



ANÁLISE SISTEMÁTICA DAS PRINCIPAIS FORÇAS ATUANTES EM FUNDAÇÕES *OFFSHORE*

LUCAS THIAGO GOMES SOARES DE ARAUJO – lucasago28@gmail.com
CREATION RESEARCH GROUP/PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO-UFRN

MARIO ORESTES AGUIRRE CONZÁLEZ - mario.gonzalez@ufrn.br
CREATION RESEARCH GROUP/PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO-UFRN

LUANA PEREIRA NOGUEIRA - luanapereiranog@gmail.com
CREATION RESEARCH GROUP

PEDRO HENRIQUE CASTRO BEZERRA – pedrocastro.pj@gmail.com
CREATION RESEARCH GROUP/PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO-UFRN

RAPHAEL BEZERRA DE SOUZA – raphael.souza.089@ufrn.edu.br
CREATION RESEARCH GROUP/PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO-UFRN

ÁREA: 05.ENGENHARIA DO PRODUTO

SUBÁREA: 5.1 - GESTÃO DO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO

RESUMO: ESTE ARTIGO ABORDA A ENERGIA EÓLICA OFFSHORE COMO UMA SOLUÇÃO PROMISSORA PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA GLOBAL, DESTACANDO OS DESAFIOS TÉCNICOS E OPERACIONAIS ENFRENTADOS PELAS FUNDAÇÕES DE TURBINAS EM AMBIENTES MARÍTIMOS. O OBJETIVO É IDENTIFICAR E ANALISAR AS PRINCIPAIS FORÇAS ATUANTES EM FUNDAÇÕES OFFSHORE, COMO ONDAS, VENTOS, DESASTRES NATURAIS E FORÇAS EXTERNAS, AVALIANDO SEUS IMPACTOS ESTRUTURAIS, INCLUINDO FADIGA, FLAMBAGEM E DESLOCAMENTO DO SOLO. BASEANDO-SE EM UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA DE PUBLICAÇÕES ENTRE 2023 E 2025, A PESQUISA REVELOU A PREDOMINÂNCIA DO USO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (FEM) PARA ANÁLISE ESTRUTURAL E DESTACOU TECNOLOGIAS EMERGENTES, COMO TURBINAS FLUTUANTES, QUE AMPLIAM O POTENCIAL EM ÁGUAS PROFUNDAS. A ANÁLISE GEOGRÁFICA EVIDENCIOU A LIDERANÇA DA CHINA E DE PAÍSES DO LESTE EUROPEU E AMÉRICA DO NORTE EM PUBLICAÇÕES SOBRE O TEMA, REFLETINDO SEUS AVANÇOS EM INOVAÇÃO. APESAR DOS PROGRESSOS, O ESTUDO CONCLUI QUE HÁ NECESSIDADE DE INVESTIGAÇÕES CONTÍNUAS PARA DESENVOLVER SOLUÇÕES ROBUSTAS E SUSTENTÁVEIS, GARANTINDO A VIABILIDADE E A DURABILIDADE DAS TURBINAS OFFSHORE EM CONDIÇÕES ADVERSAS.

PALAVRAS-CHAVES: ENERGIA EÓLICA; FUNDAÇÕES; ANÁLISE;

1. INTRODUÇÃO

Com crescimento da demanda energética global, aliado à intensificação das preocupações ambientais, tem impulsionado o interesse por fontes de energia sustentáveis. A substituição progressiva das fontes fósseis por alternativas renováveis é impulsionada tanto pela necessidade de mitigar os impactos ambientais adversos quanto pela urgência de garantir a segurança energética. Segundo a Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA), em 2023, as fontes renováveis representaram 43% da capacidade instalada global, evidenciando uma transformação estrutural no setor energético.

Neste contexto, torna-se essencial o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias capazes de explorar os recursos naturais de forma eficiente e resiliente. Suraji *et al.* (2023) destacam que a transição para um sistema energético de baixo carbono constitui uma resposta estratégica aos desafios interligados do desenvolvimento sustentável e das mudanças climáticas. Tal transição não apenas reduz significativamente as emissões de gases de efeito estufa, mas também estimula o avanço de inovações tecnológicas que reconfiguram a matriz energética, promovendo soluções mais sustentáveis e de longo prazo.

Dentre as tecnologias emergentes, a energia eólica offshore destaca-se como uma alternativa estratégica, sobretudo em virtude das características favoráveis dos ventos em áreas marítimas, que apresentam maior constância e intensidade quando comparados às regiões continentais. A instalação dos parques em locais afastados das zonas urbanas também contribui para a mitigação dos impactos visuais e sociais. Segundo Cao *et al.* (2023), o emprego de tecnologias avançadas — como gêmeos digitais (*Digital Twins*) e ferramentas de simulação computacional — tem se mostrado fundamental para o aprimoramento do desempenho operacional e para a ampliação da vida útil das estruturas offshore, consolidando sua importância na transição energética global.

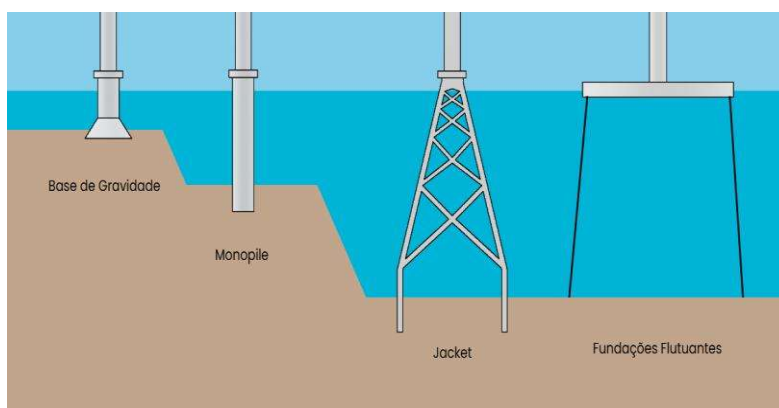
Conforme dados da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), em 2024, o Brasil apresentou crescimento expressivo na capacidade instalada de energia eólica, sendo o Nordeste uma das regiões com maior potencial de expansão. No entanto, a ausência de normativas técnicas específicas para estruturas offshore, aliada à escassez de dados oceanográficos e geotécnicos locais, impõe limitações significativas ao desenvolvimento de projetos robustos e adaptados às condições ambientais regionais.

Apesar dos avanços, ainda existem lacunas relevantes no entendimento dos esforços atuantes e do comportamento estrutural das fundações em ambientes marinhos específicos, como no litoral do estado do Rio Grande do Norte (RN). Essa carência compromete a precisão de modelos preditivos e, consequentemente, a segurança e a eficiência dos projetos.

A viabilidade técnica e econômica da expansão da energia eólica offshore depende,

portanto, de estudos aprofundados que considerem as forças ambientais predominantes e a seleção adequada dos sistemas de fundação. A análise das cargas atuantes sobre essas fundações é fundamental para garantir sua estabilidade, segurança e durabilidade diante das condições extremas do ambiente marinho. Fundações do tipo *monopile*, *jacket* e flutuantes (Figura 1) estão sujeitas a carregamentos hidrodinâmicos, cíclicos e de impacto decorrentes da ação combinada de ondas, correntes e ventos. Esses esforços podem comprometer a integridade estrutural, intensificar processos erosivos ao redor da base e acelerar a fadiga dos materiais, resultando na redução da vida útil das estruturas (Song *et al.*; Yang *et al.*, 2025).

FIGURA 1 – Principais tipos de fundações.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

No contexto da transição energética global e da crescente demanda por energia renovável, torna-se indispensável o desenvolvimento de projetos mais robustos e seguros para parques eólicos *offshore*. Uma análise sistemática das interações entre solo, água e estrutura é essencial para compreender os mecanismos envolvidos e para a formulação de estratégias de projeto e mitigação que garantam maior confiabilidade e sustentabilidade. Essa abordagem é particularmente relevante no Brasil, onde o potencial da energia eólica *offshore* está em rápida ascensão, representando uma oportunidade estratégica para diversificar e fortalecer a matriz energética nacional.

Estudos prévios têm focado em regiões de clima temperado, deixando questões relevantes, como a influência de forças combinadas de ventos, ondas e correntes, pouco exploradas para contextos tropicais.

O objetivo desta revisão é identificar e analisar as principais forças atuantes nas fundações de turbinas eólicas *offshore*, como ondas, ventos, desastres naturais e forças externas. Além disso, busca-se avaliar os impactos estruturais dessas forças, incluindo fadiga, flambagem e danos ao solo, com base em uma revisão sistemática da literatura recente. O estudo também visa contribuir para o desenvolvimento de soluções mais robustas e sustentáveis para a energia

eólica *offshore*, com foco no contexto brasileiro.

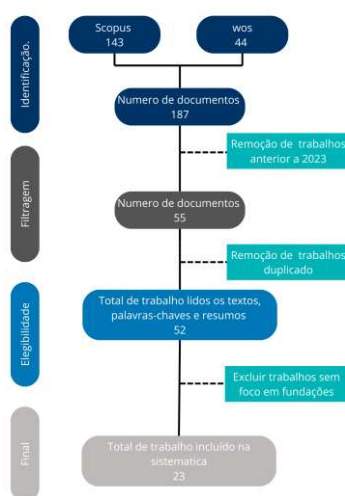
2. MÉTODO DA PESQUISA

Neste artigo foi realizada uma revisão bibliográfica sistemática (RBS) com o objetivo de identificar e analisar estudos recentes sobre os efeitos das forças atuantes em fundações de turbinas eólicas *offshore*. Essa abordagem metodológica permitiu organizar e sintetizar os resultados encontrados na literatura de forma criteriosa, assegurando a inclusão de estudos relevantes e confiáveis para a investigação. A RBS seguiu critérios claros de inclusão e exclusão, com foco em publicações entre 2023 e 2025 disponíveis nas bases de dados Scopus e *Web of science* (WoS), abordando diretamente o tema em questão.

Os critérios de inclusão para a revisão envolveram estudos publicados entre 2023 e 2025, disponíveis nas bases Scopus e WoS, em qualquer idioma, desde que abordassem diretamente o objetivo da revisão. Por outro lado, foram excluídos artigos publicados fora desse período, que não estavam nas bases mencionadas, ou escritos em idiomas inacessíveis, além de estudos que não tratavam diretamente dos temas de interesse. Os estudos foram agrupados por ano de publicação (2023, 2024, 2025) e por tema central para identificar tendências emergentes. A última consulta nas bases foi realizada em janeiro de 2025.

A estratégia de busca empregada utilizou as palavras-chave "*offshore wind*" AND "*structural analysis*" AND "*foundation*", aplicadas aos campos de título, resumo e palavras-chave, com limite de publicações entre 2023 e 2025, sem restrição quanto ao idioma ou tipo de documento. Após a aplicação dos filtros automáticos das bases de dados, foi realizada uma filtragem manual para garantir a relevância dos estudos como mostrado na Figura 2.

FIGURA 2 – Filtragem de documentos da RBS.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Na triagem manual, os resumos foram avaliados para identificar artigos que não eram pertinentes ao objetivo da revisão. Trabalhos que, apesar de conterem as palavras-chave, tratavam de assuntos periféricos ou sem relação direta com as forças atuantes em fundações de turbinas eólicas *offshore* foram excluídos. Para artigos cuja relevância não era clara nos resumos, foi necessário acessar o texto completo para confirmar sua adequação.

A coleta de dados foi realizada de forma independente, extraindo informações como título, ano de publicação, autores, metodologia, resultados e tipo de estudo. Foram coletados dados relacionados às forças atuantes nas fundações de turbinas eólicas *offshore* (como vento, ondas, correntes e forças dinâmicas), aos tipos de fundações (*monopile*, *jacket* e *gravity base*) e às simulações realizadas para avaliar seu desempenho. Estudos que apresentavam dados faltantes ou ambíguos foram excluídos.

Os estudos selecionados foram analisados qualitativamente, agrupando as forças em categorias como aquelas causadas por ondas, vento, desastres naturais (como tufões e terremotos) e impactos externos (como troncos, barcos, icebergs). A análise destacou os efeitos dessas forças na integridade estrutural das fundações, incluindo deformações, fadiga e outros danos. Para explorar possíveis causas de heterogeneidade nos resultados, foi realizada uma análise de subgrupos considerando os tipos de forças, condições ambientais e características das fundações.

Além disso, análises de sensibilidade verificaram a robustez dos resultados diante de diferentes cenários, enquanto o risco de viés devido a resultados faltantes foi avaliado considerando a possibilidade de viés de publicação. Optou-se por uma síntese narrativa em vez de meta-análise devido à diversidade metodológica dos estudos, buscando oferecer uma visão ampla e contextualizada sobre os efeitos das forças nas fundações de turbinas eólicas *offshore*.

3. RESULTADOS

A análise dos artigos incluiu a apresentação de dados relevantes, como os *Journals* apresentado na Figura 3 onde os artigos foram mais publicados, os anos de publicação, os países e regiões envolvidos, as palavras mais recorrentes, os objetivos dos estudos e as palavras-chave mais frequentes. Além disso, foi realizada uma análise das forças estudadas em cada artigo, identificando como cada estudo aborda as diferentes forças que afetam as fundações de turbinas eólicas *offshore*. Esta abordagem abrangente permitiu entender melhor os focos de pesquisa, as tendências de publicação, as áreas geográficas de maior contribuição e os temas centrais discutidos na literatura recente sobre o tema.

FIGURA 3 – Diagrama de árvore dos principais *Journals*.

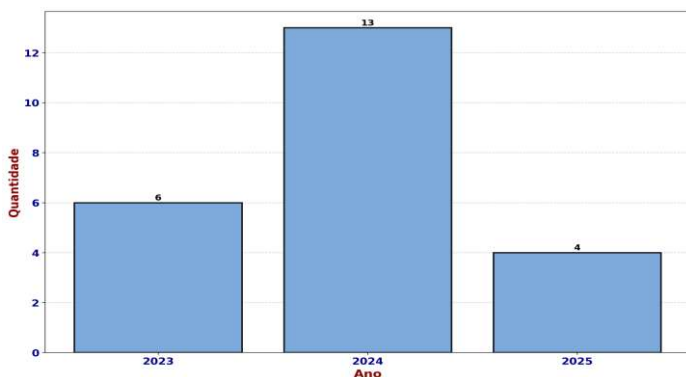


Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A Figura 3 mostra a distribuição de publicações em diferentes revistas e conferências na área de engenharia de oceanos e estruturas *offshore*. A revista *Ocean Engineering* lidera com 10 publicações, seguida por *Applied Ocean Research* com 4. Outras publicações, têm apenas 1 publicação cada. Isso indica que a pesquisa está concentrada em algumas fontes principais, enquanto outras abordam áreas mais específicas e menos exploradas. A repetição da conferência OMAE destaca sua relevância no campo da engenharia *offshore*. No geral, a Figura reflete uma concentração de estudos em engenharia de oceanos e impactos estruturais, com algumas áreas mais diversificadas e nichadas.

Além disso, o número de artigos presentes na base de dados analisada tem apresentado um crescimento ao longo dos anos, como mostrado na Figura 4, indicando um aumento no interesse e na produção científica sobre o tema.

FIGURA 4 – Gráficos de artigos científicos analisados a partir de 2023.

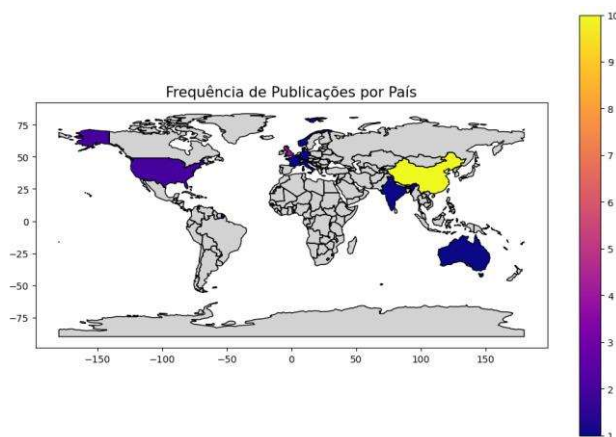


Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Ao analisar o gráfico, percebeu-se que, no ano de 2023, foram analisados 4 documentos científicos. Em 2024, o número de publicações aumentou significativamente, com 13 documentos analisados, refletindo uma maior produção ou disponibilidade de artigos nesse ano. Já em 2025, os dados mostram uma quantidade expressiva de documentos analisados, com 4 publicações, sendo que a análise foi feita na primeira quinzena de janeiro, indicando um ritmo acelerado de publicações no início do ano.

Vale destacar que a análise de países também foi realizada com o objetivo de mapear quais nações mais contribuíram para o avanço do estudo. Esse mapeamento permite identificar as regiões com maior produção científica relacionada ao tema, evidenciando padrões geográficos de pesquisa e colaboração. Como demonstrado na Figura 5, os dados revelam uma concentração significativa de publicações em determinados países, reforçando a importância de tais contribuições para o desenvolvimento do campo de estudo.

FIGURA 5 – Frequências de publicações por países.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

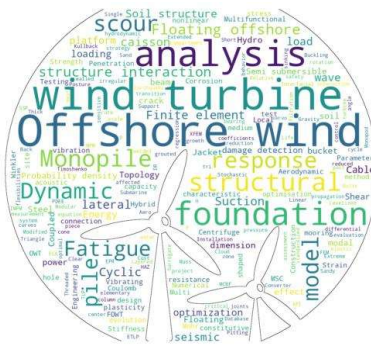
Ao apresentar o mapa, observou-se uma clara predominância da China entre os principais países responsáveis por publicações científicas. A nação vem se destacando no setor de energias, especialmente na energia eólica, devido aos seus significativos investimentos nesse campo. A China tem se tornado uma referência global em energias renováveis, impulsionando sua presença no mercado e consolidando seu papel crescente no cenário energético global.

Também foi possível notar a forte participação de vários países do Leste Europeu, que também desempenham um papel importante nas publicações científicas. Esses países têm se destacado pela produção de artigos acadêmicos, refletindo a intensificação de seus esforços em inovação e pesquisa nas últimas décadas.

O mapa mostrou como diferentes regiões do mundo têm contribuído para o avanço do conhecimento, com uma concentração de publicações no Leste Europeu e uma presença marcante da China, que continua a expandir sua influência na produção acadêmica global.

Adicionalmente, foi criada uma nuvem de palavras com o intuito de demonstrar as palavras que mais se repetiam nos documentos analisados. Essa visualização facilita a identificação dos termos mais relevantes e frequentes, oferecendo uma visão clara dos temas predominantes na base de dados. Como mostrado na Figura 6, as palavras mais recorrentes são destacadas em maior tamanho, evidenciando os conceitos centrais que emergem do conjunto de publicações estudadas.

FIGURA 6 – Nuvem de palavras.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Na nuvem de palavras, podemos observar um destaque para termos como "*offshore wind*", "*wind turbine*", "*analyse*" e "*foundations*". Esses termos estão fortemente relacionados ao setor de energia eólica, especialmente à energia eólica *offshore*, que envolve a instalação de turbinas eólicas no mar.

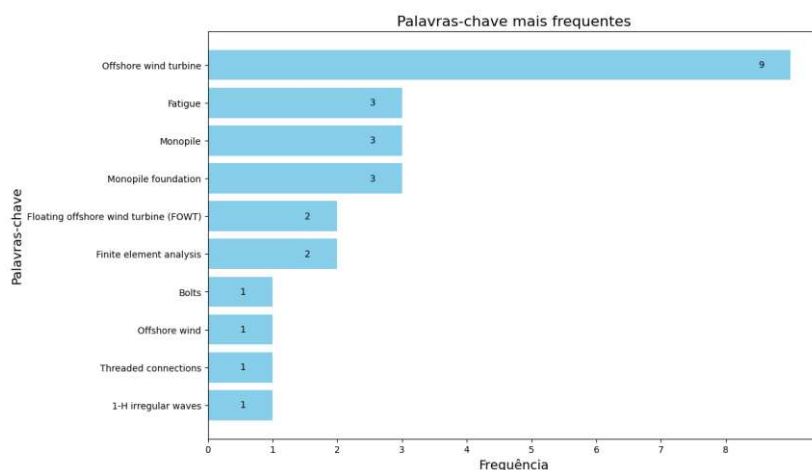
"Offshore wind" se refere à energia eólica gerada a partir de turbinas instaladas em áreas marítimas, um campo que tem ganhado destaque devido ao seu grande potencial de geração de energia renovável. "Wind turbine" está diretamente relacionado às turbinas que capturam a energia do vento, sendo um dos principais componentes desse setor.

O termo "*analyse*" sugere a importância de análises detalhadas, muitas vezes técnicas e científicas, para otimizar o desempenho e a eficiência dessas turbinas, além de estudar a viabilidade dos projetos. Já "*foundations*" se refere às fundações, essenciais para a instalação das turbinas em ambientes *offshore*, onde a resistência estrutural e a adaptação às condições do mar são cruciais.

Esses termos indicam um foco em pesquisas que buscam melhorar a tecnologia e a infraestrutura associada à energia eólica *offshore*, refletindo o avanço das publicações nesse campo.

Não menos importante, foram analisadas as palavras-chave de cada artigo e classificadas em formato de gráfico, a fim de analisar esses termos. Essa análise permite identificar as palavras-chave mais relevantes e suas frequências, proporcionando uma visão mais clara sobre os principais tópicos abordados nos artigos e sua evolução ao longo dos anos, como representado na Figura 7.

FIGURA 7 – Gráfico de frequência de palavras chaves.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Ao analisar o gráfico com as principais palavras-chave do artigo, destacam-se cinco termos predominantes: "*offshore wind turbine*", "*fatigue*", "*monopile*", "*finite element analysis*" e "*floating offshore wind turbines*". A presença de "*offshore wind turbine*" reflete o foco do estudo no desenvolvimento e otimização das turbinas eólicas instaladas no mar. Já o termo "*fatigue*" indica a preocupação com a durabilidade das turbinas e as forças de desgaste a que elas estão expostas, como demonstrado nos artigos no Quadro 1. "*Monopile*" destaca-se como uma solução estrutural comum para as fundações das turbinas, enquanto "*finite element analysis*" revela a importância das simulações computacionais para testar e garantir a resistência estrutural das turbinas em diferentes condições ambientais.

QUADRO 1 – Artigos que abordam o tema da fadiga.

Autores	Título	Objetivo do Estudo
Annoni <i>et al.</i> (2024)	Fatigue life analysis of threaded connections in <i>offshore wind</i> turbines	o artigo fala sobre análise de fadiga em para fuso de conexão entre o pilar e a peça de transição e termina com uma análise de ciclo de vida.
Zheng, Li e Xiao (2023)	Efficient optimization design method of jacket structures for <i>offshore wind</i> turbines	otimização de jacket por meio de elementos finitos e algoritmo genético e verificação de resistência à flambagem e a vida útil por fadiga também são verificados.
Marjan e Huang L.(2023)	Topology optimisation of <i>offshore wind</i> turbine jacket foundation for fatigue life and mass reduction	otimização de modelos jacket por meio de análise de topologia com melhor vida útil de fadiga e menor massa.
Saeed, Chaudhuri e De Waele (2024)	Experimental evaluation of the short and long fatigue crack growth rate of S355 structural steel <i>offshore</i> monopile weldments in air and synthetic sea water	Análise de fadiga em estruturas soldadas investigando taxas de crescimento de trincas por fadiga curtas e longas e o efeito da exposição à água do mar para a ZTA em soldagens de aço S355.
Bradshaw <i>et al.</i> (2024)	A case study of foundation damping in a piled <i>offshore wind</i> jacket structure	análise de amortecimento de fundações jackets que podem melhorar a fadiga em estruturas eólicas <i>offshore</i> .
He, Pang e Chen (2023)	Engineering critical assessment (ECA) for monopile foundation of an <i>offshore wind</i> turbine subjected to pitting	análise de corrosão pitting por meio de elementos finitos estendido.
Zhang <i>et al.</i> (2023)	Aerodynamic and structural analysis for blades of a 15 MW floating <i>offshore wind</i> turbine	interação de fluido com a estrutura de turbinas eólicas flutuante com utilização CFD-FEA para análise forças do vento.
Leng <i>et al.</i> (2024)	Structural dynamic characteristics of vertical axis <i>wind</i> and tidal current turbines	fala sobre falhas de fadiga decorrente por vibrações causadas por meio de forças do aerodinâmica e hidrodinâmica.

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Em acréscimo pode se notar que o método dos elementos finitos (FEM - Finite Element Method) é uma técnica numérica amplamente utilizada nos artigos para resolver problemas complexos, como análise estrutural, transferência de calor e dinâmica dos fluidos. Esse método divide um domínio contínuo em pequenas sub-regiões denominadas elementos finitos, conectados por nós, permitindo a resolução aproximada de equações diferenciais que regem o comportamento do sistema. Através da discretização do domínio, aplicação de funções de forma e resolução de sistemas de equações, o FEM é capaz de lidar com geometrias complexas,

materiais heterogêneos e condições de contorno complicadas, sendo amplamente citado em estudos de Lei *et al.* (2024), Sahu *et al.* (2024), Song *et al.* (2023), Zhang *et al.* (2023) e Cao *et al.* (2023).

Além disso, "floating offshore wind turbines" aparece como um dos principais termos, sugerindo que o estudo também investiga as turbinas eólicas flutuantes, uma tecnologia emergente que permite a instalação das turbinas em águas mais profundas, onde as fundações fixas não são viáveis. Esses termos-chave evidenciam a ênfase do artigo em tecnologias inovadoras no campo da energia eólica *offshore*, com um olhar atento à análise estrutural, durabilidade e novas soluções para aumentar a eficiência e a viabilidade dos projetos eólicos no mar.

Por fim foi criada uma análise que organiza de forma sistemática as principais fontes e impactos das forças que afetam as fundações de turbinas eólicas *offshore*. As forças são categorizadas em quatro tipos: ondas, ventos, desastres naturais e forças externas como mostrada no Quadro 2. Para cada tipo de força, são destacados os principais impactos estruturais, como fadiga, cisalhamento, flexão, flambagem, deslocamento e danos ao solo, além de efeitos dinâmicos causados por movimentação e vibração. Os estudos recentes (2023 a 2025) oferecem uma visão abrangente dos fenômenos que influenciam o comportamento das fundações e a necessidade de projetar soluções robustas para enfrentar esses desafios ambientais e operacionais.

QUADRO 2 – Análise de forças.

Forças	Impacto	Fontes
Hidrodinâmicas	fadiga, cisalhamento e flexão	Lei <i>et al.</i> , (2024); Yang <i>et al.</i> , (2025); Song <i>et al.</i> , (2025); Marjan e Huang, (2023); Chen <i>et al.</i> , (2024); Shakeran <i>et al.</i> , (2025); Guo <i>et al.</i> , (2024); Fairley <i>et al.</i> , (2024); Junru <i>et al.</i> , (2024); Leng <i>et al.</i> , (2024).
Ventos	fadiga, flambagem, cisalhamento e flexão	Song <i>et al.</i> , (2025); Marjan e Huang, (2023); Guo <i>et al.</i> , (2024); Fairley <i>et al.</i> , (2024); Xu <i>et al.</i> , (2024); Song <i>et al.</i> , (2023); Zhang <i>et al.</i> , (2023); Leng <i>et al.</i> , (2024).
Desastres naturais	deslocamento e danos ao solo	Song <i>et al.</i> , (2025); Shakeran <i>et al.</i> , (2025); Fairley <i>et al.</i> , (2024); Bozyigit <i>et al.</i> , (2025); Sahu <i>et al.</i> , (2024); Xu <i>et al.</i> , (2024); Shakeran <i>et al.</i> , (2024).
Externas	efeito dinâmicos (movimentação e vibração)	Song <i>et al.</i> (2023)

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

O Quadro 2 apresentou uma organização das fontes que analisam diferentes forças aplicadas nas fundações de turbinas eólicas *offshore*. As forças hidrodinâmicas, de acordo com diversos estudos (como Lei *et al.*, 2024; Yang *et al.*, 2025), geram impactos significativos como fadiga, cisalhamento e flexão nas fundações. Esses efeitos resultam do movimento repetitivo das ondas, que pode levar a deformações estruturais progressivas e falhas ao longo do tempo.

As forças hidrodinâmicas são resultantes da interação entre o movimento de fluidos, como ondas e correntes marítimas, e as estruturas submersas. Elas dependem de fatores como a densidade do fluido, a velocidade relativa do fluxo e a forma da estrutura (White. 2006). Em turbinas eólicas *offshore*, essas forças geram esforços como cisalhamento, flexão e fadiga nas fundações, podendo comprometer a estabilidade estrutural. O entendimento detalhado dessas forças é crucial para o desenvolvimento de fundações mais resistentes e duráveis, especialmente em ambientes marítimos desafiadores.

No caso das forças de vento, estudos como os de Song *et al.* (2025) e Marjan e Huang (2023) discutem os impactos de fadiga, flambagem, cisalhamento e flexão, causados pela pressão do vento nas turbinas eólicas, o que pode afetar tanto a estabilidade quanto a durabilidade das fundações.

Em relação aos desastres naturais, como tufões e terremotos, as forças envolvidas podem causar deslocamento e danos ao solo, comprometendo a estabilidade das fundações. As fontes, como Song *et al.* (2025) e Shakeran *et al.* (2025), investigam esses efeitos, destacando a importância de considerar o comportamento do solo em tais situações para garantir a integridade das fundações. Já as forças externas, que envolvem o impacto de objetos como troncos, embarcações ou icebergs, geram efeitos dinâmicos, como movimentação e vibração. Estes efeitos podem afetar a fundação de forma significativa, causando danos estruturais. O estudo de Song *et al.* (2023) foca nessa análise dos impactos dinâmicos causados por esses objetos em movimento.

Em geral, os impactos mais comuns observados nos estudos referem-se a fadiga, cisalhamento e flexão, principalmente no contexto das forças de ondas e ventos, evidenciando sua relevância no design e otimização das fundações das turbinas. As fontes selecionadas, com publicações entre 2023 e 2025, reforçam a importância dessas forças para o entendimento e a resistência das fundações em condições adversas e variáveis.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo proporcionou uma análise abrangente da pesquisa recente sobre as forças que impactam as fundações de turbinas eólicas *offshore*, abordando os principais jornais, anos

de publicação, países, métodos e áreas de aplicação. A partir da análise de 23 artigos, foi possível observar a concentração de publicações em poucos *Journals* de grande relevância, como *Ocean Engineering* e a crescente produção científica sobre o tema, refletindo o crescente interesse pela engenharia de energias renováveis, especialmente a energia eólica *offshore*.

Os estudos analisados destacaram uma ampla gama de forças que afetam as fundações, como as causadas por ondas, ventos, desastres naturais e forças externas, além de abordar os impactos estruturais, como fadiga, cisalhamento, flexão, flambagem, e danos ao solo. A utilização de métodos como o FEM e a análise estrutural são essenciais para a avaliação da resistência e durabilidade das fundações em condições adversas.

A análise geográfica revelou a forte presença de países como a China, e de regiões como o Leste Europeu, que têm se destacado como centros de produção científica, impulsionados por seus avanços na tecnologia e inovação no setor de energias renováveis.

A pesquisa evidenciou também a relevância de temas emergentes, como as tecnologias inovadoras aplicadas ao setor *offshore*. O uso de palavras-chave como "*offshore wind turbine*", "*fatigue*" e "*monopile*" reforça a importância de se estudar as soluções estruturais e a durabilidade das turbinas em ambientes desafiadores.

Em suma, a literatura recente demonstra que, apesar dos avanços significativos, ainda há desafios técnicos e operacionais a serem superados, exigindo uma abordagem contínua de pesquisa para otimizar a resistência das fundações e a viabilidade dos projetos de energia eólica *offshore*. As futuras investigações devem se concentrar no desenvolvimento de soluções robustas e eficientes, capazes de suportar as forças dinâmicas e as condições ambientais extremas encontradas no ambiente marítimo, garantindo a longevidade e a segurança das turbinas eólicas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **Boletim anual 2023**. São Paulo: ABEEólica, 2024.

CHEN, J.; FENG, X.; e LI, Y. **Analysis of higher harmonic loads on a fixed truncated vertical cylinder**. In: International Conference on *Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. American Society of Mechanical Engineers, 2024.

CHEN, J.; LU, Y.; CHEN, Z.; ZHAO, H.; LI, Y. e LI, S. **Stochastic response analysis of a spar-type FOWT subjected to extreme waves by a novel filter wave model and the DR-PDEE**. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 150, n. 4, p. 04024009, 2024.

FARGHALI, M.; SHEHATA, A.; MOURAD, M.; ELKADY, M. e KHALIL, A. **Strategies to save energy in the context of the energy crisis: a review**. *Environmental Chemistry Letters*, v. 21, n. 4, p. 2003-2039, 2023.

FAIRLEY, N.; FATAHI, B. e HOKMABADI, A. S. **Impacts of transition piece designs on the resilience of large offshore wind turbines subject to combined earthquake, wind and wave loads and soil-structure interaction**. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2024.

GASCH, R.; TWELE, J. *Wind power plants: fundamentals, design, construction and operation*. Springer Science & Business Media, 2011.

GUO, J.; LU, Y.; YUAN, Y.; LI, M. e WANG, H. **Research on the strain response of offshore wind turbine monopile foundation through integrated fluid-structure-seabed model test**. Ocean Engineering, v. 314, p. 119729, 2024.

HASSAN, Q.; KHALID, W.; MAHMOOD, M.; SAEED, S. e ALI, S. **A review of hybrid renewable energy systems: solar and wind-powered solutions: challenges, opportunities, and policy implications**. Results in Engineering, p. 101621, 2023.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **World energy transitions outlook 2024: 1.5°C pathway**. Abu Dhabi: IRENA, 2024.

LEI, Z.; WU, B. e ZHANG, J. M. **Analysis of floating platform-mooring system-pile-soil interactions under wave loadings: a case study of the triangle-shaped semi-submersible platform**. Ocean Engineering, v. 309, p. 118550, 2024.

LENG, J.; ZHANG, L. e LI, Y. **Structural dynamic characteristics of vertical axis wind and tidal current turbines**. Proceedings A. The Royal Society, 2024. p. 20240234.

MARJAN, A. e HUANG, L. **Topology optimisation of offshore wind turbine jacket foundation for fatigue life and mass reduction**. Ocean Engineering, v. 289, p. 116228, 2023.

PANWAR, N. L.; KAUSHIK, S. C. e KOTHARI, S. **Role of renewable energy sources in environmental protection: a review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, n. 3, p. 1513-1524, 2011.

SARAJI, M. K. e STREIMIKIENE, D. **Challenges to the low carbon energy transition: a systematic literature review and research agenda**. Energy Strategy Reviews, v. 49, p. 101163, 2023.

SHAKERAN, M. e SOROUSH, A. **Behavior of ordinary and hybrid caissons under lateral monotonic, cyclic and post-cyclic loading: a centrifuge study**. Ocean Engineering, v. 318, p. 120217, 2025.

SONG, Y.; HUANG, M.; YAN, Z.; WANG, X. e ZHANG, L. **Dynamic characteristics of monopile offshore wind turbine with different equivalent pile foundation boundaries under winds, waves and earthquakes**. Applied Ocean Research, v. 154, p. 104391, 2025.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME COPENHAGEN CLIMATE CENTRE (UNEP-CCC); CLIMATE TECHNOLOGY CENTRE AND NETWORK (CTCN). **Climate technology progress report 2024: unleashing renewable energy for ambitious NDCs**. Copenhagen: UNEP-CCC/CTCN, 2024.

WHITE, F. M. **Fluid mechanics**. 6. ed. 2006.

XIE, Y.; DENG, Y.; MA, L.; CHEN, Z. e LI, X. **Gleaning insights from German energy transition and large-scale underground energy storage for China's carbon neutrality**. International Journal of Mining Science and Technology, v. 33, n. 5, p. 529-553, 2023.

XU, Y.; YANG, Y.; ZHANG, L.; JIA, Y. e LI, Y. **Multi-hazard stochastic response analysis and reliability evaluation of a 5 MW monopile *offshore wind* turbine based on extended platform FAST-S**. Engineering Structures, v. 305, p. 117674, 2024.

YANG, L.; ZHANG, S.; LI, M.; CHEN, Y. e WANG, P. **Investigation of global and local structural response of semi-submersible FOWT using hydro-structure interaction in the frequency domain**. Applied Ocean Research, v. 154, p. 104318, 2025.