúne condições naturais excepcionais para o aproveitamento desta fonte energética. Com uma costa que se estende por mais de 7.400 quilômetros, o país conta com ventos que atingem velocidades médias entre 7,0 e 12,0 m/s a 80 metros de altura, conforme dados da Empresa de Pesquisa Energética, EPE (2023). Este potencial é superior ao de nações pioneiras no setor, como Dinamarca e Reino Unido, que já operam parques eólicos offshore consolidados com capacidade de 2.3 GW e 10.5 GW respectivamente, resultantes de investimentos que totalizam €8,5 bilhões e £22 bilhões, respectivamente. As primeiras iniciativas brasileiras incluem o projeto experimental da Petrobras no Rio Grande do Norte, que prevê uma capacidade de 5 MW e aguarda licenciamento ambiental do IBAMA desde 2018, além do complexo Asa Branca, que planeja instalar 720 MW na costa cearense e se encontra em fase preliminar de estudos ambientais.

No entanto, o desenvolvimento do setor esbarra na ausência de regulamentação específica. O panorama atual caracteriza-se pela complexidade dos trâmites administrativos, pela sobreposição de atribuições entre órgãos reguladores e por indefinições jurídicas que inibem investimentos expressivos. Neste panorama, o Projeto de Lei 576/2021 emerge como uma proposta para estabelecer as bases regulatórias necessárias ao desenvolvimento do setor.

Diante deste cenário, este estudo tem como objetivo avaliar a efetividade do PL 576/2021 em promover a segurança jurídica e atratividade de investimentos em energia eólica offshore no Brasil. Para tanto, empregou-se metodologia baseada em revisão bibliográfica sistemática e análise legislativa detalhada, examinando a literatura especializada, marcos regulatórios internacionais e a legislação brasileira pertinente. O trabalho contribui para o campo ao identificar os principais entraves regulatórios e administrativos que afetam o setor, oferecendo subsídios para o aperfeiçoamento do marco legal em desenvolvimento e para a elaboração de políticas públicas mais efetivas.

4.2 Conceitos e Tecnologias da energia *offshore*

A energia eólica *offshore* aproveita as condições privilegiadas dos ventos marinhos, que se caracterizam por velocidades mais altas e constantes em razão da ausência de obstáculos físicos (Martins et al., 2022). O avanço desta tecnologia evidencia a rápida evolução do setor: desde a instalação do parque pioneiro *Vinderby* na Dinamarca em 1991, composto por 11 aerogeradores de 450 kW a 2 km da costa, até o atual complexo *Dogger Bank* no Reino Unido, que representa 3.6 GW da capacidade total britânica de 10.5 GW, confirmando a posição do país como líder mundial em energia eólica offshore. Esta evolução abrange não apenas a dimensão dos projetos, mas também ganhos expressivos em eficiência, confiabilidade e redução de custos, com o valor médio do megawatt-hora recuando de €200 em 2010 para aproximadamente €50 em 2023.

As tecnologias eólicas offshore dividem-se em duas categorias principais: fixas e flutuantes, cada qual adequada a diferentes condições oceanográficas e profundidades. As estruturas fixas, empregadas em águas de até 60 metros de profundidade, utilizam fundações tipo monopile ou bases gravitacionais ancoradas ao leito marinho. Por sua vez, as plataformas flutuantes, ideais para águas profundas, empregam sistemas de amarração com correntes, cabos de poliéster ou aço, associados a âncoras de arrasto ou estacas de sucção. Esta distinção revela-se particularmente relevante para o contexto brasileiro, onde cerca de 80% do potencial eólico offshore localiza-se em águas profundas, exigindo predominantemente tecnologias flutuantes com durabilidade prevista entre 25-30 anos.

A implementação dos parques eólicos offshore demanda uma robusta estrutura de suporte. O sistema de transmissão requer subestações marítimas e cabos submarinos especializados que, no cenário brasileiro, precisam operar em profundidades superiores a 100 metros em diversas áreas. A integração com o Sistema Interligado Nacional exige ainda a construção de subestações costeiras e linhas de transmissão terrestres, componentes que absorvem entre 15-20% do investimento total dos projetos. A manutenção das turbinas em ambiente marinho apresenta requisitos específicos, incluindo embarcações especializadas, equipes técnicas capacitadas e sistemas de monitoramento remoto para otimizar as intervenções.

O desenvolvimento da cadeia produtiva nacional emerge como outro aspecto crucial. Embora o Brasil possua expertise consolidada na fabricação de turbinas onshore, a produção de componentes para turbinas offshore ainda é embrionária. Esta

categoria inclui pás de maior envergadura, torres reforçadas e sistemas avançados de proteção contra corrosão marinha. Levantamentos da EPE indicam que a nacionalização desta cadeia produtiva exigirá aportes na ordem de R\$ 10-15 bilhões em novas plantas industriais e centros de manutenção. A infraestrutura portuária também requer adaptações substanciais: apenas 5 dos 37 principais portos brasileiros dispõem atualmente de capacidade para manusear componentes de grande porte, como pás de 100 metros e naceles de 400 toneladas.

A perspectiva econômica dos projetos eólicos offshore tem apresentado evolução consistente. Apesar dos custos atuais no Brasil (R\$ 400-600/MWh) superarem os valores da energia eólica terrestre (R\$ 93-174/MWh) e solar fotovoltaica (R\$ 120-150/MWh). Segundo a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2023), os custos globais da eólica offshore variam entre USD 50-100/MWh (cerca de R\$ 250-500/MWh, considerando a taxa de câmbio de abril 2025), mas no Brasil, fatores como falta de infraestrutura portuária, cadeia de suprimentos incipiente e complexidade de instalação elevam os custos. Em contrapartida, a eólica terrestre e a solar fotovoltaica já são altamente competitivas no Brasil, com leilões recentes registrando preços médios de R\$ 144/MWh para eólica onshore e R\$ 136/MWh para solar (EPE, 2023). Esses valores corroboram as faixas mencionadas no parágrafo, indicando precisão nos dados apresentados.

A comparação reflete a realidade do mercado brasileiro, onde a eólica offshore ainda enfrenta barreiras econômicas, mas a menção às faixas de custo é confiável e alinhada com dados do setor.

A IRENA (2023) aponta que os custos da eólica offshore caíram 48% globalmente entre 2010 e 2022, devido a turbinas maiores (15-20 MW), fundações otimizadas e processos de instalação mais eficientes. No Brasil, o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2031 da EPE (2022) prevê que a maturação da cadeia produtiva local e a entrada de investidores internacionais podem reduzir os custos em até 40% até 2030, alinhando-se à faixa mencionada. Fatores como o aumento da capacidade instalada (133 GW em projetos offshore em licenciamento) e a padronização de componentes reforçam essa tendência.

A projeção é realista, mas depende de políticas públicas, como incentivos fiscais e regulamentação clara para o licenciamento ambiental, que ainda está em fase inicial no Brasil (Decreto nº 10.946/2022).

O fator de capacidade da eólica offshore global varia entre 45-60%,

dependendo da localização, enquanto no Brasil, os ventos costeiros do Nordeste (velocidades médias de 8-10 m/s) permitem atingir a faixa superior (IRENA, 2023). Em comparação, a eólica onshore no Nordeste tem um fator de capacidade médio de 39,8%, com picos de 45% em áreas otimizadas (ABEEólica, 2023). A maior estabilidade dos ventos marítimos, sem interferências topográficas, garante geração mais constante, reduzindo a intermitência e aumentando a atratividade para o Sistema Interligado Nacional (SIN).

A vantagem do fator de capacidade é corretamente enfatizada, reforçando o potencial da eólica offshore como fonte confiável, especialmente em um contexto de complementaridade com hidrelétricas durante estiagens.

Na esfera ambiental, os parques eólicos offshore apresentam desafios e oportunidades particulares. O monitoramento realizado em instalações europeias identifica interferências nas rotas migratórias de aves marinhas e cetáceos durante a fase de implantação, demandando medidas de mitigação como restrições sazonais às atividades construtivas. Em contrapartida, as estruturas submersas atuam como recifes artificiais, promovendo o aumento da biodiversidade local e beneficiando a pesca artesanal. Estudos do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) em águas brasileiras mapearam 42 espécies que requerem monitoramento específico, mas também indicam possibilidades de integração com outras atividades marítimas, como maricultura e turismo de observação. A experiência internacional demonstra ainda que as áreas dos parques podem funcionar como zonas de exclusão da pesca industrial, contribuindo para a recuperação dos estoques pesqueiros.

4.3 Marco regulatório internacional para energia eólica offshore

A análise do cenário regulatório internacional para energia eólica *offshore* revela diferentes abordagens e adaptações ao longo do tempo. A Dinamarca ocupa posição central neste panorama, exercendo papel de pioneiro e influenciador do desenvolvimento global da indústria (Le Maitre, 2024). O país chegou a alcançar a liderança no setor ao apresentar a maior participação de energia eólica na matriz elétrica europeia, resultado de um desenvolvimento acelerado inicialmente da modalidade onshore que depois se expandiu para o ambiente offshore (Le Maitre,

2024). Esta posição deriva de sua atuação precursora no setor eólico offshore (OWP), permitindo o estabelecimento de um ecossistema de inovação robusto e uma indústria consolidada (Steen et al., 2024). A trajetória dinamarquesa evidencia como uma base regulatória consistente e políticas industriais proativas podem impulsionar o desenvolvimento de uma indústria eólica offshore competitiva.

O modelo alemão apresenta características próprias que merecem análise em especial. A Alemanha foi uma das precursoras na liberalização de seu sistema energético, processo iniciado em 1996, resultando em um mercado hoje controlado por quatro grandes grupos energéticos: E.On, RWE, EWE e EnBW, que atuam nos setores de carvão, lignito e energia nuclear (Le Maitre, 2024). Na esfera *offshore*, o país estabeleceu normas específicas, como o estabelecimento de zonas de segurança de até 150 metros a partir dos limites externos dos parques eólicos (Bonsu et al., 2024). Uma particularidade do sistema alemão é a ausência de compensações diretas para determinados setores afetados pela instalação dos parques, embora exista previsão de destinação de 5% das taxas de licenciamento para apoio à atividade pesqueira, tema ainda em debate (Bonsu et al., 2024).

O Reino Unido adotou um modelo regulatório marcado pela descentralização em sua estrutura de governança. Os processos de avaliação ambiental e licenciamento variam entre Inglaterra, País de Gales, Escócia e Irlanda do Norte, com procedimentos específicos para cada território (Bonsu et al., 2024). Uma inovação do sistema britânico foi a introdução, em 2015, de exigências de conteúdo local para projetos eólicos com decisão final de investimento, configurando uma exceção no panorama europeu, onde as regras de livre mercado geralmente impedem requisitos mandatórios de conteúdo local (Steen et al., 2024).

O licenciamento ambiental para empreendimentos eólicos *offshore* tem se tornado mais criterioso em função da expansão global do setor e da crescente preocupação com impactos sobre espécies e habitats marinhos. Estados Unidos e nações europeias utilizam avaliações de impacto ambiental (EIAs) como ferramenta central para examinar os efeitos ambientais e orientar o planejamento, localização e operação dos parques eólicos (Gill & Hein, 2022). Na União Europeia, as avaliações de impacto cumulativo seguem diretrizes estabelecidas por um conjunto normativo que inclui a Diretiva de Avaliação de Impacto Ambiental, a Avaliação Ambiental Estratégica e a Diretiva-Quadro da Estratégia Marinha (Willstead et al., 2018).

Estas instalações integram-se a ecossistemas já sujeitos a múltiplas

interferências antropogênicas, como poluição, transporte marítimo, pesca e dragagem de sedimentos (PEZY et al., 2019). As avaliações tradicionalmente consideram a vulnerabilidade de grupos específicos de espécies, sem contemplar adequadamente as interações entre elas, deixando lacunas na compreensão dos efeitos sistêmicos dos parques eólicos sobre a estrutura e função dos ecossistemas marinhos (PEZY et al., 2019). Neste ponto, o planejamento espacial marinho emerge como instrumento estratégico para promover o uso racional dos oceanos, direcionando atividades para áreas compatíveis com obrigações ambientais e outros usos marítimos estabelecidos (Woolley, 2021).

4.4 O setor elétrico brasileiro e a inserção da energia eólica

O Brasil ocupa posição diferenciada no cenário global por sua matriz energética predominantemente renovável, aspecto que o distingue de outras nações industrializadas. Como evidenciam Schappo e Ferreira (2024), a matriz brasileira figura entre as mais limpas do mundo, com 84,8% da oferta interna de energia elétrica proveniente de fontes renováveis. Esta composição peculiar deve-se principalmente à preponderância da energia hidrelétrica, historicamente estabelecida como base do sistema gerador nacional.

No entanto, esta dependência das fontes hídricas revela vulnerabilidades estruturais do sistema. Conforme apontam Schappo e Ferreira (2024), a concentração em grandes usinas hidrelétricas torna o sistema mais sensível às variações climáticas, evidenciando a necessidade de diversificação. Este cenário tem impulsionado políticas voltadas à expansão e pluralização da matriz renovável brasileira. Castro, Borges e Simone (2023) observam que os mercados de eletricidade atravessam uma transformação global, motivada pela competitividade crescente das fontes renováveis, pela eletrificação da matriz energética e pelos avanços em tecnologias de armazenamento.

O setor elétrico brasileiro apresenta particularidades organizacionais e regulatórias que influenciam a implementação de novas políticas energéticas. Castro, Borges e Simone (2023) destacam a integração através do Sistema Interligado Nacional (SIN), com restrições de transmissão inter-regionais e características específicas de cada fonte geradora, exigindo coordenação centralizada do despacho. Esta complexidade operacional intensifica-se com o surgimento de soluções

descentralizadas, como apontam Versiani et al. (2021), que desafiam os operadores dos sistemas de geração, transmissão e distribuição.

A evolução desta matriz energética reflete-se nos dados do Balanço Energético Nacional, que registrou aumento na participação das energias renováveis de 45,3% em 2018 para 46,1% em 2019, enquanto as fontes não renováveis recuaram de 54,7% para 53,9% no mesmo período (VIEIRA, 2021). A atual distribuição apresenta predominância hídrica (62,72%), seguida por fontes fósseis (16,81%), eólica (8,96%), biomassa (8,7%), solar (1,66%) e nuclear (1,14%) (Ferreira; Santana; Rapini, 2021).

Um dos principais obstáculos para a expansão das energias renováveis no Brasil reside no custo das tecnologias alternativas em comparação com fontes tradicionais, embora apresentem expressivo potencial de crescimento devido às condições naturais favoráveis (Ferreira; Santana; Rapini, 2021). A carência de tecnologias nacionais apropriadas para utilização em larga escala de fontes como eólica, solar, biomassa e marés também constitui entrave para sua maior inserção no mercado (Krell; Souza, 2020).

4.5 O PL 576/2021 e o Marco Regulatório para energia eólica *offshore* no Brasil

O Projeto de Lei (PL) 576/2021 estabelece o marco regulatório para o aproveitamento do potencial energético offshore no Brasil, definindo as regras para geração de energia em áreas marinhas e outros corpos hídricos sob domínio da União. O texto determina duas modalidades de outorga: a oferta permanente, realizada mediante autorização quando há manifestação de interesse por agentes privados, e a oferta planejada, efetivada por meio de concessão precedida de licitação em áreas pré-definidas pelo poder público. Em ambos os casos, o empreendedor deve passar por duas fases: a de avaliação, que inclui estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental, e a fase de execução, voltada à implantação e operação do projeto. O PL estabelece que os empreendimentos devem pagar duas formas de participação governamental: o bônus de assinatura, valor fixo definido no momento da outorga, e a participação proporcional, correspondente a no mínimo 1,5% da energia efetivamente gerada e comercializada.

O texto detalha os critérios para definição das áreas destinadas aos projetos, denominadas "prismas energéticos", estabelecendo vedações para locais que já possuam blocos de petróleo e gás natural sob concessão, rotas de navegação, áreas

ambientalmente protegidas, áreas tombadas como patrimônio cultural e natural, e zonas reservadas para exercícios militares. O PL também regulamenta a distribuição das participações governamentais entre os entes federativos: do valor da participação proporcional, 50% vai para a União, 12,5% para estados confrontantes, 12,5% para municípios confrontantes, 10% para estados e Distrito Federal via FPE, 10% para municípios via FPM, e 5% para projetos de desenvolvimento sustentável em comunidades impactadas. O projeto determina ainda que os empreendedores devem investir em pesquisa e desenvolvimento, seguindo os mesmos parâmetros já existentes para o setor elétrico tradicional.

O PL aborda questões técnicas e operacionais relevantes, como a necessidade de garantias para o descomissionamento das instalações ao fim da vida útil do projeto, a obrigatoriedade de monitoramento ambiental em todas as fases do empreendimento, e as regras para conexão dos projetos ao Sistema Interligado Nacional (SIN). O texto modifica legislações existentes para incorporar o aproveitamento offshore aos objetivos da política energética nacional e adaptar as regras de pesquisa e desenvolvimento do setor elétrico. São estabelecidos princípios norteadores como o desenvolvimento sustentável, a geração de emprego e renda, o uso racional dos recursos naturais, o desenvolvimento tecnológico, e a harmonização com outras atividades marítimas. O projeto prevê a criação de um banco de dados público com informações sobre o potencial energético offshore brasileiro, além de determinar que o poder executivo defina uma entidade responsável por centralizar os procedimentos de autorização e estabeleça regulamentação específica para diversos aspectos técnicos e operacionais.

Este arcabouço legal representa uma iniciativa legislativa para regulamentar o aproveitamento do potencial energético offshore no Brasil. O projeto, aprovado pela Comissão de Infraestrutura do Senado, estabelece diretrizes para a exploração de energia eólica, solar e das marés em alto-mar, abrangendo áreas do Mar Territorial, da Plataforma Continental e da Zona Econômica Exclusiva (Antas, 2024). A proposta, de autoria do senador Jean Paul Prates, ex-presidente da Petrobras, busca estabelecer um marco regulatório de inovação para o setor (Pereira, 2023).

Contudo, essa implementação do marco legal enfrenta desafios relacionados à sua harmonização com o Decreto nº 10.946/2022. Entre as principais questões em debate estão: a indefinição sobre a alocação dos recursos provenientes da exploração offshore, a limitação do escopo à geração de eletricidade; excluindo outras

possibilidades como a produção de hidrogênio; e a transferência de competências da Secretaria do Patrimônio da União para o Ministério de Minas e Energia (Melcop, 2022). Essas disputas mantêm em aberto questões sobre o modelo de concessão de áreas marítimas e a possível implementação de cobranças adicionais pela energia gerada em áreas públicas, similar aos royalties para União, estados e municípios. É importante destacar que o Decreto em questão foca na cessão de uso de áreas a serem exploradas pela matriz energética, enquanto o Projeto de Lei trata da outorga para exploração do potencial energético. Ademais, apesar de tratar de escopos diferentes, os textos legais se complementam, pois o Decreto regulamenta aspectos práticos da exploração de energia *offshore* que serão disciplinados pelo Projeto de Lei, caso este seja aprovado.

Recorrendo a normas já consolidadas, como a Lei do Petróleo (Lei 9.478/97), a PL apresenta pontos de convergência e divergência com relação ao marco regulatório de hidrocarbonetos no Brasil. A referida Lei estabeleceu as bases para o fim do monopólio estatal do petróleo, criando a Agência Nacional do Petróleo (ANP) e definindo diretrizes para a participação privada no setor. O PL 576/2021 propõe mudanças no regime de partilha de produção, alterando aspectos operacionais e econômicos das atividades de exploração e produção. As sinergias entre os textos incluem a manutenção da propriedade da União sobre os recursos do subsolo e a preservação das competências regulatórias da ANP. Os pontos de conflito concentram-se na flexibilização das regras de conteúdo local e nas mudanças propostas para o regime de partilha, que podem afetar a participação da Petrobras como operadora única do pré-sal.

O PL busca modernizar o ambiente regulatório, mas enfrenta resistência por alterar mecanismos consolidados pela Lei do Petróleo, como os critérios de distribuição dos royalties e participações governamentais. Enquanto a Lei 9.478/97 priorizava a abertura controlada do mercado com forte presença estatal, o PL 576/2021 visa ampliar a competitividade do setor, reduzindo barreiras à entrada de novos agentes.

Já em relação a Lei 9.648/98 (Lei de Concessões), o referido projeto revela importantes pontos de convergência e divergência no marco regulatório das concessões no Brasil. O PL 576/2021 propõe modernizações significativas ao regime de concessões, mantendo a estrutura fundamental estabelecida pela Lei, mas introduzindo novos mecanismos para aumentar a eficiência e a segurança jurídica dos

contratos. Entre as principais convergências entre os normativos, destaca-se a manutenção do princípio da modicidade tarifária e do equilíbrio econômico-financeiro dos contratos, elementos já consagrados na Lei das Concessões. Ambos os dispositivos legais priorizam a transparência nos processos licitatórios e a necessidade de estudos técnicos preliminares. Contudo, emergem conflitos relevantes nas proposições: enquanto a Lei 9.648/98 estabelece um modelo mais tradicional de regulação, o PL 576/2021 inova ao propor maior flexibilidade nos procedimentos de reequilíbrio contratual e na alocação de riscos entre poder concedente e concessionário, qual seja pela nova visão de contratos administrativos trazidos pelas recentes regulamentações fiscais, a exemplo de Lei 14.133/202 (nova Lei de Licitações e Contratos das Administrações Públicas).

Outro ponto de divergência significativo reside no tratamento das garantias contratuais. O PL moderniza este aspecto ao permitir novos instrumentos financeiros como garantia, expandindo as possibilidades previstas na legislação atual. Adicionalmente, o novo projeto apresenta mecanismos mais robustos para a resolução de conflitos, incluindo a arbitragem como meio preferencial, aspecto tratado de forma mais superficial na Lei das Concessões. Esta evolução normativa reflete a necessidade de adequação do marco legal à complexidade crescente dos projetos de infraestrutura e às demandas do mercado por maior segurança jurídica e eficiência administrativa.

O projeto foi aprovado na Câmara dos Deputados, com debates ocorrendo nas esferas estaduais e municipais. No litoral potiguar, por exemplo, empresas com processos de licenciamento ambiental junto ao IBAMA já estabeleceram diálogo com as prefeituras, embora não tenham realizado contatos com as comunidades locais que serão impactadas pelos empreendimentos (Pereira, 2023). Este cenário evidencia a necessidade de considerar as particularidades do contexto brasileiro, especialmente quando comparado aos países europeus que serviram de referência para o marco regulatório.

4.6 Barreiras administrativas para investimentos energia eólica *offshore*

O desenvolvimento da energia eólica *offshore* no Brasil enfrenta obstáculos administrativos que têm retardado sua expansão. A ausência de legislação específica e a carência de incentivos governamentais emergem como entraves centrais, desencorajando potenciais investidores. A burocracia e a falta de regulamentação específica comprometem a implementação de projetos, mesmo diante do evidente potencial energético do país (Silva, 2015; Feldmann, 2018).

As instituições governamentais iniciaram movimentos para estabelecer bases normativas adequadas. Nesse sentido, a ausência histórica de um marco regulatório específico gerou insegurança jurídica, contrastando com setores já estabelecidos, como o petrolífero *offshore*, que dispõe de estrutura normativa consolidada (Pereira, 2017). Avanços recentes incluem a aprovação pelo Senado do Projeto de Lei 484/2017, que prevê a criação de leilões específicos para energia eólica *offshore* e autoriza a instalação de parques com potência superior a 5 MW (Canal Energia, 2019).

O processo de licenciamento ambiental ilustra a complexidade dos trâmites administrativos. O procedimento inicia-se com a apresentação da Ficha de Caracterização da Atividade (FCA), seguido por múltiplas etapas e análises (Lima, 2021). Contudo, a falta de critérios federais objetivos para o licenciamento ambiental aumenta a insegurança jurídica e dificulta a viabilização dos projetos (Santos, 2017).

O IBAMA, por sua vez, estabelece diretrizes específicas conforme as características de cada projeto e condições ambientais locais, definindo prazos para elaboração e análise dos estudos ambientais. Esta particularização, embora necessária, frequentemente resulta em prolongamento dos prazos e elevação dos custos. A situação agrava-se pela falta de harmonização entre critérios estaduais e federais no processo de licenciamento (Santos, 2017).

Questões institucionais também impactam o desenvolvimento do setor. Pereira (2017) identifica três aspectos críticos: a Empresa de Pesquisa Energética carece de competência para obtenção de licença ambiental prévia; o Conselho Nacional de Política Energética não define áreas marítimas para licitações; e a composição do Conselho não contempla adequadamente os setores afetados pelos empreendimentos eólicos. A ausência de coordenação entre esferas administrativas gera incertezas que inibem investimentos privados (Dantas, 2013).

Para superar estas barreiras, torna-se fundamental estabelecer um ambiente

regulatório que considere as especificidades dos projetos *offshore*. Lima (2021) ressalta a necessidade de avaliação dos impactos ambientais antes da concessão das áreas, garantindo levantamentos completos. Sem dúvidas, um marco regulatório adequado proporcionaria clareza sobre os procedimentos governamentais necessários, acelerando processos administrativos e implementação da infraestrutura (Pereira, 2017).

4.7 Considerações finais

A análise das barreiras regulatórias e administrativas para investimentos em energia eólica offshore no Brasil, com ênfase no PL 576/2021, revela um panorama em transformação. O texto examinou como o atual marco regulatório brasileiro, incluindo o projeto de lei em questão, influencia a segurança jurídica dos investimentos neste setor emergente.

O PL 576/2021 apresenta avanços ao estabelecer modalidades de outorga via oferta permanente e planejada, definindo regras para distribuição das participações governamentais e investimentos em pesquisa. A modernização dos aspectos regulatórios, incluindo novos instrumentos financeiros e mecanismos de resolução de conflitos, indica evolução em direção a um ambiente regulatório mais sofisticado.

A investigação identificou barreiras persistentes, como a ausência histórica de arcabouço legal específico, que gerou insegurança jurídica e afastou investidores, contrastando com setores estabelecidos como o petrolífero offshore. Os conflitos com normas vigentes, especialmente o Decreto nº 10.946/2022, e a complexidade dos processos de licenciamento ambiental emergem como desafios a serem superados.

Para análises futuras, sugere-se um aprofundamento por meio de enfoques comparativos com marcos regulatórios internacionais bem-sucedidos, especialmente de países com experiência consolidada no setor. Recomenda-se também investigar os impactos práticos da implementação do PL 576/2021 após sua aprovação, focando na harmonização com normas existentes e na efetividade das medidas de desburocratização propostas.

REFERÊNCIAS

ABRÃO, R. A. F. A geopolítica das energias renováveis: o Brasil em meio a um cenário global em transformação. **Monções: Revista de Relações Internacionais da UFGD**, v. 11, n. 22, p. 118-150, 2022.

ANTAS, L. L. **Energia eólica e dinâmica fiscal: uma análise dos municípios produtores de energia eólica no RN**. 2024. 51f. Monografia (Graduação em Gestão de Políticas Públicas) - Instituto de Políticas Públicas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2024.

BECHRAKIS, D. A.; MCKEOGH, E. J.; GALLAGHER, P. D. Simulação e avaliação operacional para um pequeno sistema autônomo de energia eólica. **Renewable Energy**, v. 31, n. 9, p. 1333-1350, 2016.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. Perspectivas para a energia eólica offshore no Brasil. **BNDES**, 2022. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/publicacoes>. Acesso em: 25 abr. 2025.

BONSU, P. O. et al. Co-location of fisheries and offshore wind farms: Current practices and enabling conditions in the North Sea. **Marine Policy**, v. 159, p. 105941, 2024.

CASTRO, L. I.; BORGES, G. G.; SIMONE, L. F. C. O futuro da formação de preços de energia no Brasil. **Revista de Economia Contemporânea**, v. 27, p. e232710, 2023.

CASTRO, R. M. G. **Introdução à energia eólica**. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2009. Disponível em: http://ead2.ctgas.com.br/arquivos/aperfeicoamento/MedicaoAnemometrica/Biblioteca/Livros/Introducao_a_Energia_Eolica.pdf. Acesso em: 21 maio 2024.

DANTAS, H. W. F. **Desenvolvimento energético e energia eólica na ordem jurídica do Brasil: aspectos Institucionais e Socioambientais**. 2013. Dissertação (Mestrado em Direito) - Centro de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

FELDMANN, P. M. et al. **Os desafios da instalação de eólicas offshore no Brasil**. São Paulo: USP, 2018.

FERREIRA, L. F.; SANTANA, J. R.; RAPINI, M. S. O setor energético no Brasil: um debate sobre a potencialidade das fontes renováveis no contexto ambiental e tecnológico. **RDE-Revista de Desenvolvimento Econômico**, v. 2, n. 49, 2021.

GILL, E.; HEIN, C. **IEA Wind White Paper Cumulative Effects Analysis for Wind Energy Development: Current Practices, Challenges, and Opportunities**. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2022.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Renewable power generation

costs in 2022. **IRENA**, 2023. Disponível em:

<https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022>. Acesso em: 25 abr. 2025.

KRELL, A. J.; CASTRO, C. B. A sustentabilidade da matriz energética brasileira: o marco regulatório das energias renováveis e o princípio do desenvolvimento sustentável. **Revista de Direito Econômico e Socioambiental**, v. 11, n. 2, p. 157-188, 2020.

LE MAITRE, J. Price or public participation? Community benefits for onshore wind in Ireland, Denmark, Germany and the United Kingdom. **Energy Research & Social Science**, v. 114, p. 103605, 2024.

LIMA, L. O. **Impactos ambientais de empreendimentos eólicos offshore: proposta de programas para o gerenciamento**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

LISBOA, L. S. C. **Energias renováveis: considerações sobre energia eólica, vantagens e desvantagens, e participação na matriz energética brasileira até 2022**. 2022. Artigo (Especialização em Engenharia Consultiva) - Faculdade Ari de Sá, Fortaleza, 2022.

MARTINS, D. S. et al. Revisão bibliográfica sobre os benefícios da implantação de um parque eólico offshore no Brasil. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 8, n. 7, p. 563-581, jul. 2022.

MELCOP, J. Eólicas offshore: o que diz (e não diz) o decreto 10.946. **Souto Correa Advogados**, 2022. Disponível em: <https://www.soutocorrea.com.br/artigos/eolicas-offshore-o-que-diz-e-nao-diz-o-decreto-10-946-2/>. Acesso em: 9 dez. 2024.

PEREIRA, F. **Análise do arcabouço legal associado ao desenvolvimento de parques eólicos offshore no Brasil**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2017.

PEREIRA, L. I. A instalação de projetos de energia eólica no Brasil: uma análise a partir do papel do Estado. **Revista GeoUECE**, Fortaleza, v. 12, n. 23, e2023002, 2023.

PEZY, J. P. et al. Towards an Ecosystem Approach to Assess the Impacts of Marine Renewable Energy. In: **Wind Energy and Wildlife Impacts**. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 153-164.

PIRES, A. L. G. et al. Principais tendências e indicadores nos estudos de viabilidade econômica da energia eólica offshore: Uma revisão sistemática da literatura. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 42., 2022, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: ENEGEP, 2022. p. 1-14.

SANTOS, A. W. **O licenciamento ambiental e o planejamento integrado da geração e transmissão de energia elétrica: limitações e desafios para o Brasil**.

2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

SCHAPPO, F.; FERREIRA, D. D. M. Pesquisa e Desenvolvimento e os Investimentos em Energia Renovável: Um Estudo nas Geradoras do Setor Elétrico. **Brazilian Business Review**, v. 21, p. e20221435, 2024.

SILVA, A. R. **Energia eólica em alto mar: distribuição dos recursos e complementariedade hídrica**. São Paulo: USP, 2015.

SILVA, H. S. **A exploração de recursos naturais no ambiente marinho: a concepção de um marco legal para a geração de energia eólica offshore no Brasil**. 2023. Dissertação (Mestrado em Direito) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.

STEEN, M. et al. Developing the industrial capacity for energy transitions: Resource formation for offshore wind in Europe. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, v. 51, p. 100702, 2024.

VERSIANI, A. F. et al. Capacidade absorptiva, inovação e fontes externas de conhecimento: O setor elétrico brasileiro. **Revista de Administração Mackenzie**, v. 22, p. eRAMR210082, 2021.

VIEIRA, A. C. F. Energias renováveis e sua eficiência na nova economia energética no Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 8, n. 18, p. 211-223, 2021.

WILLSTEED, E. A. et al. Obligations and aspirations: A critical evaluation of offshore wind farm cumulative impact assessments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 2332-2345, 2018.

WOOLLEY, O. **Renewable Energy and the Law of the Sea**. Oxford: Oxford University Press, 2021.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA DISSERTAÇÃO

Ao longo desta pesquisa, demonstra-se nos três capítulos apresentados, que esses se complementam para fornecer uma visão do desenvolvimento da energia eólica onshore e offshore no Nordeste brasileiro. O primeiro artigo, ao examinar os impactos socioambientais dos parques eólicos na região, estabelece uma base fundamental para compreender os desafios que precisam ser enfrentados. Os resultados indicam que, embora a energia eólica represente uma alternativa promissora para a diversificação da matriz energética, seus efeitos sobre a biodiversidade e comunidades locais demandam atenção especial, com destaque para o impacto sobre as aves migratórias, que apresentaram índices preocupantes de mortalidade em algumas áreas estudadas.

Esta preocupação com a avifauna serve como ponte natural para o segundo artigo, que investiga o potencial de geração de energia offshore e o potencial das tecnologias de sensoriamento remoto e inteligência artificial no monitoramento ambiental. Os resultados obtidos são expressivos: o sistema de imageamento aéreo alcançou precisão de 99,93% na identificação de espécies, enquanto os modelos de IA, particularmente o YOLOv5, demonstraram 87% de acurácia no monitoramento em tempo real. Estas tecnologias oferecem uma solução promissora para um dos principais desafios identificados no primeiro artigo, permitindo o monitoramento não invasivo e contínuo dos impactos sobre a fauna.

O terceiro artigo, ao analisar as barreiras regulatórias e administrativas para investimentos no setor, complementa os anteriores ao abordar como as questões socioambientais e tecnológicas podem ser incorporadas ao marco legal. A análise do PL 576/2021 revela avanços significativos nessa direção, como a exigência de estudos ambientais prévios e a previsão de sistemas de monitoramento contínuo. No entanto, também aponta lacunas importantes, especialmente quanto à regulamentação específica das tecnologias de monitoramento ambiental e à definição de critérios claros para compensação de comunidades afetadas.

A integração dos três textos revela uma sinergia importante: enquanto o primeiro artigo identifica potenciais e os problemas relacionados à exploração do mesmo, o segundo apresenta também potencial de geração offshore, acrescentando soluções tecnológicas para mitigá-los, e o terceiro propõe o arcabouço legal necessário para implementar essas soluções. Esta abordagem sistêmica contribui

significativamente para o entendimento dos desafios e oportunidades do setor eólico onshore e offshore no Nordeste brasileiro. Como apontam Xavier et al. (2023), a implementação bem-sucedida destes empreendimentos, requer justamente esta visão integrada, que combine consciência ambiental, inovação tecnológica e segurança jurídica.

Os resultados consolidados destes elementos também evidenciam a necessidade de maior diálogo entre os diferentes atores envolvidos no desenvolvimento do setor. Conforme destacam Gorayeb e Brannstrom (2020), o sucesso dos empreendimentos eólicos depende não apenas de sua viabilidade técnica e econômica, mas também de sua aceitação social e compatibilidade ambiental. Neste sentido, as tecnologias de monitoramento apresentadas no segundo artigo podem servir como ferramentas de mediação, fornecendo dados objetivos para embasar discussões entre empreendedores, comunidades locais e órgãos reguladores.

Deste modo, a análise conjunta dos artigos aponta para a importância do planejamento integrado no desenvolvimento da energia eólica onshore e offshore. A experiência internacional, como mencionado no terceiro artigo, demonstra que países bem-sucedidos neste setor, como Dinamarca e Reino Unido, adotaram abordagens que combinam rigor ambiental, inovação tecnológica e marcos regulatórios claros. No caso do Brasil, ao desenvolver seu potencial eólico onshore e offshore, tem-se a oportunidade de aprender com estas experiências, adaptando-as às especificidades do contexto nordestino.

Pretendeu-se nesta pesquisa investigar a energia eólica no Nordeste brasileiro através de uma análise que abrangeu aspectos socioambientais, tecnológicos e regulatórios. A metodologia empregada combinou abordagens qualitativas e quantitativas, utilizando revisão bibliográfica sistemática, análise documental e estudo de casos. O objetivo geral foi construir uma estrutura metodológica para contemplar as múltiplas dimensões do tema, identificando diretrizes para a produção de energia eólica no Nordeste que contemplassem a proteção humana e ambiental. Os objetivos específicos incluíram: levantar casos documentados de problemas socioambientais na região nordeste relacionados a plantas de geração de energia e determinar o impacto nas comunidades locais. A pesquisa buscou entender como os impactos socioambientais, as tecnologias de monitoramento e o marco regulatório influenciam o desenvolvimento da energia eólica na região.

Os resultados do primeiro artigo permitiram mapear de forma sistemática os impactos ambientais dos parques eólicos no Nordeste brasileiro. A análise de Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA) de complexos eólicos dos estados do Rio Grande do Norte, Ceará, Paraíba, Sergipe e Bahia revelou treze categorias principais de impactos ambientais, incluindo afugentamento e deslocamento da fauna, alteração da cobertura vegetal e supressão da vegetação nativa, alteração da paisagem e emissão de ruídos. Os resultados evidenciaram que, embora existam medidas mitigadoras previstas para a maioria dos impactos identificados, algumas questões permanecem sem soluções efetivas, como a alteração permanente da paisagem.

O mapeamento realizado no primeiro artigo também identificou a necessidade de maior engajamento das comunidades locais nos processos de planejamento e implementação dos parques eólicos. Observou-se que, quando há participação limitada das partes interessadas, aumentam os conflitos socioambientais e a resistência aos projetos.

O segundo artigo proporcionou resultados significativos quanto ao potencial das tecnologias de monitoramento ambiental. A análise das técnicas de sensoriamento remoto revelou que o sistema de imageamento aéreo operando a 800 metros de altitude pode identificar espécies de aves com precisão de 99,93%, permitindo o monitoramento não invasivo de grandes áreas. Estes resultados são particularmente relevantes considerando que o afugentamento e a mortalidade de aves foram identificados como impactos significativos no primeiro artigo. O estudo também demonstrou que o emprego desta tecnologia pode proporcionar uma relação custo-benefício favorável quando comparada aos métodos tradicionais de monitoramento, que geralmente envolvem equipes de campo e longos períodos de observação.

Complementarmente, a análise das tecnologias de inteligência artificial mostrou que redes neurais como *Faster R-CNN* e o modelo *YOLOv5* podem processar eficientemente grandes volumes de dados de radar, com acurácia de até 87% na detecção e identificação de espécies. O estudo identificou áreas críticas no Nordeste, como o Banco dos Cajuais (CE) e a APA do Manguezal da Barra Grande, que funcionam como importantes pontos para aves migratórias e que demandam monitoramento específico. Estes resultados contribuem para o segundo objetivo específico da pesquisa, ao fornecer ferramentas para o mapeamento e monitoramento contínuo dos problemas socioambientais.

O terceiro artigo revelou que a ausência de um marco regulatório específico constitui o principal entrave ao desenvolvimento da energia eólica offshore no Brasil. A análise do PL 576/2021 identificou avanços significativos, como o estabelecimento de modalidades de outorga via oferta permanente e planejada, a definição de regras para distribuição das participações governamentais e a exigência de investimentos em pesquisa e desenvolvimento. No entanto, o estudo também apontou limitações importantes no projeto, como a necessidade de harmonização com normas vigentes, especialmente o Decreto nº 10.946/2022, e a persistência de conflitos legais que podem afetar a segurança jurídica dos investimentos.

A análise comparativa entre o marco regulatório proposto para o Brasil e os modelos adotados em países pioneiros no setor, como Dinamarca, Alemanha e Reino Unido, revelou diferenças significativas de abordagem. Enquanto estes países desenvolveram uma base regulatória consistente e políticas industriais proativas, o Brasil ainda se encontra em estágio inicial de estruturação do setor. O estudo identificou que a complexidade dos processos de licenciamento ambiental e a burocracia administrativa representam obstáculos adicionais ao desenvolvimento da energia eólica offshore no país, afetando especialmente os prazos e custos de implementação dos projetos.

A integração dos resultados dos três artigos evidencia como os aspectos socioambientais, tecnológicos e regulatórios estão intrinsecamente conectados e devem ser abordados de forma sistêmica. Os impactos ambientais identificados no primeiro artigo podem ser mitigados através das tecnologias de monitoramento apresentadas no segundo, enquanto o marco regulatório analisado no terceiro artigo deve prever e normatizar tanto os impactos quanto as medidas mitigatórias. Esta visão integrada é essencial para que o desenvolvimento da energia eólica no Nordeste brasileiro ocorra de forma sustentável, minimizando impactos negativos e maximizando benefícios socioambientais e econômicos.