

Governança Climática e Energia Eólica Offshore no Brasil: Avanços, Desafios e Perspectivas

Rodrigo H. R. Quevedo Melo

Doutorando, PPGCI/UFRGS, Brasil

rodrigohquevedo@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-2705-5098>

Ricardo H. R. Quevedo Melo

Doutorando, PROPUR/UFRGS, Brasil

ricardohquevedo@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-6636-6502>

Evanisa Fatima R. Q. Melo

Professora Doutora, UPF, Brasil

evanisa9@upf.br

Governança Climática e Energia Eólica Offshore no Brasil: Avanços, Desafios e Perspectivas

RESUMO

Objetivo – Analisar o desenvolvimento da energia eólica *offshore* no Brasil, destacando seus entraves regulatórios e institucionais, bem como as oportunidades para a governança ambiental frente às mudanças climáticas globais.

Metodologia – Foi realizada uma revisão sistemática e bibliométrica da literatura, com base nos métodos *ProKnow-C* e *Methodi Ordinati*, aplicados às bases *Scopus* e *Web of Science*, a fim de identificar os estudos mais relevantes sobre energia eólica *offshore* no Brasil.

Originalidade/relevância – O estudo preenche uma lacuna sobre a integração entre políticas públicas, aspectos regulatórios e a implementação de fontes renováveis no contexto costeiro brasileiro, reforçando a necessidade de uma abordagem multiescalar da governança climática.

Resultados – Os resultados revelam o elevado potencial técnico da energia eólica *offshore* no Brasil e evidenciam a ausência de um marco regulatório específico, a dependência tecnológica externa e a carência de planejamento interinstitucional como principais barreiras.

Contribuições teóricas/metodológicas – A combinação das metodologias *ProKnow-C* e *Methodi Ordinati* fornece uma base sólida para mapeamento da produção científica sobre o tema, além de estruturar um panorama crítico para formulação de políticas públicas.

Contribuições sociais e ambientais – O trabalho contribui para o avanço da transição energética limpa e justa no Brasil, oferecendo subsídios para decisões políticas e estratégicas voltadas à mitigação dos efeitos das mudanças climáticas.

PALAVRAS-CHAVE: Energia eólica *offshore*. Governança ambiental. Políticas públicas.

Climate Governance and Offshore Wind Energy in Brazil: Advances, Challenges and Future Perspectives

ABSTRACT

Objective – To analyze the development of *offshore* wind energy in Brazil, highlighting regulatory and institutional challenges, as well as opportunities for environmental governance in the context of global climate change.

Methodology – A systematic and bibliometric literature review was conducted using *ProKnow-C* and *Methodi Ordinati* methods, applied to *Scopus* and *Web of Science* databases to identify the most relevant studies on *offshore* wind energy in Brazil.

Originality/Relevance – This study addresses a gap in the integration between public policy, regulatory aspects, and renewable energy implementation in Brazil's coastal areas, reinforcing the need for a multiscalar climate governance approach.

Results – The findings indicate Brazil's high technical potential for *offshore* wind energy and identify the lack of specific regulation, external technology dependence, and interinstitutional planning deficiencies as key barriers.

Theoretical/Methodological Contributions – The use of *ProKnow-C* and *Methodi Ordinati* offers a robust foundation for mapping scientific production and for structuring critical insights to inform public policy.

Social and Environmental Contributions – This research supports a fair and clean energy transition in Brazil, providing key inputs for political and strategic decisions aimed at mitigating the impacts of climate change.

KEYWORDS: *Offshore* wind energy. Environmental governance. Public policies.

Gobernanza Climática y Energía Eólica Offshore en Brasil: Avances, Desafíos y Perspectivas Futuras

RESUMEN

Objetivo – Analizar el desarrollo de la energía eólica *offshore* en Brasil, destacando los desafíos regulatorios e institucionales, así como las oportunidades para la gobernanza ambiental frente al cambio climático global.

Metodología – Se realizó una revisión sistemática y bibliométrica de la literatura, utilizando los métodos *ProKnow-C* y *Methodi Ordinati*, aplicados a las bases de datos *Scopus* y *Web of Science* para identificar los estudios más relevantes sobre el tema.

Originalidad/Relevancia – El estudio aborda una laguna en la integración entre políticas públicas, marcos regulatorios y la implementación de energías renovables en las zonas costeras de Brasil, destacando la necesidad de una gobernanza climática multinivel.

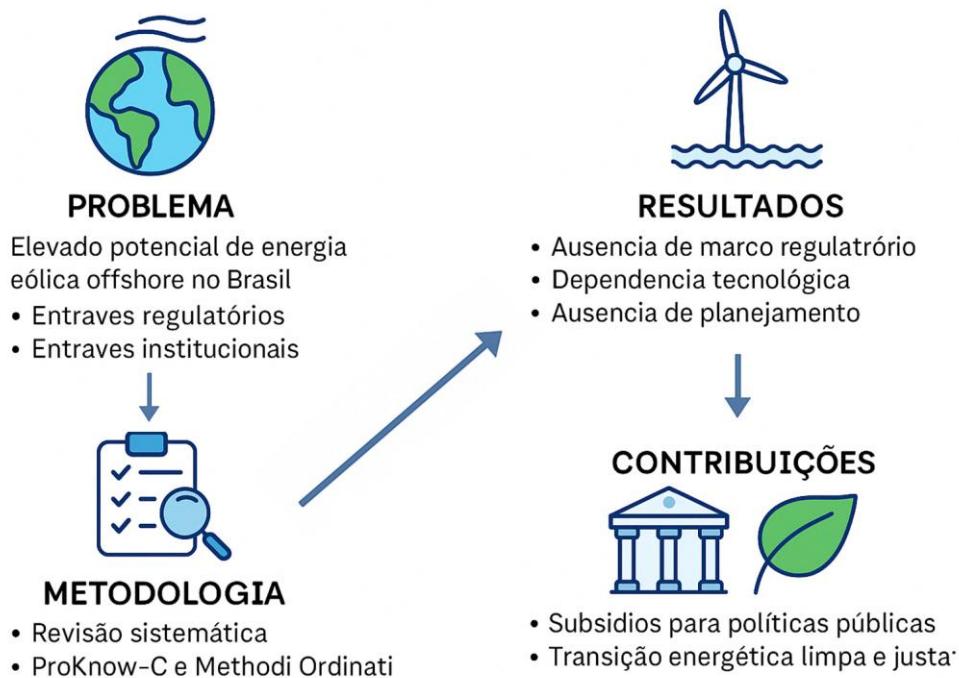
Resultados – Los resultados muestran el alto potencial técnico de la energía eólica *offshore* en Brasil y evidencian la falta de regulación específica, la dependencia tecnológica externa y la ausencia de planificación interinstitucional como principales barreras.

Contribuciones Teóricas/Metodológicas – La combinación de *ProKnow-C* y *Methodi Ordinati* proporciona una base sólida para mapear la producción científica y estructurar recomendaciones críticas para las políticas públicas.

Contribuciones Sociales y Ambientales – El estudio contribuye al avance de una transición energética justa y sostenible en Brasil, ofreciendo insumos relevantes para decisiones políticas orientadas a la mitigación del cambio climático.

PALABRAS CLAVE: Energía eólica *offshore*. Gobernanza ambiental. Políticas públicas.

RESUMO GRÁFICO



1 INTRODUÇÃO

À medida que a demanda global por energia cresce e a preocupação com as mudanças climáticas se intensifica, a transição para fontes de energia renováveis torna-se cada vez mais crítica. Entre as diversas opções de energia limpa, a energia eólica *offshore* tem se destacado por seu elevado potencial de geração em larga escala, utilizando os ventos fortes e constantes encontrados em áreas marítimas. Além de reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa quando comparada às fontes fósseis, a energia eólica *offshore* contribui diretamente para o cumprimento das metas climáticas e dos compromissos assumidos no Acordo de Paris (WORLD ENERGY COUNCIL, 2020).

No contexto brasileiro, onde a matriz energética é fortemente dependente da hidroeletricidade, a diversificação com fontes renováveis complementares, como a eólica *offshore*, torna-se fundamental para garantir segurança energética, adaptabilidade frente a eventos climáticos extremos e redução da vulnerabilidade hídrica. A capacidade global instalada de energia eólica *offshore* tem crescido exponencialmente, evidenciando não apenas sua viabilidade técnica e econômica, mas também seu papel estratégico em políticas climáticas de longo prazo (SMITH *et al.*, 2022). Avanços tecnológicos têm permitido a instalação de turbinas em locais cada vez mais distantes e profundos, aumentando a eficiência dos projetos (JOHNSON; LIU, 2023).

No entanto, a expansão dessa tecnologia não ocorre sem desafios. Questões ambientais, como os impactos sobre a biodiversidade marinha e os ecossistemas costeiros, demandam soluções robustas de engenharia ambiental e planejamento espacial marinho (DOE; CLARK, 2021; FERNANDEZ & GOMEZ, 2022). Além disso, a complexidade da logística de instalação, os elevados custos iniciais de investimento e a necessidade de integração com sistemas de energia existentes ainda representam barreiras importantes (RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2021).

Sobretudo, observa-se que o avanço da energia eólica *offshore* depende menos da disponibilidade técnica ou do potencial eólico e mais da existência de uma governança ambiental eficaz. A ausência de um marco regulatório específico, a fragmentação institucional e a carência de instrumentos de planejamento integrados constituem obstáculos significativos para a implantação dessa fonte no Brasil. Assim, a energia eólica *offshore* deve ser compreendida não apenas como uma solução tecnológica, mas como parte integrante de um processo de reconfiguração institucional e ambiental, essencial para a promoção de uma transição energética justa e resiliente frente às mudanças climáticas globais.

Dado esse contexto, torna-se fundamental realizar uma revisão sistemática da literatura sobre energia eólica *offshore*, com ênfase nos desafios e oportunidades no Brasil. Este estudo tem como objetivo examinar o estado da arte dessa tecnologia no país e no mundo, discutindo seus avanços, gargalos institucionais e implicações para a formulação de políticas públicas voltadas à mitigação climática e à transição energética sustentável.

2 METODOLOGIA

No presente estudo, foi realizada uma revisão sistemática e bibliométrica da literatura, com abordagem quantitativa, conforme descrito por Carvalho *et al.* (2020), que compara o uso dos métodos *ProKnow-Ce Methodi Ordinatio* na estruturação de revisões científicas com rigor metodológico. O objetivo foi identificar e analisar os estudos mais relevantes sobre a energia eólica *offshore*, com ênfase no contexto brasileiro, de forma a subsidiar reflexões sobre sua inserção em políticas públicas e estratégias de governança ambiental diante das mudanças climáticas globais.

A metodologia aplicada combina os princípios do ProKnow-C, conforme proposto por Tasca *et al.* (2010), Ensslin *et al.* (2013), Santos (2017), Caiado *et al.* (2017), Braun *et al.* (2019) e Vicentin *et al.* (2019), com a classificação bibliométrica orientada pelo *Methodi Ordinatio*, segundo Carvalho *et al.* (2020), Pagani *et al.* (2023) e Assunção e Thomé (2023). Diferente das revisões bibliográficas tradicionais, essas abordagens reduzem o viés do pesquisador ao estabelecer critérios objetivos e sequenciais de busca, filtragem e análise, ampliando a transparência, a replicabilidade e a relevância dos resultados.

2.1 Delimitação da pesquisa

A busca bibliográfica foi realizada para o período compreendido entre 1976 e julho de 2024, abrangendo o desenvolvimento histórico e os avanços contemporâneos da energia eólica *offshore*. Essa delimitação temporal permite captar tanto os marcos iniciais da tecnologia quanto suas aplicações mais recentes em contextos de transição energética.

As bases de dados selecionadas foram *Scopus* e *Web of Science* (WoS), reconhecidas por sua abrangência internacional, credibilidade científica e recursos bibliométricos robustos, que permitem avaliar a produção acadêmica de maneira estruturada (PRANCKUTÉ, 2021; KUMPULAINEN; SEPPÄNEN, 2022).

2.2 Procedimento para seleção do portfólio bibliográfico

A estratégia de busca foi construída por meio da combinação dos termos "*Offshore Wind Energy*", "*Offshore Wind Tower**", e "*Offshore Wind Farm**", associada ao operador booleano AND com os termos "*Brazil**" ou "*Brasil**". Foram utilizadas aspas para delimitação de expressões exatas e o caractere coringa ("*") para ampliar a varredura de variações ortográficas e plurais.

A lógica booleana adotada seguiu as recomendações de Gusenbauer (2020) e Pranckuté (2021), garantindo amplitude e precisão na coleta dos documentos. O uso dos operadores "OR" e "AND" assegurou que tanto as variantes dos termos técnicos quanto o foco geográfico fossem contemplados. Assim, a formulação da equação de busca refletiu o rigor metodológico necessário à construção de um portfólio bibliográfico confiável, focado em publicações que abordem de forma direta a temática da energia eólica *offshore* no contexto brasileiro.

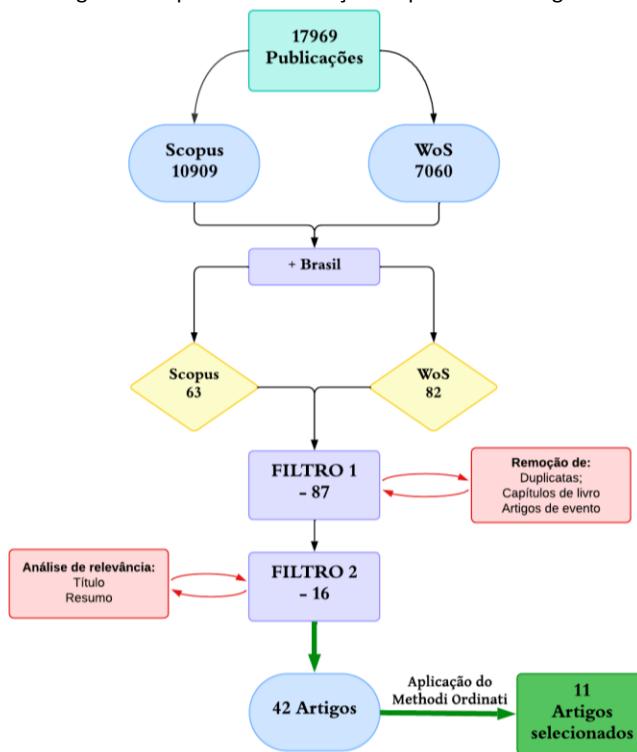
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados referentes aos índices bibliométricos obtidos a partir da análise sistemática do portfólio bibliográfico construído sobre energia eólica *offshore*. A investigação contempla a evolução da produção científica ao longo dos anos, os principais autores, países e periódicos envolvidos, bem como os fatores de impacto dos periódicos e as áreas temáticas predominantes.

A busca inicial resultou em 17.969 publicações, sendo 10.909 oriundas da base *Scopus* e 7.060 da *Web of Science* (*WoS*). A seleção seguiu as etapas do método *ProKnow-C*, conforme Tasca *et al.* (2010) e Ensslin *et al.* (2013), com posterior classificação via *Methodi Ordinati*, conforme Pagani *et al.* (2015). Dada a ampla quantidade de documentos encontrados, optou-se por aplicar um filtro geográfico, priorizando estudos com foco ou aplicação no Brasil, como descrito na seção de Metodologia. Após esse refinamento, foram obtidas 63 publicações na *Scopus* e 82 na *WoS*.

A Figura 1 apresenta o fluxograma do processo de seleção do portfólio. A primeira etapa consistiu na eliminação de duplicatas, artigos redundantes, capítulos de livros e trabalhos de eventos, totalizando 87 exclusões. Em seguida, realizou-se uma análise preliminar de relevância com base nos títulos, o que resultou na exclusão de 16 trabalhos não pertinentes ao escopo temático. Ao final do processo, 42 artigos foram selecionados para aplicação do *Methodi Ordinati*, dos quais 11 obtiveram Índice Ordinatio superior a 100, sendo, portanto, considerados os mais relevantes para esta revisão.

Figura 1 – Fluxograma do processo de seleção do portfólio bibliográfico



Fonte: Autor (2025).

A etapa seguinte consistiu na análise dos trabalhos finais com base em ano de publicação, autoria, periódicos, fator de impacto, países de afiliação institucional e áreas

temáticas. Com o auxílio dos softwares Microsoft Excel, EndNote e VOSviewer, os dados foram organizados em planilhas e submetidos à análise de coocorrência de termos, permitindo a identificação dos tópicos mais frequentes nas publicações e a estruturação de agrupamentos temáticos recorrentes.

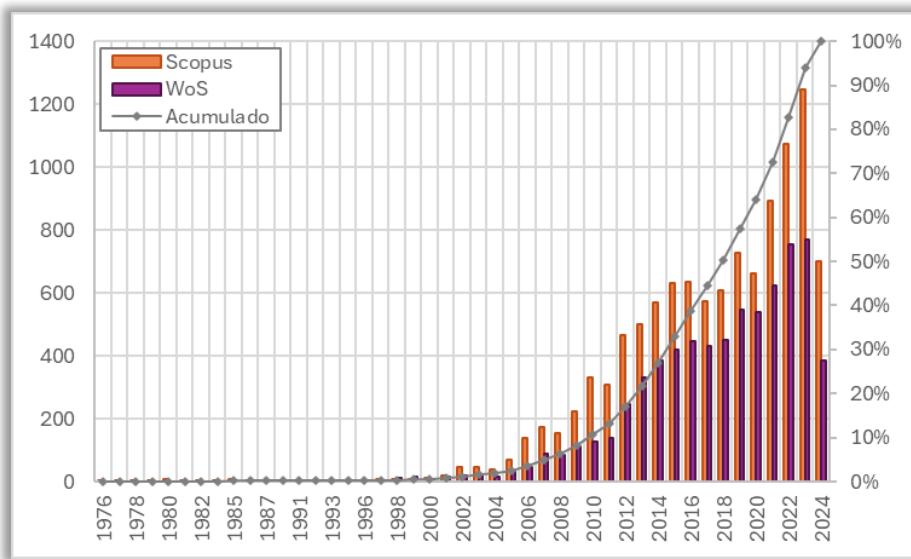
3.1 Análise Global

Neste capítulo, apresentam-se os resultados preliminares da pesquisa bibliométrica, baseada nos artigos obtidos nas bases *Scopus* e *Web of Science* (WoS). O objetivo desta análise é traçar um panorama internacional da produção científica sobre energia eólica *offshore*, considerando a evolução temporal das publicações, os periódicos com maior incidência no tema e as principais áreas de enfoque abordadas na literatura global.

Optou-se por delimitar a análise ao período de 1976 a julho de 2024, com o intuito de abranger desde os primeiros registros acadêmicos até os estudos mais recentes disponíveis, permitindo a identificação das tendências mais atuais no campo. Essa decisão metodológica também visa garantir coerência temporal com o escopo da pesquisa e com os filtros aplicados na seleção do portfólio bibliográfico.

A Figura 2 ilustra a evolução anual do número de publicações sobre energia eólica *offshore* nas duas bases analisadas. Nota-se um crescimento discreto até 2008, seguido por um aumento exponencial a partir de 2016, o que evidencia o interesse crescente da comunidade científica frente ao avanço tecnológico, às exigências de descarbonização e à integração de fontes renováveis nos sistemas energéticos.

Figura 2 – Publicações ao longo do tempo nas plataformas *Scopus* e WoS

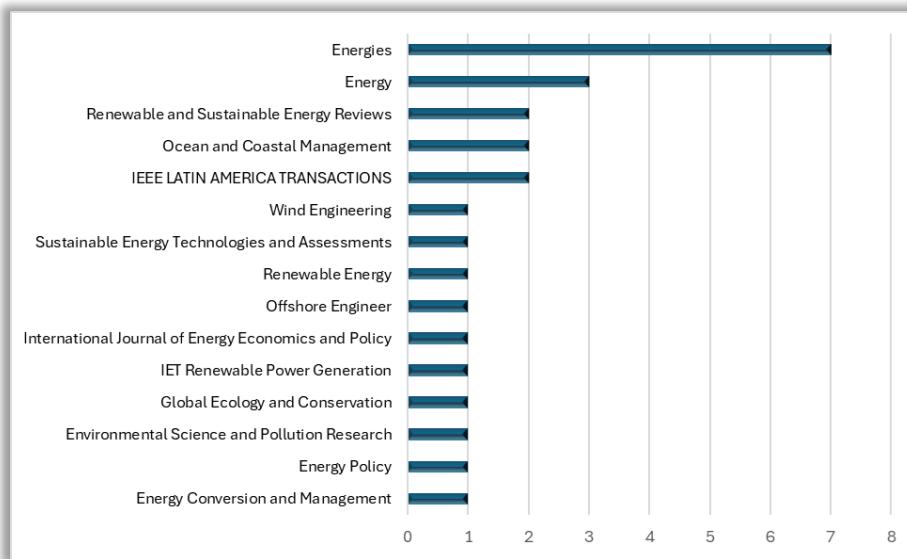


Fonte: Autor (2025)

O gráfico acumulado (linha cinza) reforça a consolidação do conhecimento nos últimos 15 anos, período no qual foram publicados mais de 90% dos estudos identificados, indicando a maturidade e a relevância atual da temática no cenário global.

A Figura 3 apresenta os periódicos com maior número de publicações sobre energia eólica *offshore*, com base nos 42 artigos selecionados após a remoção de duplicatas e documentos não científicos. O periódico Energies lidera em número de publicações, seguido por Energy e Renewable and Sustainable Energy Reviews, todos reconhecidos por sua atuação em energia limpa, políticas energéticas e sustentabilidade.

Figura 3 – Periódicos com maior número de publicações sobre energia eólica *offshore*



Fonte: Autor (2025)

Essa concentração em periódicos de alto fator de impacto reforça a relevância científica da energia eólica *offshore*, não apenas como tema tecnológico, mas como parte integrante das estratégias de transição energética sustentável. Além disso, os resultados apontam para uma intensificação da cooperação internacional, refletida nos artigos que abordam regulação ambiental, planejamento marinho e inovação em políticas públicas.

Este panorama global fornece uma base sólida para as análises posteriores, que serão aprofundadas a partir da aplicação do *Methodi Ordinati* no portfólio filtrado para o contexto brasileiro. Essa transição da visão global para a análise nacional permite identificar gargalos, oportunidades e diretrizes estratégicas para o avanço da energia eólica *offshore* como vetor de governança climática no Brasil.

3.2 Análise *Methodi Ordinati*

A partir da aplicação do *Methodi Ordinati*, os 42 artigos previamente selecionados passaram por uma classificação quantitativa rigorosa, com base no fator de impacto dos periódicos (FI), número de citações (Ci) e ano de publicação. Essa abordagem permitiu a construção de um índice composto de relevância científica, resultando na seleção de 11 artigos com Índice Ordinatio superior a 100, considerados os mais relevantes para esta revisão.

Este capítulo tem como objetivo realizar uma análise aprofundada desses 11 estudos, apresentados na Tabela 1, com destaque para suas contribuições científicas, abordagens metodológicas e implicações práticas para o desenvolvimento e a governança da energia eólica *offshore* no Brasil. A análise permite identificar não apenas os avanços tecnológicos discutidos,

mas também as lacunas regulatórias, estratégias institucionais e os contextos socioambientais abordados pelas publicações.

Tabela 1 – Artigos selecionados segundo o *Methodi Ordinatio*

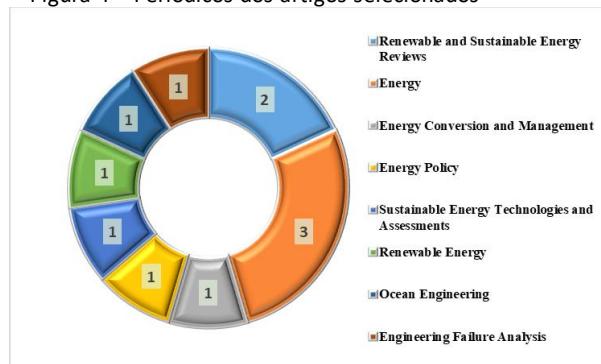
Ranking	Autores	Título do artigo	FI	Ano	Ci	InOrdinatio
1	Vinhoza A.; Schaeffer R.	Brazil's offshore wind energy potential assessment based on a Spatial Multi-Criteria Decision Analysis	28,5	2021	70	456,05
2	Leite G.D.N.P. et al.	Economic and sensitivity analysis on wind farm end-of-life strategies	28,5	2022	20	349,03
3	Borba P.C.S. et al.	Enhancing drought resilience and energy security through complementing hydro by offshore wind power—The case of Brazil	18	2023	11	233,68
4	Sant'Anna S.G.M. et al.	Proposal of a methodology to use offshore wind energy on the southeast coast of Brazil	13,4	2019	54	217,42
5	González M.O.A. et al.	Regulation for offshore wind power development in Brazil	12,4	2020	25	168,73
6	Böhme G.S. et al.	Wake effect measurement in complex terrain - A case study in Brazilian wind farms	13,4	2018	22	157,53
7	Lozer R.M.M. et al.	Economic analysis for implantation of an offshore wind farm in the Brazilian coast	6,5	2021	38	156,05
8	Choupin, O. et al.	Integration of assessment-methods for wave renewable energy: Resource and installation feasibility	13,6	2022	5	150,03
9	Santos J.V.C. et al.	Scaling behavior of wind speed in the coast of Brazil and the South Atlantic Ocean: The crossover phenomenon	13,4	2021	5	142,55
10	Muhabie, Y.T. et al.	A discrete-event simulation approach to evaluate the effect of stochastic parameters on offshore wind farms assembly strategies	6,5	2018	43	118,53
11	Fazeres F.T. et al.	Probabilistic design and reliability analysis of scour protections for offshore windfarms	5,3	2018	45	109,39

Fonte: Autor (2024)

A Tabela 1 apresenta os autores, títulos dos artigos, fator de impacto (FI) dos periódicos, ano de publicação, número de citações e o respectivo Índice Ordinatio (InOrdinatio), evidenciando a qualificação científica do portfólio final.

Em seguida, a Figura 4 ilustra a distribuição dos artigos selecionados por periódico, permitindo a identificação das fontes científicas mais recorrentes no debate internacional sobre energia eólica offshore.

Figura 4 – Periódicos dos artigos selecionados



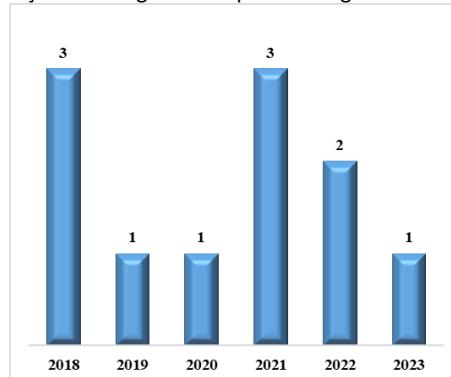
Fonte: Autor (2025)

Observa-se que os periódicos Energy, Renewable and Sustainable Energy Reviews e Sustainable Energy Technologies and Assessments concentram a maior parte das publicações,

refletindo não apenas a importância do tema no cenário internacional, mas também a relevância de canais científicos voltados à inovação sustentável, políticas energéticas e avaliação de tecnologias limpas.

A Figura 5 apresenta a distribuição temporal dos 11 artigos selecionados, evidenciando os anos de 2018 e 2021 como os de maior concentração de estudos considerados altamente relevantes. Esse dado reforça a tendência já observada na análise global: um crescimento acelerado na produção científica sobre energia eólica *offshore* a partir de 2016, com picos associados à intensificação das agendas climáticas e da busca por soluções energéticas sustentáveis.

Figura 5 – Publicações ao longo do tempo dos artigos selecionados



Fonte: Autor (2025)

A comparação com a Figura 2, anteriormente apresentada, permite observar uma correlação direta entre a evolução da produção científica global e a emergência dos artigos mais relevantes no portfólio final. Esse alinhamento temporal sugere que o avanço do conhecimento técnico e regulatório sobre energia eólica *offshore* ocorre de forma sincronizada com a intensificação das discussões sobre transição energética e governança climática.

Portanto, esta análise temporal e qualitativa é fundamental para compreender como a tecnologia eólica *offshore* tem evoluído enquanto campo científico e quais são os principais focos de atenção, desafios emergentes e áreas potenciais para futuras pesquisas e formulação de políticas públicas no Brasil.

3.3 Análise Econômica da Energia Eólica *Offshore* no Brasil

A análise econômica representa um dos eixos centrais para a viabilidade e implementação estratégica de projetos de energia eólica *offshore*, especialmente em países em desenvolvimento que buscam alternativas sustentáveis de crescimento energético. No contexto brasileiro, avaliar a competitividade do setor é essencial não apenas do ponto de vista financeiro, mas também como subsídio para decisões de governança climática e energética, alinhadas aos compromissos internacionais de redução de emissões e transição para uma economia de baixo carbono.

O estudo de Reis *et al.* (2021) apresenta uma avaliação detalhada sobre os custos associados à implantação de parques eólicos *offshore* na costa brasileira. Os autores identificam que a região Nordeste, particularmente entre os estados do Maranhão e Rio Grande do Norte, apresenta o menor custo nivelado de energia (LCOE), estimado em cerca de US\$ 69,9/MWh.

Essa competitividade está associada à combinação de ventos intensos e constantes, menor profundidade oceânica e proximidade com subestações onshore, reduzindo os custos relacionados às fundações e à transmissão elétrica.

A análise reforça que a escolha locacional e a integração territorial são fatores decisivos para a viabilidade técnica e econômica dos projetos. Isso evidencia a importância de instrumentos de planejamento espacial e ambiental, tais como Zoneamentos Ecológico-Econômicos (ZEE), Planos de Gestão Costeira e licenciamento ambiental integrado, elementos fundamentais para a governança multiescalar dos espaços marinhos brasileiros.

Comparativamente, o estudo de Johnston *et al.* (2020) revela que o LCOE em países como Dinamarca e Suécia varia entre € 87/MWh e € 220/MWh, sugerindo que o Brasil já apresenta competitividade econômica frente a países com mercados consolidados. No entanto, ao contrário desses países, o Brasil ainda carece de um arcabouço regulatório específico e de políticas públicas robustas que favoreçam a entrada de investidores no setor *offshore*.

Dessa forma, a viabilidade econômica da energia eólica *offshore* no Brasil deve ser interpretada à luz de uma governança ambiental e climática eficaz, que integre incentivos fiscais, linhas de financiamento verde, diretrizes territoriais e mecanismos regulatórios claros e estáveis. Sem esses elementos, mesmo as vantagens comparativas do país podem ser insuficientes para transformar o potencial técnico em realidade concreta.

Assim, os dados econômicos não apenas demonstram a atratividade da energia eólica *offshore*, mas também reforçam a urgência da atuação governamental coordenada, com vistas a viabilizar um modelo de desenvolvimento energético que seja, ao mesmo tempo, resiliente às mudanças climáticas, inclusivo e sustentável.

3.4 Potencial Eólico e Localização de Parques *Offshore*

A adequada identificação de áreas com elevado potencial técnico para a instalação de parques eólicos *offshore* é etapa fundamental tanto para a viabilidade econômica dos empreendimentos quanto para a formulação de políticas públicas sustentáveis de ocupação do espaço marinho. Nesse sentido, a localização dos projetos se conecta diretamente com a governança ambiental e territorial, exigindo integração entre dados técnicos, planos diretores costeiros e instrumentos de regulação ambiental.

No estudo de Sousa *et al.* (2019), foi proposta uma metodologia de análise espacial para aplicação da energia eólica *offshore* na costa sudeste do Brasil, com ênfase no estado do Rio de Janeiro. Utilizando ferramentas públicas de acesso gratuito, os autores identificaram o ponto de coleta de dados "Arraial do Cabo-A606" como o local mais promissor para a implantação de parques eólicos, em virtude da profundidade oceânica moderada e do alto potencial eólico verificado na região.

A estimativa do potencial energético foi realizada por meio da aplicação da distribuição de Weibull, amplamente utilizada para modelagem da variabilidade do vento. Os resultados indicaram velocidades médias anuais elevadas, compatíveis com os requisitos técnicos para operação eficiente de turbinas eólicas *offshore*, o que reforça a viabilidade da região para projetos futuros.

Contudo, além da viabilidade técnica, a seleção de locais para usinas *offshore* no Brasil exige o fortalecimento da governança climática e marinha, por meio de instrumentos como o

Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC), políticas de licenciamento ambiental adaptado e mecanismos de pactuação federativa que envolvam municípios, estados e a União.

A localização estratégica de projetos deve considerar, ainda, a minimização de conflitos socioambientais, a preservação de ecossistemas sensíveis e a inclusão das comunidades costeiras nos processos de decisão. Assim, o planejamento territorial da energia eólica *offshore* deve se articular com uma agenda ampla de resiliência climática, justiça ambiental e democratização do acesso à energia limpa.

3.5 Desafios Tecnológicos e Ambientais

O desenvolvimento de soluções tecnológicas para implantação de turbinas eólicas em ambientes marinhos é um dos maiores desafios enfrentados pela expansão da energia eólica *offshore* no Brasil. Entre os aspectos mais críticos, destacam-se os sistemas de fundação estrutural, que devem conciliar segurança, viabilidade econômica e adaptação às diferentes profundidades da plataforma continental brasileira.

O estudo de Ferradosa *et al.* (2018) apresenta as fundações flutuantes como uma alternativa viável para áreas de maior profundidade, como as costas das regiões Sudeste e Sul do Brasil, onde a aplicação de monopilhas ou estruturas fixas convencionais se torna economicamente inviável. Embora promissoras, essas soluções ainda enfrentam barreiras tecnológicas e de custo, que exigem investimento contínuo em pesquisa e desenvolvimento.

Nesse contexto, Assunção e Thomé (2023) ressaltam a importância da gestão por competências no setor público, com foco na capacitação técnica, inovação institucional e governança setorial. A superação dos entraves tecnológicos passa necessariamente por políticas públicas orientadas à inovação, incentivos à cooperação entre universidades e empresas, e estratégias industriais que favoreçam a nacionalização de tecnologias.

Paralelamente aos desafios de engenharia, destacam-se as questões ambientais associadas à instalação de estruturas *offshore*, que envolvem riscos à biodiversidade marinha, aos ecossistemas costeiros e à dinâmica dos fundos oceânicos. O estudo de Gonzalez *et al.* (2020) evidencia a necessidade de estratégias robustas de mitigação ambiental, capazes de integrar os processos de licenciamento, monitoramento e compensação.

Nesse sentido, o avanço da energia eólica *offshore* deve ser pautado por uma abordagem de governança ambiental adaptativa, que considere os riscos ecológicos de longo prazo, promova transparência nos estudos de impacto, e articule os diferentes níveis de governo na construção de uma agenda regulatória alinhada aos princípios da sustentabilidade e da precaução.

Portanto, os desafios tecnológicos e ambientais não devem ser vistos isoladamente, mas como parte de uma agenda mais ampla de resiliência climática e desenvolvimento sustentável, na qual a inovação técnica deve caminhar lado a lado com o fortalecimento das instituições ambientais e dos instrumentos de controle social.

3.6 Contribuições para a Diversificação da Matriz Energética Brasileira

A matriz energética brasileira, historicamente sustentada pela predominância da geração hidrelétrica, apresenta elevada dependência de condições hidrológicas estáveis. Essa característica torna o sistema vulnerável a períodos de escassez hídrica, cada vez mais

frequentes e intensos em função das mudanças climáticas. Em contextos de estiagem prolongada, o país recorre à geração termelétrica, que, além de mais poluente, implica em custos operacionais e ambientais significativamente mais elevados.

Nesse cenário, a inserção da energia eólica *offshore* como fonte complementar e estratégica representa uma oportunidade concreta de reduzir a vulnerabilidade estrutural da matriz energética nacional. Segundo Sousa *et al.* (2019), as regiões Sudeste e Nordeste reúnem condições ideais para o aproveitamento desse tipo de energia, com alta demanda urbana e industrial e potencial eólico marítimo elevado.

A combinação entre energia hidrelétrica e eólica *offshore* oferece ganhos importantes em segurança energética, estabilidade de fornecimento e redução de emissões de gases de efeito estufa, promovendo uma matriz mais equilibrada, flexível e resiliente. Além disso, a complementaridade entre essas fontes favorece o aproveitamento dos períodos sazonais de maior geração eólica, reduzindo a necessidade de acionamento de termelétricas e preservando os reservatórios hídricos.

No entanto, essa diversificação exige mais do que viabilidade técnica. Ela depende de planejamento energético intersetorial, regulação ambiental integrada e governança multiescalar, com atuação coordenada entre ministérios, agências reguladoras, operadoras do sistema elétrico, setor privado e sociedade civil. A elaboração de planos nacionais de transição energética justa e a criação de instrumentos de incentivo à inovação em energias renováveis são passos essenciais para viabilizar essa mudança estrutural.

Portanto, a energia eólica *offshore* deve ser compreendida como um vetor de transformação da matriz elétrica brasileira, alinhado às metas climáticas, aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e ao fortalecimento da resiliência nacional frente aos impactos das mudanças climáticas.

3.7 Comparação com Estudos Internacionais

A comparação entre os estudos sobre a energia eólica *offshore* no Brasil e as experiências internacionais revela um potencial ainda subexplorado, mas repleto de oportunidades estratégicas. Conforme destaca Muhabie *et al.* (2018), o Brasil apresenta condições técnicas e geográficas que o qualificam para se tornar líder regional no desenvolvimento de projetos *offshore*, especialmente em função da extensão do seu litoral, da qualidade dos ventos e da crescente demanda por fontes renováveis.

Países como o Reino Unido, Alemanha, Dinamarca e Holanda já consolidaram programas robustos de energia eólica *offshore*, ancorados em políticas públicas de longo prazo, subsídios direcionados à inovação tecnológica, mecanismos de precificação de carbono e marcos regulatórios estáveis. Essas nações representam modelos de governança ambiental e energética integrados, nos quais a expansão das energias renováveis é tratada como questão estratégica de Estado e componente essencial da agenda climática.

O Brasil, por outro lado, ainda enfrenta desafios institucionais importantes, como a ausência de um marco regulatório específico para o uso do espaço marinho, a fragmentação de competências entre órgãos ambientais e energéticos, e a dependência de tecnologias estrangeiras. As lições internacionais oferecem subsídios valiosos para a estruturação de políticas nacionais adaptadas ao contexto brasileiro, respeitando suas especificidades socioambientais e institucionais.

Outro ponto de destaque é o papel das grandes corporações globais, que lideram projetos *offshore* na Europa e têm ampliado sua atuação em mercados emergentes. A entrada dessas empresas no Brasil pode representar uma oportunidade estratégica, desde que acompanhada por instrumentos regulatórios eficazes, garantias socioambientais e mecanismos de transferência de tecnologia e capacitação local.

Assim, a comparação com os estudos internacionais evidencia que o Brasil possui os insumos naturais e o interesse global necessários para se destacar no setor. No entanto, será fundamental construir um arcabouço de governança climática e energética robusto, transparente e coordenado, capaz de transformar potencial técnico em realidade econômica, social e ambientalmente sustentável.

3.8 Aspectos Regulatórios e Legais

Um dos principais entraves para a consolidação da energia eólica *offshore* no Brasil reside na ausência de um marco regulatório claro, integrado e funcional que discipline o uso do espaço marítimo para fins energéticos. Essa lacuna normativa compromete a previsibilidade e a segurança jurídica necessárias à atração de investimentos, ao licenciamento ambiental eficaz e à coordenação interinstitucional.

Segundo Santos (2021), a indefinição legal sobre competências, critérios de outorga e procedimentos de licenciamento representa uma barreira estrutural que limita o avanço de projetos *offshore*, mesmo diante de estudos técnicos e econômicos que já comprovam o elevado potencial brasileiro. Em países que lideram o setor, como Reino Unido e Alemanha, a existência de marcos regulatórios estáveis e coerentes foi determinante para o êxito da expansão eólica marítima.

No Brasil, iniciativas como o Projeto de Lei nº 576/2021 e a minuta do Marco Legal da Energia *Offshore*, em tramitação no Congresso Nacional, representam avanços importantes, mas ainda não consolidam uma estrutura normativa completa. Questões como a titularidade das áreas marinhas, a integração com os planos de gestão costeira, a necessidade de zoneamento ambiental prévio e a definição de instrumentos de compensação socioambiental permanecem em aberto.

Além disso, a dependência de cadeias produtivas e logísticas estrangeiras para equipamentos e tecnologias acentua a urgência de uma política industrial e regulatória articulada, que favoreça a nacionalização de partes da cadeia, o desenvolvimento de competências locais e a mitigação de riscos ambientais e sociais.

Portanto, o fortalecimento do arcabouço legal e institucional da energia eólica *offshore* no Brasil deve ser entendido como uma agenda de governança climática de Estado, e não apenas como um ajuste setorial. A construção desse marco regulatório deve dialogar com os princípios da precaução, justiça ambiental, participação social e desenvolvimento sustentável, articulando planejamento energético, zoneamento ambiental e instrumentos econômicos em uma perspectiva integrada de longo prazo.

3.9 Lições Internacionais Aplicadas à Governança e Viabilidade da Energia Eólica *Offshore*

A análise comparativa entre o Brasil e experiências internacionais em energia eólica *offshore* permite identificar desafios estruturais comuns, oportunidades de aprendizado

institucional e referenciais regulatórios e tecnológicos que podem orientar o aprimoramento da governança nacional. Países como Dinamarca, Suécia, Japão, Reino Unido e Alemanha vêm consolidando políticas públicas robustas e estratégias de longo prazo para viabilizar o crescimento sustentável desse setor.

De acordo com Johnston *et al.* (2020), o custo nivelado de energia (LCOE) em países europeus como Dinamarca e Suécia varia entre €87/MWh e €220/MWh, refletindo as particularidades logísticas, tecnológicas e regulatórias de cada contexto. Esses países têm investido amplamente em infraestrutura portuária, inovação em fundações e planejamento energético, com forte suporte governamental e políticas de incentivo fiscal e tarifário.

No Brasil, os estudos de Reis *et al.* (2021) indicam que o LCOE pode alcançar valores mais competitivos, especialmente no Nordeste, com proximidade costeira, ventos constantes e profundidades moderadas, resultando em estimativas de aproximadamente US\$ 69,9/MWh. Embora economicamente promissor, o cenário brasileiro ainda carece de um arcabouço regulatório funcional e integrado, o que dificulta a transformação desse potencial técnico em realidade operacional.

No caso do Japão, Muhabie *et al.* (2018) destacam a complexidade logística e a escassez de áreas rasas, o que impõe desafios semelhantes aos enfrentados no Brasil em regiões com plataforma continental mais profunda. Ambos os países compartilham a necessidade de soluções tecnológicas adaptadas e investimentos coordenados em infraestrutura de montagem e transporte para viabilizar a expansão dos projetos.

Enquanto países como Reino Unido e Alemanha já apresentam um ecossistema consolidado para o setor *offshore*, com sistemas de leilão dedicados, planos nacionais de energia marinha e parcerias público-privadas estruturadas, o Brasil ainda enfrenta barreiras regulatórias, fragmentação institucional e dependência de cadeias produtivas estrangeiras, conforme também discutido por Santos (2021).

A crescente atuação de atores internacionais com expertise técnica consolidada em projetos *offshore* sinaliza oportunidades de cooperação estratégica com o Brasil, desde que sejam garantidas condições regulatórias estáveis, licenciamento célere e responsável, e mecanismos de transferência de tecnologia e capacitação local. Essas parcerias podem acelerar a implantação de projetos e fortalecer a inserção brasileira na cadeia global de energia limpa.

Assim, a comparação internacional não apenas revela contrastes técnicos e regulatórios, mas também fornece insumos fundamentais para o aprimoramento da governança climática brasileira, conectando o país a uma agenda global de transição energética resiliente e sustentável.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo realizou uma revisão sistemática e bibliométrica da literatura sobre energia eólica *offshore*, com especial atenção ao contexto brasileiro e suas interfaces com a governança ambiental e climática. A combinação dos métodos *ProKnow-C* e *Methodi Ordinati* permitiu selecionar, classificar e analisar as publicações mais relevantes da área, resultando em um portfólio de alta qualidade científica e relevância estratégica.

Os resultados evidenciam que o Brasil possui condições técnicas e naturais altamente favoráveis ao desenvolvimento da energia eólica *offshore*, especialmente nas regiões Nordeste e Sudeste. As análises econômicas demonstram que o custo nivelado de energia (LCOE) no país

pode ser competitivo em relação a países líderes no setor, enquanto os estudos de localização reforçam a viabilidade técnica de diversas áreas costeiras.

No entanto, os avanços do setor no Brasil ainda são limitados pela ausência de um marco regulatório específico, pela fragmentação institucional, pela dependência de cadeias de suprimento internacionais e pela falta de integração entre planejamento energético, ambiental e territorial. Tais lacunas não são meramente operacionais, mas revelam a necessidade de um modelo de governança ambiental e climática mais robusto, coordenado e adaptativo, capaz de responder aos desafios técnicos, ecológicos e sociais da implementação de grandes projetos offshore.

A comparação com experiências internacionais revela lições importantes para o Brasil, tanto em termos de políticas públicas quanto de estratégias de incentivo, participação social, licenciamento ambiental e organização do setor elétrico. O fortalecimento da cooperação internacional, aliado à capacitação local e à transparência nos processos decisórios, é fundamental para garantir que o avanço da energia eólica offshore ocorra de forma inclusiva, resiliente e alinhada aos compromissos climáticos globais.

Conclui-se, portanto, que a energia eólica offshore não deve ser tratada apenas como uma alternativa tecnológica ou econômica, mas como um instrumento estratégico de governança ambiental, com potencial de contribuir decisivamente para a diversificação da matriz energética brasileira, a mitigação das mudanças climáticas e a promoção do desenvolvimento sustentável. Pesquisas futuras devem focar no aprimoramento da regulação, na articulação interinstitucional e na avaliação de impactos sociais e ecológicos de longo prazo, orientando políticas públicas mais integradas e eficazes para o setor.

4 REFERÊNCIAS

- AFONSO, M. H. F. et al. Como construir conhecimento sobre o tema de pesquisa? Aplicação do processo ProKnow -C na busca de literatura sobre avaliação do desenvolvimento sustentável. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, São Paulo, v. 5, n. 2, p. 47–62, 2011.
- ASSUNÇÃO, L. L. R.; THOMÉ, C. Gestão por competências na administração pública: uma revisão sistemática. **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, v. 16, n. 47, p. 54–72, 2023.
- BÖHME, G. S. et al. Wake effect measurement in complex terrain – A case study in Brazilian wind farms. **Energy**, v. 161, p. 277–283, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.119>.
- BORBA, P. C. S. et al. Enhancing drought resilience and energy security through complementing hydro by offshore wind power – The case of Brazil. **Energy Conversion and Management**, v. 277, 116616, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116616>.
- BRAUN, A. B. et al. Sustainable remediation through the risk management perspective and stakeholder involvement: A systematic and bibliometric view of the literature. **Environmental Pollution**, v. 255, 113221, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113221>.
- CARVALHO, G. D. G. et al. Bibliometrics and systematic reviews: a comparison between the ProKnow -C and the Methodi Ordinatio. **Journal of Informetrics**, v. 14, n. 3, p. 101043, 2020.
- CHOUPIN, O. et al. Integration of assessment-methods for wave renewable energy: Resource and installation feasibility. **Renewable Energy**, v. 185, p. 455–482, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.035>.

FAZERES-FERRADOSA, T. et al. Probabilistic design and reliability analysis of scour protections for offshore windfarms. **Engineering Failure Analysis**, v. 91, p. 291–305, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.04.035>.

GONZALES, P.; HUI, A.; HENDERSON, S. Environmental impacts of offshore wind farms: issues and strategies for sustainable development. **Marine Pollution Bulletin**, v. 158, p. 111403, 2020.

GONZALEZ, M. O. A. et al. Regulation for offshore wind power development in Brazil. **Energy Policy**, v. 145, 111756, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111756>.

GUSENBAUER, M. Which academic search systems are suitable for systematic reviews or meta-analyses? Evaluating retrieval qualities of Google Scholar, PubMed, and 26 other resources. **Research Synthesis Methods**, v. 11, p. 181–217, 2020.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Renewable Energy Statistics 2021**. Abu Dhabi: IRENA, 2021. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Aug/IRENA_Renewable_Energy_Statistics_2021.pdf.

JOHNSTON, B.; FOLEY, A.; DORAN, J.; LITTLER, T. Levelised cost of energy, a challenge for offshore wind. **Renewable Energy**, v. 160, p. 876–885, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.030>.

KUMPULAINEN, M.; SEPPÄNEN, M. Combining Web of Science and Scopus datasets in citation-based literature study. **Scientometrics**, v. 127, p. 5613–5631, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11192-022-04475-7>.

LEITE, G. D. N. P. et al. Economic and sensitivity analysis on wind farm end-of-life strategies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 160, 112273, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112273>.

MUHABIE, Y. T. et al. A discrete-event simulation approach to evaluate the effect of stochastic parameters on offshore wind farms assembly strategies. **Ocean Engineering**, v. 149, p. 279–290, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.12.018>.

PAGANI, R. N. et al. Methodi Ordinatio 2.0: revisited under statistical estimation, and presenting Finder and RankIn. **Quality & Quantity**, v. 57, n. 5, p. 4563–4602, 2023.

PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M. Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. **Scientometrics**, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1744-x>. Acesso em: 28 maio 2025.

PRANCKUTÉ, R. Web of Science (WoS) and Scopus: the titans of bibliographic information in today's academic world. **Publications**, v. 9, n. 12, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/publications9010012>. Acesso em: 28 maio 2025.

REIS, M. M. L. dos; MAZETTO, B. M.; SILVA, E. C. M. da. Economic analysis for implantation of an offshore wind farm in the Brazilian coast. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 43, p. 100955, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100955>.

SANTOS, J. V. C. et al. Scaling behavior of wind speed in the coast of Brazil and the South Atlantic Ocean: The crossover phenomenon. **Energy**, v. 217, 119413, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119413>.

SOUZA, M. S. A. de et al. Proposal of a methodology to use offshore wind energy on the southeast coast of Brazil. **Energy**, v. 185, p. 327–336, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.057>.

SOUZA, M. S. A. de; PAIVA, J. M. F. de; MORIS, V. A. da S.; NUNES, A. O. Proposal of a methodology to use offshore wind energy on the southeast coast of Brazil. **Energy**, v. 185, p. 327–336, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.057>. Acesso em: 28 maio 2025.

VICENTIN, D. et al. Aplicação do ProKnow-C para seleção de um portfólio bibliográfico e análise bibliométrica sobre avaliação de desempenho da gestão do conhecimento. **Revista Gestão Industrial**, v. 8, n. 1, p. 76–92, 2012. DOI: 10.3895/S1808-04482012000100005.

VILELA, L. O. Aplicação do ProKnow-C para seleção de um portfólio bibliográfico e análise bibliométrica sobre avaliação de desempenho da gestão do conhecimento. **Revista Gestão Industrial**, v. 8, n. 1, p. 76–92, 2012.

VINHOZA, A.; SCHAEFFER, R. Brazil's offshore wind energy potential assessment based on a Spatial Multi-Criteria Decision Analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 146, 111185, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111185>.

WORLD ENERGY COUNCIL. **World Energy Trilemma Index 2020**. Londres: World Energy Council; Oliver Wyman, 2020. Disponível em: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World_Energy_Trilemma_Index_2020_-_REPORT.pdf. Acesso em: 28 maio 2025.

DECLARAÇÕES

CONTRIBUIÇÃO DE CADA AUTOR

Todos os autores contribuíram para a totalidade do artigo, em todas as etapas.

DECLARAÇÃO DE CONFLITOS DE INTERESSE

Nós, Rodrigo H. R. Q. Melo, Ricardo H. R. Q. Melo e Evanisa F. R. Q. Melo, declaramos que o manuscrito intitulado “Governança Climática e Energia Eólica Offshore no Brasil: Avanços, Desafios e Perspectivas”:

1. **Vínculos Financeiros:** Não possui/possui vínculos financeiros que possam influenciar os resultados ou interpretação do trabalho.
 2. **Relações Profissionais:** Não possui/possui relações profissionais que possam impactar na análise, interpretação ou apresentação dos resultados
 3. **Conflitos Pessoais:** Não possui/possui conflitos de interesse pessoais relacionados ao conteúdo do manuscrito.
-