

A relação entre Energia Eólica Offshore e Pegada Ecológica: um estudo sobre sustentabilidade nas energias renováveis

The relationship between Offshore Wind Energy and Ecological Footprint: a study on sustainability in renewable energies

DOI: <http://www.doi.org/10.5935/2177-4153.20240021>

Nicole Stephanie Florentino de Sousa Carvalho¹, Francisca Erica Cardoso Nobre² e Antônio Jackson Alcantara Frota³

¹ Universidade Federal do Ceará, Brasil, Doutoranda em Desenvolvimento e Meio Ambiente,
e-mail: nicolecarvalho@ufc.br, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2779-4969>

² Universidade Federal do Ceará, Brasil, Doutoranda em Desenvolvimento e Meio Ambiente,
e-mail: ericacn@alu.ufc.br, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2589-2944>

³ Universidade Federal do Ceará, Brasil, Doutorado em Administração de Empresas,
e-mail: jacksonfrota2014@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1885-4173>

Recebido em: 18/12/2024 - Revisado em: 29/12/2024 - Aprovado em: 29/12/2024 - Disponível em: 31/12/2024

Resumo

A energia eólica offshore é amplamente reconhecida por sua eficácia na redução das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para a diversificação da matriz energética renovável. Contudo, a escolha de locais para instalação de usinas eólicas ainda levanta debates acerca de critérios socioambientais adequados. Para promover o equilíbrio entre meio ambiente, desenvolvimento e sociedade, torna-se indispensável a criação de mecanismos de avaliação de sustentabilidade. Nesse cenário, os indicadores de sustentabilidade desempenham um papel fundamental na gestão de socioecossistemas durante a implementação de turbinas eólicas, otimizando o uso de recursos e minimizando impactos negativos, com destaque especial para o cálculo da pegada ecológica nesse contexto. Este estudo teve como objetivo caracterizar a produção científica sobre a relação entre energia eólica offshore e pegada ecológica, além de identificar as principais variáveis que a influenciam. Utilizou-se de uma abordagem bibliométrica para analisar a produção científica sobre a relação entre energia eólica offshore e pegada ecológica. Valendo-se da base de dados Web of Science (WOS), foram selecionados 26 artigos completos publicados entre 2013 e 2023, os quais foram analisados com o apoio do software VOSviewer. Os resultados apontam uma conexão direta entre a eficiência técnica das usinas eólicas offshore e a redução da pegada ecológica, indicando também a necessidade de maior atenção aos aspectos sociais, econômicos e ambientais envolvidos. A pesquisa também evidencia que a transição

energética sustentável requer não apenas inovações tecnológicas, mas também abordagens integradas de justiça ambiental e adaptação climática. Conclui-se que, para viabilizar uma transição energética sustentável, é fundamental adotar uma abordagem integrada, que contemple não apenas a eficiência técnica, mas também a justiça ambiental e a adaptação às mudanças climáticas.

Palavras-chave: energias renováveis; indicadores ambientais; justiça ambiental

Abstract

Offshore wind energy is widely recognized for its effectiveness in reducing greenhouse gas emissions, contributing to the diversification of the renewable energy matrix. However, the choice of sites for wind farms still raises debates about appropriate socio-environmental criteria. In order to promote a balance between the environment, development and society, it is essential to create mechanisms for assessing sustainability. In this scenario, sustainability indicators play a fundamental role in the management of socio-ecosystems during the implementation of wind turbines, optimizing the use of resources and minimizing negative impacts, with special emphasis on the calculation of the ecological footprint in this context. The aim of this study was to characterize scientific production on the relationship between offshore wind energy and ecological footprint, and to identify the main variables that influence it. A bibliometric approach was used to analyze scientific production on the relationship between offshore wind energy and ecological footprint. Using the Web of Science (WOS) database, 26 full articles published between 2013 and 2023 were selected and analyzed using the VOSviewer software. The results point to a direct connection between the technical efficiency of offshore wind farms and the reduction of the ecological footprint, also indicating the need for greater attention to the social, economic and environmental aspects involved. The research also shows that the sustainable energy transition requires not only technological innovations, but also integrated approaches to environmental justice and climate adaptation. It concludes that, in order to make a sustainable energy transition possible, it is essential to adopt an integrated approach that takes into account not only technical efficiency, but also environmental justice and adaptation to climate change.

Keywords: renewable energies; environmental indicators; environmental justice

1. INTRODUÇÃO

Desde a ratificação do Acordo de Paris em 2015, o enfoque na mitigação de emissões de carbono na produção de energia tornou-se uma questão de destaque em escala internacional, resultando em um aumento expressivo no desenvolvimento de energia proveniente de fontes eólicas nos últimos anos. Embora os países europeus tenham liderado esse avanço, a capacidade de produção de energia eólica em terra na Europa aproxima-se de um ponto de saturação, enquanto o desenvolvimento de parques eólicos no mar segue em plena expansão (Iwata; Kyo; Ushifusa, 2023). Na América Latina, observa-se uma tendência similar em relação ao crescimento da energia eólica offshore, com o Brasil destacando-se como pioneiro e figura de relevância nesse setor energético (Fernandes, 2023).

Devido às condições marítimas favoráveis, como ventos mais intensos, constantes e com menor turbulência, os parques eólicos offshore surgem como uma opção atrativa para reduzir as emissões de carbono. Conforme dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2020), esses parques apresentam densidades de energia que excedem 1,5 watts por metro quadrado, proporcionando uma produção energética até 50% superior à dos parques terrestres (Possner; Caldeira, 2017). Além disso, ao se considerar o potencial eólico marítimo, estudos indicam possíveis reduções significativas nos custos, assim como o surgimento de novas abordagens para aprimorar a viabilidade econômica dessa tecnologia (Xavier, 2022).

Embora a energia eólica offshore esteja em expansão global e os investimentos no setor estejam crescendo consistentemente, ainda persiste uma lacuna substancial na pesquisa, especialmente no que diz respeito à consideração insuficiente dos aspectos socioambientais na escolha dos locais para a instalação de parques eólicos offshore. A literatura existente apresenta informações escassas sobre os critérios socioambientais relevantes no processo de localização em áreas marítimas, incluindo a interação e sobreposição com comunidades humanas já estabelecidas nas zonas costeiras (Paiva, 2023).

Para superar essa lacuna, é imprescindível desenvolver métodos de avaliação e cálculo dos níveis de sustentabilidade dos projetos eólicos offshore. O uso de indicadores de sustentabilidade pode facilitar a coleta e análise de dados, permitindo uma quantificação mais precisa das características e impactos das usinas eólicas. Dessa forma, a aplicação desses indicadores constitui um mecanismo essencial para uma gestão eficaz dos sistemas socioecológicos, garantindo que os projetos eólicos marinhos sejam ambientalmente responsáveis e economicamente viáveis.

Entre as diversas ferramentas disponíveis, o cálculo da pegada ecológica destaca-se como um parâmetro relevante para avaliar os efeitos das atividades humanas sobre os ecossistemas. Essa abordagem transparente promove uma

tomada de decisão mais informada, auxiliando na identificação e mitigação de possíveis impactos negativos.

Diante desse contexto, o objetivo desta pesquisa é caracterizar a produção científica sobre a relação entre energia eólica offshore e pegada ecológica, além de identificar as principais variáveis que influenciam essa relação. Por meio da análise da literatura disponível sobre o tema, busca-se identificar lacunas no conhecimento e compreender como as questões socioambientais estão sendo abordadas no contexto da energia eólica offshore. Entender as variáveis que influenciam a pegada ecológica nesse cenário específico é essencial para o desenvolvimento de estratégias de mitigação de impactos ambientais e para a promoção de uma transição energética mais sustentável.

Justifica-se a relevância científica desta pesquisa diante da urgência em compreender e sistematizar os impactos da energia eólica offshore à luz da sustentabilidade ambiental, econômica e social. Estudos como os de Gielen *et al.* (2019) e Acosta *et al.* (2018) evidenciam que, embora as energias renováveis representem um caminho promissor para a descarbonização da matriz energética, sua implementação não está isenta de conflitos e externalidades socioambientais, especialmente em contextos sensíveis como as zonas costeiras.

No caso específico da energia eólica offshore, autores como Bidwell *et al.* (2023) e Hammar *et al.* (2016) apontam que os impactos sobre a biodiversidade marinha, os usos tradicionais do território costeiro e as comunidades locais precisam ser monitorados e avaliados. Ainda assim, a literatura científica carece de sistematizações abrangentes que articulem essas dimensões com indicadores concretos de sustentabilidade. É nesse sentido que este estudo se insere, ao reunir e analisar criticamente a produção científica da última década sobre a interface entre energia eólica offshore e pegada ecológica, contribuindo para preencher uma lacuna relevante no campo dos estudos energéticos sustentáveis.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Energia eólica marinha e a Pegada ecológica

As fontes de energia renovável, como a eólica, solar e a energia das marés, têm ganhado destaque devido à sua sustentabilidade e à baixa emissão de poluentes (Kothari; Tyagi; Pathak, 2010). Entre essas, a energia eólica emerge como uma alternativa crucial para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Nos últimos anos, as turbinas eólicas instaladas em áreas marítimas têm se destacado globalmente, contribuindo significativamente para a ampliação das fontes renováveis na matriz energética (Decastro *et al.*, 2019).

As usinas eólicas offshore (UEO) são amplamente recomendadas para a descarbonização das redes elétricas, assim como os parques eólicos em terra. O ambiente marítimo apresenta ventos mais constantes e menos turbulentos em comparação ao terrestre, o que resulta em maior capacidade e densidade de potência para as UEO (EPE, 2020). Enquanto a densidade de potência nos parques terrestres é de cerca de $0,9 \text{ W/m}^2$, devido à interação das turbinas com a camada limite atmosférica (Miller; Keith, 2019), nos parques offshore, ela varia entre 3 e 5 W/m^2 , em razão da maior energia cinética presente sobre os oceanos.

A energia eólica oriunda de parques marítimos desempenha um papel essencial na transição para fontes renováveis em diversas nações, oferecendo eletricidade com menor pegada de carbono para atender às demandas atuais e futuras (Bidwell; Smythe; Tyler, 2023). Pesquisadores como Chang *et al.* (2021), van der Loos *et al.* (2020), Hof *et al.* (2020) e Normann (2017) reconhecem os parques eólicos offshore como uma estratégia eficaz para a constituição de uma matriz energética de baixo carbono. No entanto, enfrentar os desafios relacionados à implementação desses parques é indispensável para o cumprimento das metas de transição energética.

A instalação e operação de parques eólicos offshore podem gerar impactos negativos significativos sobre o ecossistema marinho, afetando aspectos biológicos, físicos e socioeconômicos. Entre esses impactos, destacam-se alterações comportamentais e mortalidade de animais marinhos, como mamíferos, tartarugas e peixes, devido ao ruído e à presença das estruturas. Além disso, as hélices das turbinas representam um risco para aves migratórias, causando colisões e alterações em suas rotas (EPE, 2020; Hammar; Perry; Gullström, 2016).

Embora sejam consideradas fontes renováveis e limpas, as usinas eólicas marítimas possuem impactos socioambientais relevantes, tanto em escala global quanto local. Dessa forma, é imprescindível adotar medidas que identifiquem, previnam e mitiguem os riscos ambientais desde as etapas iniciais do projeto, abrangendo todo o ciclo de vida dos aerogeradores, desde a instalação até o descomissionamento (Paiva, 2023).

No contexto das crescentes preocupações globais com as mudanças climáticas e a degradação ambiental, impulsionadas pela busca incessante por crescimento econômico, a pegada ecológica desponta como uma ferramenta essencial para a avaliação do consumo humano de recursos em relação aos limites ambientais. Essa abordagem evidencia a necessidade de estratégias mais amplas e sustentáveis para enfrentar os desafios ambientais contemporâneos (Joof *et al.*, 2024).

Os estudos pioneiros de Rees (1992) e Wackernagel e Rees (1996) introduziram a Pegada Ecológica (PE) como um instrumento abrangente para medir os índices de sustentabilidade. A PE avalia tanto a demanda global das atividades humanas sobre os recursos naturais quanto a capacidade biológica

das áreas exploradas, sublinhando a importância de práticas integradas na gestão ambiental (Benitez *et al.*, 2019; Karimli *et al.*, 2024).

Segundo Pereira (2008), o método da PE está diretamente relacionado às atividades humanas e sua contribuição para o atendimento das demandas por bens e serviços. Assim, as ações humanas exercem impacto direto sobre o meio ambiente e a integridade dos ecossistemas, exigindo análises criteriosas de suas consequências. Gonzalez e Andrade (2015) reforçam que a Pegada Ecológica se destaca entre os métodos de avaliação ambiental devido à sua clareza e simplicidade na apresentação de resultados, facilitando sua ampla divulgação.

A Pegada Ecológica monitora as demandas humanas sobre a biosfera, comparando-as com as capacidades correspondentes (WWF - Brasil, 2012). Essa abordagem considera tanto as demandas diretas quanto as indiretas das atividades humanas, incluindo a produção de recursos renováveis e a absorção de dióxido de carbono (CO₂), conhecida como pegada de carbono (Galli *et al.*, 2012). A análise desses dados permite calcular o impacto do estilo de vida humano sobre a capacidade regenerativa dos ecossistemas.

Dessa forma, diante dos desafios ambientais observados na implementação de usinas eólicas marítimas (EPE, 2020; Hammar; Perry; Gullström, 2016; Grecian *et al.*, 2010), a avaliação da Pegada Ecológica oferece uma perspectiva abrangente dos impactos ambientais das atividades humanas, incluindo o consumo de energia. Ao comparar as demandas humanas com a capacidade dos ecossistemas de se regenerarem, a pegada ecológica evidencia a urgência de práticas mais equilibradas e sustentáveis na produção e no consumo de energia.

Nesse cenário, torna-se essencial aprofundar os fundamentos teóricos que vinculam a energia eólica offshore à sustentabilidade, especialmente considerando o contexto da transição energética global. A energia eólica offshore é frequentemente reconhecida como uma solução estratégica para a descarbonização das matrizes energéticas, ao proporcionar eletricidade com reduzida pegada de carbono (Bidwell; Smythe; Tyler, 2023; Chang *et al.*, 2021). No entanto, sua adoção em larga escala exige a incorporação de mecanismos que avaliem não apenas sua viabilidade técnica e econômica, mas também seus efeitos ecológicos e sociais, conforme salientado por Acosta *et al.* (2018).

Nesse sentido, o uso de indicadores específicos de sustentabilidade se apresenta como ferramenta indispensável para subsidiar decisões mais informadas e integradas. Dentre os principais índices aplicáveis à análise da sustentabilidade dos projetos eólicos offshore, destacam-se:

- Pegada Ecológica (PE): relaciona o consumo de recursos naturais e a geração de resíduos com a capacidade regenerativa dos ecossistemas (Rees, 1992; Wackernagel; Rees, 1996);

- Pegada de Carbono: indicador derivado da PE que quantifica as emissões de CO₂ oriundas das atividades humanas (Galli *et al.*, 2012);

- Índice de Sustentabilidade Ambiental (ISA): métrica abrangente que integra fatores ecológicos e socioeconômicos, frequentemente aplicada para avaliar os efeitos das usinas offshore sobre a biodiversidade e os usos múltiplos dos ambientes marinhos (Hammar *et al.*, 2016).

A consolidação da energia eólica offshore alicerçada à sustentabilidade demanda mais do que inovações técnicas isoladas. Requer uma abordagem sistêmica, interdisciplinar e integrada, capaz de orientar uma transição energética que seja justa do ponto de vista social, resiliente frente às mudanças climáticas e comprometida com a preservação ambiental (Song *et al.*, 2022). Essa transição implica reconhecer a natureza complexa e interdependente dos sistemas energéticos, os quais englobam dimensões tecnológicas, econômicas, ecológicas e sociais em constante interação (Rauner; Budzinski, 2017).

3. METODOLOGIA

Este estudo emprega uma abordagem bibliométrica com o intuito de examinar detalhadamente a relação entre a pegada ecológica e as usinas eólicas offshore em escala global, no período compreendido entre 2013 e 2023. A abordagem bibliométrica permite uma análise quantitativa e qualitativa abrangente da produção científica, identificando padrões, tendências e lacunas de pesquisa.

Inicialmente, foi definida a base de dados Web of Science (WOS), escolhida por sua ampla cobertura de periódicos indexados internacionalmente e acessibilidade através da plataforma CAPES. Em seguida, foram estabelecidos critérios claros para a coleta de dados: foi realizada uma busca avançada utilizando os termos combinados “ecological footprint” AND (“offshore wind” OR “marine wind turbines”). O intervalo temporal estabelecido compreende os últimos 10 anos (2013-2023), permitindo uma análise atualizada e relevante.

A etapa inicial de busca retornou 38 documentos. Esses artigos foram submetidos a um processo de triagem e seleção com base em critérios específicos: relevância temática clara, foco explícito na relação entre energia eólica offshore e pegada ecológica e disponibilidade completa dos artigos para análise integral. Ao final desta etapa, restaram 26 artigos científicos completos, considerados adequados para a análise detalhada.

Posteriormente, foi realizada a extração sistemática dos dados destes 26 artigos, incluindo título, resumo, palavras-chave, autores, ano

de publicação e referências citadas. Esses dados foram organizados em um banco estruturado para facilitar a análise subsequente.

Para análise dos dados coletados, utilizou-se o software VOSviewer, ferramenta especializada para estudos bibliométricos que permite visualização avançada de redes científicas, análise de coautoria, cocitação e ocorrência de palavras-chave. O processo envolveu três tipos principais de análise:

1. Análise quantitativa da evolução temporal das publicações, identificando tendências de crescimento ou estagnação na produção científica ao longo dos anos;
2. Análise geográfica para mapear a distribuição global das pesquisas, identificando países mais ativos e colaborações internacionais;
3. Análise temática e de redes para investigar conexões conceituais, termos mais frequentes e agrupamentos temáticos predominantes.

Por fim, as informações obtidas nas análises quantitativas e qualitativas foram integradas em gráficos e mapas interpretativos. Esse conjunto de resultados possibilitou identificar com clareza áreas predominantes de interesse, revelar padrões de pesquisa, destacar lacunas específicas e propor direções futuras para pesquisa na interface entre energia eólica offshore, pegada ecológica e sustentabilidade.

A Tabela 1 apresenta uma síntese esquemática detalhada de todas as etapas metodológicas adotadas:

Tabela 1 – Síntese metodológica detalhada

Etapas	Descrição detalhada
Definição da base de dados	Seleção da Web of Science (WOS), acessada via CAPES
Coleta inicial dos artigos	Uso de termos específicos e período temporal definido
Seleção de artigos	Avaliação baseada em relevância temática e disponibilidade completa dos documentos
Extração sistemática dos dados	Coleta de informações como título, resumo, palavras-chave, autores e referências
Análise com VOSviewer	Análise quantitativa, geográfica e temática, elaboração de mapas e gráficos
Interpretação dos resultados	Identificação de padrões, tendências, lacunas e proposição de futuros estudos

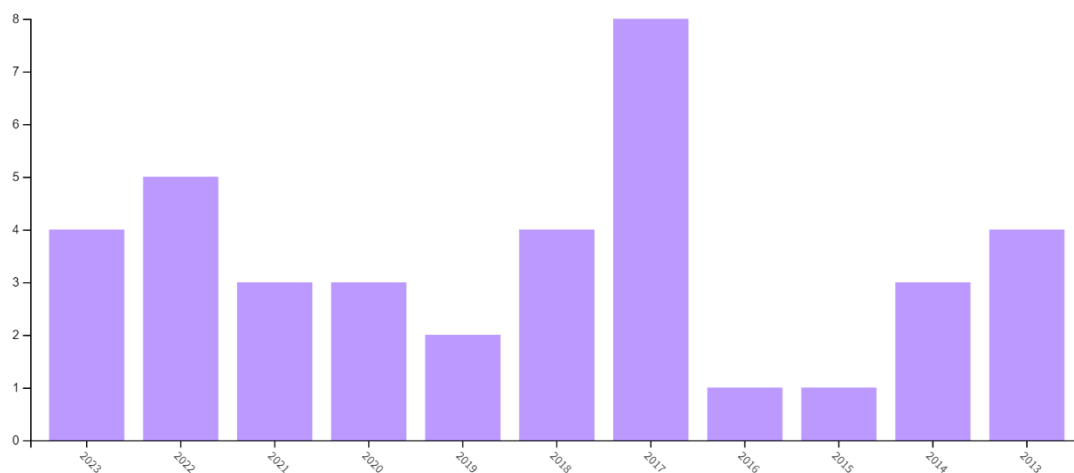
Fonte: Produzido pelos autores, 2025.

Essas etapas metodológicas asseguraram uma análise ampla e confiável da literatura científica, permitindo identificar com clareza tanto os avanços quanto as limitações da produção acadêmica sobre a interação entre energia eólica offshore e sustentabilidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise bibliométrica permitiu identificar 26 artigos científicos publicados ao longo de 10 anos, de 2013 a 2023, na base de dados Web of Science (WOS), acessada via plataforma CAPES (Figura 1). O estágio inicial observado nessa produção científica pode ser explicado pela recente inserção da temática na agenda internacional e pela complexidade técnica associada aos estudos sobre energia eólica offshore e sustentabilidade.

Figura 1 – Escala temporal de publicação dos artigos científicos (2013-2023).



Fonte: Produzido pelos autores, 2024.

A análise gráfica realizada evidenciou que as pesquisas científicas relacionadas à interação entre a pegada ecológica e as usinas eólicas offshore ainda estão em estágios iniciais, como refletido pelo número reduzido de estudos catalogados. Esse estágio embrionário pode ser explicado por diversos fatores. Primeiramente, a novidade do campo resulta em menor interesse por parte da comunidade científica, que tende a focar em áreas mais consolidadas. Ademais, a alta complexidade técnica e os recursos exigidos para investigar essa interação representam desafios significativos. Outro aspecto relevante é que outras áreas de pesquisa

frequentemente recebem maior atenção e financiamento, enquanto regulamentações e políticas públicas ainda não estão plenamente alinhadas com as considerações sobre pegada ecológica, o que limita os incentivos para investigações mais específicas nessa temática.

Em 2013, ano inicial das publicações identificadas, houve apenas um estudo que abordou os desafios relacionados à operação e manutenção de geradores de indução em ambientes marítimos. Reconhecendo as limitações das técnicas de monitoramento então existentes, o artigo propôs uma metodologia inovadora, voltada para aumentar a confiabilidade no monitoramento do estado dos geradores sob condições variáveis de carga. Essa técnica, projetada especificamente para geradores de turbinas eólicas marinhas, destacou-se por sua simplicidade, informatividade e baixa dependência da carga, melhorando a detecção de falhas como desequilíbrios no eixo e problemas nos enrolamentos do rotor e do estator. A validação experimental demonstrou sua eficácia, oferecendo uma solução promissora para aprimorar a confiabilidade operacional desses sistemas e, consequentemente, aumentar a sustentabilidade das energias renováveis (Yang; Tavner; Court, 2013).

A relação dessa técnica com a pegada ecológica está no incremento da sustentabilidade e eficiência das energias renováveis. Ao melhorar a confiabilidade na detecção de falhas em geradores, essa abordagem reduz o tempo de inatividade e os custos de manutenção, aumentando a disponibilidade operacional e a eficiência das usinas eólicas offshore. Isso contribui para a redução do impacto ambiental associado a essas instalações, promovendo um sistema energético mais sustentável e menos intensivo em emissões de carbono.

Em 2017, ano com o maior número de publicações (seis), os estudos concentraram-se em novas abordagens para aumentar a eficiência das instalações eólicas, especialmente em relação à variabilidade do vento. Entre as soluções propostas, destacam-se o desenvolvimento de turbinas eólicas híbridas offshore e o uso de correntes marítimas. Essas estratégias buscavam otimizar o dimensionamento dos sistemas híbridos e mitigar as flutuações na geração de energia, baseando-se em previsões de recursos disponíveis. Os resultados demonstraram a eficácia dessas soluções, evidenciando a atenuação das variações energéticas, a confiabilidade na programação da geração renovável e o potencial de redução de custos (Anwar; El Moursi; Xiao, 2016).

Tais abordagens têm impacto direto sobre a pegada ecológica ao integrar a energia eólica de forma mais eficiente à matriz elétrica. A mitigação das flutuações do vento e a previsibilidade na geração energética tornam o sistema mais estável, reduzindo a dependência de fontes fósseis. Isso, por sua vez, diminui os impactos ambientais associados à produção de energia, alinhando-se aos princípios de sustentabilidade.

Em 2023, que registrou quatro publicações, a pesquisa destacou o desenvolvimento sustentável, com foco na mitigação dos impactos sobre a fauna marinha, particularmente aves. Propuseram-se estratégias como o aumento do contraste visual das turbinas eólicas por meio de padrões acromáticos nas pás e pilares, reduzindo as colisões de aves sob diferentes condições de visibilidade. Essas medidas, além de simples e eficazes, podem ser integradas ao processo de fabricação das turbinas sem interferir nas normas de segurança para navegação aérea e marítima. As propostas visam expandir a proteção a um maior número de espécies, contribuindo para a conservação da biodiversidade marinha (Martin; Banks, 2023).

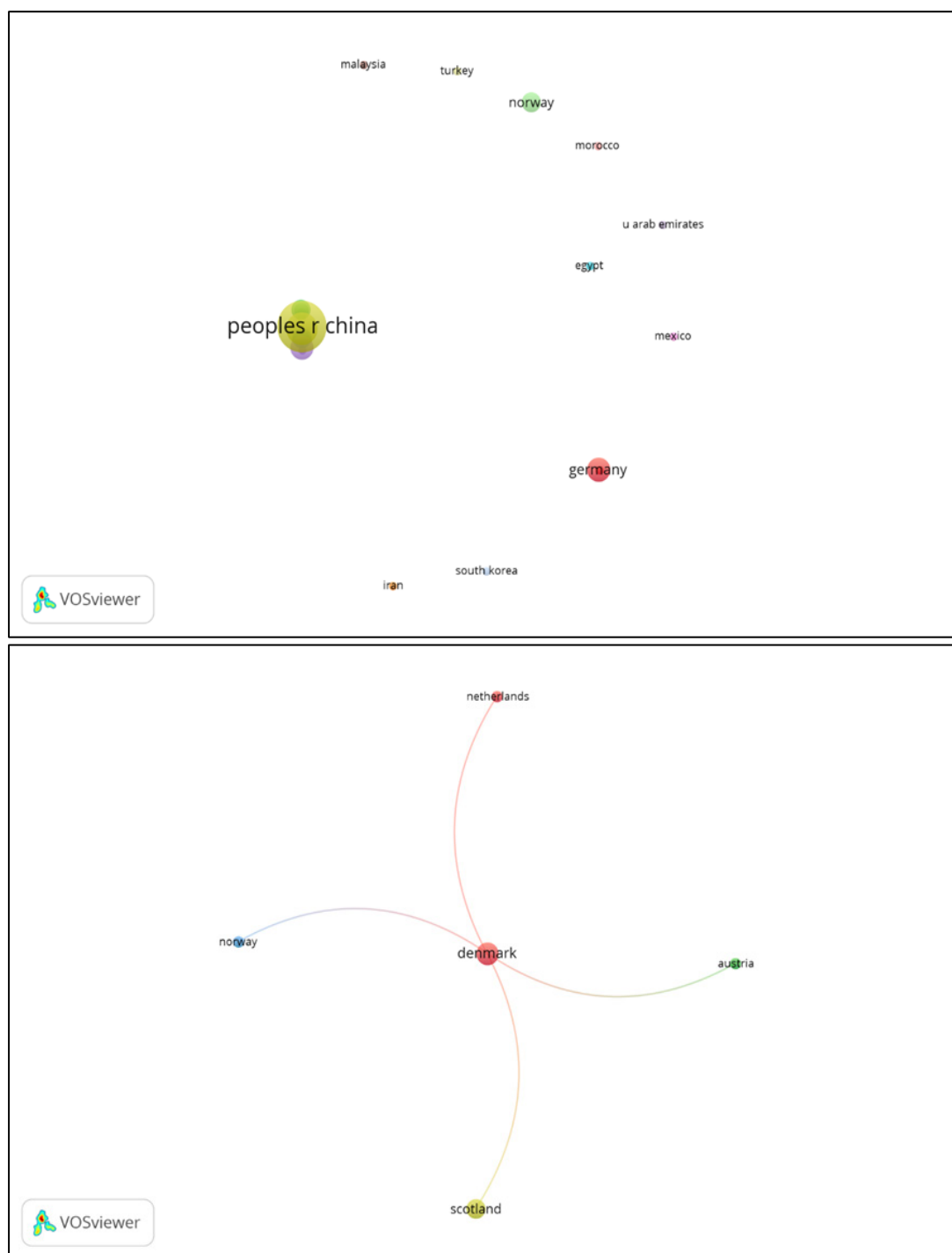
Essas estratégias também impactam positivamente a pegada ecológica ao reduzir a mortalidade de aves marinhas e, consequentemente, preservar o equilíbrio dos ecossistemas costeiros. Minimizar os danos à fauna marinha promove a conservação ambiental e reforça o compromisso com a sustentabilidade das energias renováveis.

A análise geográfica da produção científica revelou uma ampla distribuição global do conhecimento, destacando 22 países envolvidos em pesquisas sobre o tema. A Figura 2 apresenta os países classificados pelo número de publicações, com destaque para China (11), Inglaterra (6), Escócia (4), Alemanha (4), Estados Unidos (3), Irlanda (3) e Noruega (3). Outros países, como Holanda, Espanha, Portugal e França, contribuíram com publicações menores. Também se observa significativa colaboração entre pesquisadores de 10 países, incluindo França, Espanha, Estados Unidos, Portugal, Itália e Escócia.

Essas colaborações refletem fatores geográficos, ambientais e econômicos. Muitos desses países possuem amplas zonas costeiras e condições favoráveis à implementação de parques eólicos offshore. Além disso, suas economias frequentemente dependem de setores como a pesca e a indústria marítima, incentivando esforços para minimizar impactos ambientais e promover a sustentabilidade. Assim, a cooperação internacional facilita o compartilhamento de recursos e conhecimentos, contribuindo para a expansão responsável e sustentável da energia eólica marinha.

Por meio de inovações tecnológicas e estratégias de mitigação ambiental, a energia eólica offshore desempenha um papel crucial na transição para fontes renováveis e na redução da pegada ecológica global. A combinação de esforços científicos e colaboração internacional é essencial para enfrentar os desafios ambientais e acelerar a adoção de soluções energéticas sustentáveis.

Figura 2 – Coautoria de países com mais trabalhos na WOS (2013-2023).



Fonte: Produzido pelos autores, 2024.

Ao analisar a produção científica da China, observa-se um foco específico nos geradores de indução. Embora esses geradores sejam amplamente utilizados em diversas indústrias, sua aplicação na energia eólica offshore enfrenta desafios únicos, como ambientes adversos, acesso limitado e questões de confiabilidade. Nesse cenário, a melhoria do monitoramento desses geradores torna-se essencial para otimizar sua disponibilidade. Propõe-se uma nova abordagem de monitoramento, mais simples, informativa e independente

da carga, que foi validada por meio de experimentos práticos e simulados. Essa técnica é capaz de identificar falhas elétricas, desequilíbrios no eixo e discriminar problemas nos enrolamentos do rotor e do estator, mesmo sob condições de carga variáveis (Yang; Tavner; Court, 2013).

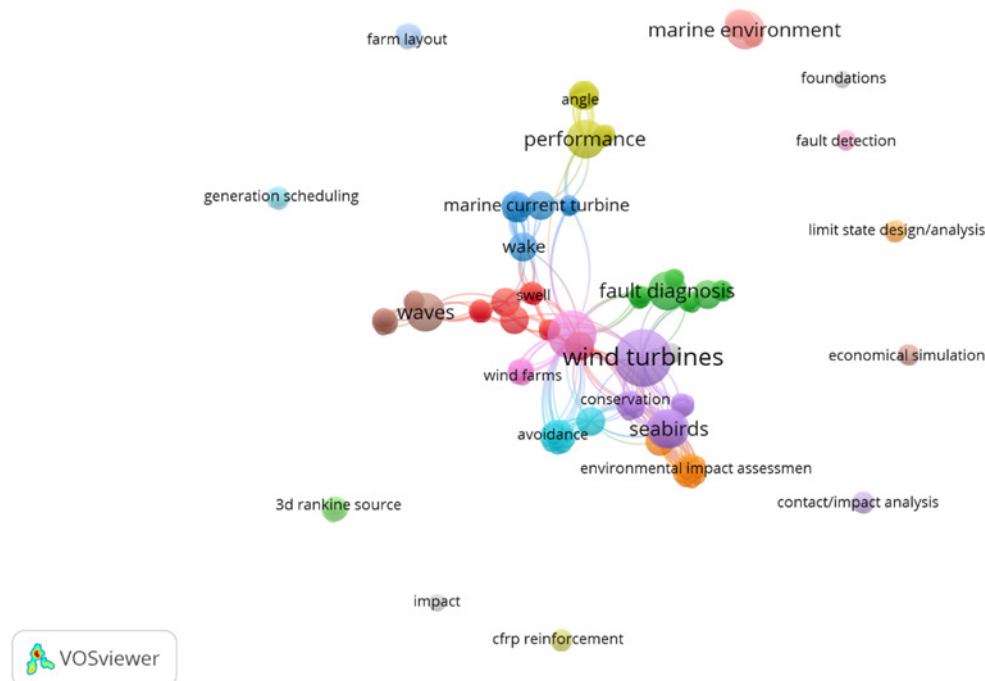
Espera-se que essa nova metodologia aumente a eficiência e confiabilidade dos geradores, contribuindo para a redução dos impactos ambientais relacionados à produção de energia eólica offshore. Com um monitoramento aprimorado, esses geradores terão maior disponibilidade e vida útil, o que reduzirá a necessidade de manutenção frequente e, consequentemente, o consumo de recursos naturais e as emissões associadas a essas atividades. Além disso, a rápida identificação e diagnóstico de falhas pode prevenir acidentes e danos ambientais, protegendo os ecossistemas marinhos e a vida selvagem. Em última instância, ao promover maior eficiência e segurança na geração de energia eólica offshore, espera-se uma diminuição da pegada ecológica global da produção de energia.

Na Espanha, os estudos têm se concentrado nos potenciais impactos das usinas eólicas offshore sobre os radares marítimos próximos, o que está diretamente relacionado à pegada ecológica desses projetos. Os ecos de radar gerados pelas turbinas podem interferir na capacidade de detecção dos radares na área, comprometendo a segurança marítima e a navegação. Embora métodos convencionais ofereçam resultados precisos sobre a propagação dos sinais pelas turbinas, sua implementação em ferramentas de software para estudos de impacto pode ser desafiadora. Para mitigar esse problema, propõe-se um modelo simples para avaliar essa interferência, que pode ser facilmente integrado em ferramentas de modelagem para análise do impacto ambiental, auxiliando na redução dos impactos ecológicos das usinas eólicas offshore (Grande *et al.*, 2014).

No Brasil, um país com uma vasta costa e grande potencial para a energia eólica offshore, observa-se uma falta significativa de estudos sobre a pegada ecológica das usinas eólicas marinhas. Essa lacuna pode ser explicada por diversos fatores, como o estágio inicial de desenvolvimento da indústria eólica offshore no país em comparação com outras nações e a priorização de pesquisas em usinas terrestres, dada a disponibilidade de recursos eólicos em terra firme (Xavier; Gorayeb; Brannstrom, 2020). A ausência de regulamentação específica e a falta de pressão pública para a realização de estudos ambientais, junto com a escassez de investimentos e recursos direcionados para essa área, também contribuem para essa defasagem. No entanto, à medida que o Brasil busca diversificar sua matriz energética e a indústria eólica offshore cresce globalmente, espera-se que o interesse e as pesquisas sobre os impactos ambientais das usinas eólicas marinhas aumentem. Isso pode ser impulsionado por políticas públicas, investimentos do setor privado e uma crescente conscientização sobre a importância da sustentabilidade na produção de energia.

A análise das palavras-chave permitiu identificar conexões entre as pesquisas, oferecendo uma visão clara do panorama acadêmico atual e do processo de comunicação e colaboração entre os pesquisadores. A Figura 3 ilustra os 194 termos mais relevantes, destacando expressões frequentes como turbinas eólicas, energia renovável, aves marinhas, vulnerabilidade, desempenho e diagnóstico de falhas.

Figura 3 – Coautoria de palavras-chave com mais citações na WOS (2013-2023).



Fonte: Produzido pelos autores, 2024.

A análise realizada revela uma rede complexa de temas interconectados, refletindo o interesse e a orientação das pesquisas sobre energia eólica marinha. Termos como “turbinas eólicas”, “energia renovável” e “diagnóstico de falhas” evidenciam o foco na eficiência e na manutenção desses sistemas, com o objetivo de otimizar sua contribuição para a geração de energia limpa. A presença de termos como “aves marinhas” e “vulnerabilidade” demonstra uma preocupação com os impactos ambientais das usinas eólicas offshore, refletindo o reconhecimento das questões relacionadas à conservação da vida selvagem e dos ecossistemas marinhos.

A interligação desses termos sublinha a importância da sustentabilidade ecológica na pesquisa e no desenvolvimento da energia eólica marinha, enfatizando a necessidade de reduzir os impactos ambientais e adotar uma abordagem holística e responsável na implementação desses projetos. Essa

perspectiva é crucial para minimizar a pegada ecológica associada à produção de energia.

Entretanto, ao considerar a crescente preocupação com a mitigação das mudanças climáticas, observam-se lacunas nas pesquisas. Termos como “captura de carbono” e “adaptação às mudanças climáticas” poderiam ser incorporados para avaliar o papel das usinas eólicas marinhas na redução das emissões de gases de efeito estufa e na promoção da resiliência climática. Além disso, a inclusão de termos como “impacto na comunidade local” e “justiça ambiental” é essencial para entender como as usinas eólicas marinhas afetam as comunidades costeiras, assegurando uma distribuição equitativa dos benefícios e custos relacionados a esses projetos.

Em resumo, enquanto a pesquisa atual aborda aspectos fundamentais da eficiência, manutenção e impacto ambiental das usinas eólicas marinhas, a ampliação dos estudos para incluir mitigação climática e justiça social é indispensável. Uma abordagem abrangente garantirá que a implementação da energia eólica marinha não apenas contribua para a produção sustentável de energia, mas também promova equidade e resiliência diante das mudanças climáticas.

Isso porque, a análise gráfica realizada evidenciou que as pesquisas científicas relacionadas à interação entre a pegada ecológica e as usinas eólicas offshore ainda estão em estágios iniciais, como refletido pelo número reduzido de estudos catalogados. Esse estágio embrionário pode ser explicado por diversos fatores. Primeiramente, a novidade do campo resulta em menor interesse por parte da comunidade científica, que tende a focar em áreas mais consolidadas. Ademais, a alta complexidade técnica e os recursos exigidos para investigar essa interação representam desafios significativos. Outro aspecto relevante é que outras áreas de pesquisa frequentemente recebem maior atenção e financiamento, enquanto regulamentações e políticas públicas ainda não estão plenamente alinhadas com as considerações sobre pegada ecológica, o que limita os incentivos para investigações mais específicas nessa temática. Essa análise converge com os apontamentos de Acosta *et al.* (2018), que destacam os entraves sociais, técnicos e econômicos da transição energética justa, além de Gielen *et al.* (2019), que reforçam a necessidade de integrar critérios de sustentabilidade e justiça ambiental às agendas energéticas globais. Bidwell *et al.* (2023), por sua vez, enfatizam que a ausência de avaliações integradas entre biodiversidade, aceitação social e desempenho técnico dificulta a consolidação de políticas energéticas mais sustentáveis e participativas.

As análises realizadas também reforçam a necessidade de uma abordagem holística na implementação das usinas eólicas offshore, integrando não apenas aspectos técnicos, mas também econômicos, sociais e ambientais. Em vista disso, elaborou-se um Tabela-síntese (Tabela 2) das principais relações identificadas entre as usinas eólicas offshore, índices de sustentabilidade e suas contribuições diretas para a promoção da sustentabilidade global:

Tabela 2 – Framework síntese das relações entre energia eólica offshore, índices de sustentabilidade e contribuições para sustentabilidade

Dimensão	Índices de Sustentabilidade	Contribuições para a Sustentabilidade
Ambiental	Pegada Ecológica e Pegada de Carbono	Redução de emissões, conservação da biodiversidade marinha e redução do impacto sobre ecossistemas
Econômica	Índice de Viabilidade Econômica	Otimização de recursos financeiros, redução de custos operacionais e manutenção eficiente das turbinas
Social	Justiça Ambiental e Desenvolvimento Sustentável	Minimização de impactos sobre comunidades locais, distribuição justa dos benefícios econômicos e sociais, e adaptação às mudanças climáticas

Fonte: Produzido pelos autores, 2025.

Desse modo, evidencia-se que a ampliação das pesquisas envolvendo os diversos índices de sustentabilidade é essencial para uma maior compreensão dos benefícios e impactos relacionados à energia eólica offshore, facilitando uma transição energética sustentável e equitativa.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização da produção científica sobre a relação entre a energia eólica offshore e a pegada ecológica revelou informações cruciais sobre o estado atual da pesquisa e as principais variáveis que influenciam a pegada ecológica nesse contexto. Durante a investigação, foi possível observar uma clara interconexão entre a eficiência operacional das usinas eólicas offshore e sua contribuição para a diminuição da pegada ecológica associada à geração de energia.

Apesar de os estudos revisados demonstrarem preocupação em otimizar a eficiência e minimizar os impactos ambientais das usinas eólicas offshore, ainda foram identificadas lacunas que merecem maior atenção. Entre essas

lacunas, destaca-se a necessidade de uma abordagem mais ampla, que leve em consideração não apenas a eficiência técnica e os impactos ambientais diretos, mas também questões sociais, econômicas e ambientais mais amplas.

Portanto, é essencial reconhecer que a transição para a energia eólica offshore não ocorre de forma isolada, impactando frequentemente as comunidades locais, a distribuição de custos e benefícios, e a capacidade de adaptação às mudanças climáticas. Nesse contexto, recomenda-se que futuras pesquisas sobre o tema adotem uma visão mais holística, incorporando de maneira crítica e analítica preocupações emergentes nas categorias analisadas, como justiça ambiental, impacto nas comunidades e adaptação climática.

Adicionalmente, é fundamental a implementação de políticas e regulamentações alinhadas, que incentivem práticas sustentáveis e justas no desenvolvimento de projetos eólicos offshore. Tais políticas devem ser baseadas em evidências científicas e considerar, não apenas os benefícios econômicos imediatos, mas também os impactos sociais e ambientais a longo prazo.

Ademais, embora a energia eólica offshore tenha um grande potencial para reduzir a pegada ecológica associada à produção de energia, é crucial adotar uma abordagem integrada que considere uma gama de preocupações, desde a eficiência técnica até questões de justiça ambiental e adaptação às mudanças climáticas. Através de uma análise mais abrangente e da implementação de políticas e práticas sustentáveis, será possível promover uma transição energética mais sustentável e justa no futuro.

REFERENCIAS

ACOSTA, C.; ORTEGA, M.; BUNSEN, T.; KOIRALA, B. P.; GHORBANI, A. Facilitating energy transition through energy commons: an application of socio-ecological systems framework for integrated community energy systems. *Sustainability*, v. 10, n. 2, p. 366, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10020366>

ANWAR, M. B.; EL MOURSI, M. S.; XIAO, W. Novel power smoothing and generation scheduling strategies for a hybrid wind and marine current turbine system. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 32, n. 2, p. 1315-1326, 2016. DOI: 10.1109/TPWRS.2016.2591723

ARAÚJO, C. A. Bibliometria: evolução histórica e questões atuais. *Em Questão*, v. 12, n. 1, p. 11–32, 2006. DOI: 10.19132/1808-5245200612.11-32

BENITEZ, F. F.; PAREDES, M. E. R.; COLLADO-RUANO J.; TERÁN, E. F. H.; IBARRA, G. D. L. Environmental education program in Ecuador: theory,

practice, and public policies to face global change in the Anthropocene. **Avaliação: Revista da Avaliação da Educação Superior**, v. 27, n. 105, p. 859-880, 2019.

BIDWELL, D.; SMYTHE, T.; TYLER, G. Anglers' support for an offshore wind farm: Fishing effects or clean energy symbolism. **Marine Policy**, v. 151, p. 105568, 2023. DOI: 10.1016/j.marpol.2023.105568

CHANG, V.; CHEN, Y.; ZHANG, Z.; XU, Q. A.; BAUDIER, P.; LIU, B. S. C. The market challenge of wind turbine industry-renewable energy in PR China and Germany. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 166, p. 120631, 2021.

DECASTRO, M.; SALVADOR, S.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; COSTOYA, X.; CARVALHO, D.; SANZ-LARRUGA, F. J.; GIMENO, L. Europe, China and the United States: Three different approaches to the development of offshore wind energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 109, p. 55–70, 2019.

DE MEDEIROS, F. F. H.; PIMENTA, H. C. D. Análise bibliométrica sobre práticas sociais implementadas em comunidades do entorno de parques eólicos. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 11, n. 4, p. 174–197, 2022. DOI: 10.29289/1984-0065.v11i4.12209

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **ROADMAP Eólica Offshore Brasil**. Perspectivas e caminhos para a energia eólica marítima. 2020. Disponível em: http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao456/Roadmap_Eolica_Offshore_EPE_versao_R2.pdf. Acesso em: 14 set. 2024.

FERNANDES, I. G. **Exploração da complementaridade eólica offshore para redução da variabilidade de geração correções banca**. 2023. 96 f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade/CCET) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2023.

GALLI, A.; WIEDMANNB, T; ERCINC, E.; KNOBLAUCHD, D; EWINGE, B.; GILJUM, S. Integrating Ecological, Carbon and Water footprint into a “Footprint Family” of indicators: Definition and role in tracking human pressure on the planet. **Ecological Indicators**, v. 16, p. 100-112, 2012.

GIELEN, D.; BOSHELL, F.; SAYGIN D.; BAZILIAN M. D.; WAGNER, N.; GORINI, R. The role of renewable energy in the global energy transformation. **Energy Strategy Reviews**, v. 24, p. 38–50, 2019.

GONZALEZ, M. H. G.; ANDRADE, D. C. A sustentabilidade ecológica do consumo em Minas Gerais: uma aplicação do método da pegada ecológica. **Nova Economia**, v. 25, n. 2, p. 421-446, 2015.

GRANDE, O.; CAÑIZO, J.; ANGULO, I.; JENN, D.; DANOON, L. R.; GUERRA, D.; LA VEGA, D. Simplified formulae for the estimation of offshore wind turbines clutter on marine radars. **The Scientific World Journal**, v. 2014, p. 1-12, 2014. DOI: 10.1155/2014/982508

GRECIAN, W. J.; INGER, R.; ATTRILL, M. J.; BEARHOP, S.; GODLEY, B.; WITT2, M. J.; VOTIER, S. C. Potential impacts of wave-powered marine renewable energy installations on marine birds. **Ibis**, v. 152, n. 4, p. 683-697, 2010.

HAMMAR, L.; PERRY, D.; GULLSTRÖM, M. Offshore Wind Power for Marine Conservation. **Open Journal of Marine Science**, v. 6, n. 1, p. 66-78, 2016.

HOF, A. F.; CARRARA, S.; CIAN, E.; PFLUGE, B.; SLUISVELD, M. A. E. V.; BOER, H. S.; VUUREN, D. P. V. From global to national scenarios: bridging different models to explore power generation decarbonisation based on insights from socio-technical transition case studies. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 151, p. 119882, 2020.

IWATA, K.; KYOI, S.; USHIFUSA, Y. Public attitudes of offshore wind energy in Japan: An empirical study using choice experiments. **Cleaner Energy Systems**, v. 4, p. 100052, 2023. DOI: 10.1016/j.cles.2023.100052

JOOF, F.; SAMOUR, A.; ALI, M.; REHMAN, M. A.; TURSOY, T. Economic complexity, renewable energy and ecological footprint: The role of the housing market in the USA. **Energy and Buildings**, v. 311, p. 114131, 2024. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114131

KARIMLI, T.; MIRZALIYEV, N.; GULIYEV, H. The Globalization and Ecological Footprint in European Countries: Correlation or Causation? **Research in Globalization**, v. 8, p. 100208, 2024. DOI: 10.1016/j.resglo.2024.100208

KOTHARI, R.; TYAGI, V. V.; PATHAK, A. Waste-to-energy: A way from renewable energy sources to sustainable development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 9, p. 3164-3170, 2010.

MARTIN, G. R.; BANKS, A. N. Marine birds: Vision-based wind turbine collision mitigation. **Global Ecology and Conservation**, v. 42, p. e02386, 2023. DOI: 10.1016/j.gecco.2023.e02386

MILLER, L. M.; KEITH, D. W. Observation-based solar and wind power capacity factors and power densities. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 10, p. 104008, 2018. DOI: 10.1088/1748-9326/aae102

NORMANN, H. E. Policy networks in energy transitions: The cases of carbon capture and storage and offshore wind in Norway. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 118, p. 80-93, 2017.

PAIVA, S. V. **Ameaças da mineração de Carbonaros Marinhos e a energia eólica “offshore” na biodiversidade marinha: um ponto crítico para a economia azul.** 2023. 111 f. Tese (doutorado em Ciências Marinhas). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

PEREIRA, L. G. **Síntese dos Métodos de Pegada Ecológica e Análise Energética para Diagnóstico da Sustentabilidade de Países: o Brasil como estudo de caso.** 2008. 184 f. Tese (doutorado em Engenharia de Alimentos). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

POSSNER, A.; CALDEIRA, K. Geophysical potential for wind energy over the open oceans. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 43, p. 10763-10768, 2017. Disponível em: <http://www.pnas.org/lookup/doi/10.1073/pnas.1705710114>. Acesso em: 13 set. 2024.

RAUNER, S.; BUDZINSKI, M. Holistic energy system modeling combining multi-objective optimization and life cycle assessment. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 12, p. 124005, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa914d>

REES, W. E. Ecological footprint and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out. **Environment and Urbanization**, v. 4, p. 121-130, 1992.

SONG, Y.; ZHANG, Z.; XU, Z. Modular combined DC-DC autotransformer for offshore wind power integration with DC collection. **Applied Sciences**, v. 12, n. 4, p. 1810, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12041810>

VAN DER LOOS, A.; NEGRO, S. O.; HEKKERT, M. P. Low-carbon lock-in? Exploring transformative innovation policy and offshore wind energy pathways in the Netherlands. **Energy Research & Social Science**, v. 69, p. 101640, 2020.

XAVIER, T.W.F. **Análise participativa dos potenciais impactos socioambientais de parques eólicos marinhos (Offshore) na pesca artesanal no estado do Ceará, Brasil.** 2022. Tese de doutorado, Universidade Federal do Ceará.

XAVIER, T.; GORAYEB, A.; BRANNSTROM, C. **Energia Eólica Offshore e Pesca Artesanal: impactos e desafios na costa oeste do Ceará, Brasil.** In: Geografia marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos, p. 608-630. Rio de Janeiro: PGGM, 2020.

YANG, W.; TAVNER, P. J.; COURT, R. An online technique for condition monitoring the induction generators used in wind and marine turbines. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 38, n. 1, p. 103-112, 2013. DOI: 10.1016/j.ymssp.2012.03.002

WACKERNAGEL, M.; REES, W. **Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth.** New Society Publishers, 1996.

WWF-BRASIL. World Wide Life Fund For Nature Brasil. **A Pegada Ecológica de São Paulo – Estado e Capital e a família de pegada.** Brasília: WWF-Brasil, 2012.