



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JOÃO PAULO DE QUEIROZ DIAS

**CARACTERIZAÇÃO DA ENERGIA EÓLICA OFFSHORE
E ANÁLISE DE CARGAS AMBIENTAIS**

JOÃO PAULO DE QUEIROZ DIAS

**CARACTERIZAÇÃO DA ENERGIA EÓLICA OFFSHORE
E ANÁLISE DE CARGAS AMBIENTAIS**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Araújo Bezerra

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

D541c Dias, João Paulo.
CARACTERIZAÇÃO DA ENERGIA EÓLICA OFFSHORE E
ANÁLISE DE CARGAS AMBIENTAIS / João Paulo Dias. -
2023.
56 f. : il.

Orientador: Paulo Henrique Bezerra.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2023.

1. Energia eólica offshore. 2. Análise
estrutura. 3. Cargas de vento. 4. Cargas de ondas
marítimas. 5. Sustentabilidade. I. Bezerra, Paulo
Henrique, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

JOÃO PAULO DE QUEIROZ DIAS

**CARACTERIZAÇÃO DA ENERGIA EÓLICA OFFSHORE
E ANÁLISE DE CARGAS AMBIENTAIS**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 13/10/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Henrique Araújo Bezerra (UFERSA)
Presidente

Prof. Me. José Henrique Maciel de Queiroz (IFPB)
Membro Examinador

Prof. Dr. Rafael Luz Espindola (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço de coração a todas as pessoas que tornaram possível a realização deste trabalho. Primeiramente, gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha mãe, Zilneide, e ao meu pai, Espedito, por seu amor incondicional, apoio emocional e incentivo incessante ao longo dessa jornada acadêmica. Sem o apoio de vocês, este trabalho não teria sido possível. Quero também agradecer ao meu irmão, Jorge, por sua compreensão e paciência durante os momentos em que precisei me dedicar intensamente aos estudos. Sua presença e apoio foram fundamentais. Agradeço a todos os meus familiares, que sempre estiveram ao meu lado, torcendo pelo meu sucesso e me motivando a alcançar meus objetivos.

Aos meus colegas de classe, que compartilharam comigo as alegrias e desafios desta jornada acadêmica, agradeço pela amizade, apoio mútuo e pela troca de conhecimento que enriqueceu nossa formação.

Por fim, quero expressar minha gratidão aos meus professores, cuja dedicação ao ensino e orientação foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Suas contribuições e feedbacks foram inestimáveis. A todos vocês, meu muito obrigado por fazerem parte deste capítulo importante da minha vida.

RESUMO

A energia eólica offshore emerge como uma peça fundamental na transição global para fontes de energia mais limpas e sustentáveis. Ela oferece inúmeras vantagens em relação à energia eólica onshore, como ventos mais consistentes e velocidades mais elevadas, resultando em uma produção de energia mais estável e eficiente. Além disso, contribui de forma significativa para a redução das emissões de carbono, melhorando a qualidade do ar e promovendo a criação de empregos na indústria de energia renovável. No contexto brasileiro, a energia eólica offshore se revela como uma opção viável e promissora, dadas as extensas áreas costeiras e ventos favoráveis disponíveis ao longo da costa atlântica do país. Este estudo apresenta uma análise estrutural das torres eólicas offshore, com um foco particular nos esforços induzidos pelo vento e pelas ondas. Após a pesquisa onde foram caracterizadas as cargas ambientais, foram feitas análises estruturais e comparações dos resultados dos esforços obtidos com o *software Ftool*. Os resultados da análise destacam que os esforços nas torres são significativamente influenciados pelo vento, aumentando substancialmente com o incremento da altura das torres. No entanto, as cargas de ondas também desempenham um papel relevante, ainda que secundário. Esses achados enfatizam a importância crítica de levar em consideração essas cargas ambientais no projeto das torres eólicas offshore, garantindo sua integridade estrutural e segurança operacional. O investimento na expansão desse setor pode efetivamente diversificar a matriz energética brasileira, reduzir a dependência de fontes de energia não renovável e estimular o desenvolvimento econômico por meio da geração de empregos e investimentos em tecnologias limpas.

Palavras-chave: Energia eólica offshore, análise estrutural, cargas de vento, cargas de ondas marítimas, sustentabilidade.

ABSTRACT

Offshore wind energy emerges as a key element in the global transition to cleaner and more sustainable energy sources. It offers numerous advantages over onshore wind energy, such as more consistent and higher wind speeds, resulting in more stable and efficient energy production. Additionally, it significantly contributes to the reduction of carbon emissions, improving air quality and promoting job creation in the renewable energy industry. In the Brazilian context, offshore wind energy proves to be a viable and promising option, given the extensive coastal areas and favorable winds available along the country's Atlantic coast. This study presents a structural analysis of offshore wind turbines, with a particular focus on wind and wave-induced forces. After characterizing environmental loads through research, structural analyses were conducted, and the results of the forces obtained were compared using the Ftool software. The analysis results highlight that the forces on the turbines are significantly influenced by the wind, increasing substantially with the height of the towers. However, wave loads also play a relevant, albeit secondary, role. These findings underscore the critical importance of considering these environmental loads in the design of offshore wind turbines, ensuring their structural integrity and operational safety. Investing in the expansion of this sector can effectively diversify the Brazilian energy matrix, reduce dependence on non-renewable energy sources, and stimulate economic development through job creation and investments in clean technologies.

Keywords: Offshore wind energy, structural analysis, wind loads, ocean wave loads, sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Parque Eólico Offshore	18
Figura 02: Total de Instalações Offshore	19
Figura 03: Perspectiva de Instalações Futuras.....	22
Figura 04: Componentes do Turbina.....	23
Figura 05: Fundações Fixas.....	30
Figura 06: Fundações Flutuantes	32
Figura 07: Carregamento de Vento nas Torres. a) 75m b) 100m c) 125m	37
Figura 08: Carregamento de Vento e Ondas nas Torres. a) 75m b) 100m c) 125m.....	39

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Força exercida pelo vento	26
Equação 2: Equação Morison.....	27

TABELAS

Tabela 01: Dimensões das torres tubulares em aço offshore	35
Tabela 02: Forças do Vento nas Torres	37
Tabela 03: Cargas das ondas nas torres	38
Tabela 04: Deslocamentos horizontais no topo das torres	46

GRÁFICOS

Gráfico 01: Comparação Força Cortante – Torre 75 m	41
Gráfico 02: Comparação Força Cortante – Torre 100 m	42
Gráfico 03: Comparação Força Cortante – Torre 125 m	42
Gráfico 04: Comparação Momento Fletor – Torre 75 m	44
Gráfico 05: Comparação Momento Fletor – Torre 100 m	44
Gráfico 06: Comparação Momento Fletor – Torre 125 m	45

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVOS	17
2.1. GERAL.....	17
2.2. ESPECÍFICOS	17
3. REVISÃO TEÓRICA.....	18
3.1. ENERGIA EÓLICA OFFSHORE	18
3.1.1. Desafios da energia eólica Offshore	20
3.1.2. Avansos tecnológicos e perspectivas futuras	21
3.1.3. Componentes da torre e turbina.....	22
3.2. ESTRUTURAS DE TORRES EÓLICAS OFFSHORE	23
3.2.1. Ações.....	25
3.2.1.1. Peso próprio.....	25
3.2.1.2. Vento.....	26
3.2.1.3. Ondas	27
3.2.2. Fundações de torres eólicas offshore	29
3.2.2.1. Fundações Fixas	29
3.2.2.1.1. Realção solo-Fundação	31
3.2.2.2. Fundações flutuantes.....	31
4. METODOLOGIA.....	34
4.1. ANÁLISE ESTRUTURAL	34
4.1.1. Caracterização da Torres.....	34
4.1.2. Solicitações.....	36
4.1.2.1. Vento.....	36
4.1.2.2. Ondas	38
5. RESULTADOS	40
5.1. ANÁLISE ESTRUTURAL DE TORRES EÓLICAS OFFSHORE	40
5.1.2. Torres submetidas a cargas de ventos e ondas.....	40
5.1.2.1.Força Cortante.....	40
5.1.2.2.Momento Fletor.....	43
5.1.2.3.Deslocamentos Horizontais	46
6. CONCLUSÃO	47
6.1. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49
APÊNDICE A	55
APÊNDICE B.....	57

1. INTRODUÇÃO

A energia eólica offshore refere-se à geração de eletricidade a partir de turbinas em corpos d'água, normalmente no oceano. É um setor de fontes de energia renováveis em rápido crescimento, com demanda crescente em todo o mundo (Fernandes, 2023). Segundo Syed e Li (2021), a energia eólica offshore tem várias vantagens em relação à onshore, incluindo condições de vento favoráveis e a capacidade de operar em águas oceânicas profundas. É considerada uma tecnologia de geração de eletricidade socialmente aceitável em diversos países (Siyoun, 2023). O parque eólico (ou central eólica) é o local, em terra firme ou em mar, no qual as turbinas eólicas estão dispostas, atuando para a produção de energia com base no aproveitamento das rajadas de vento (Oliveira, 2014).

A energia eólica offshore, em particular, tem ganhado destaque como uma alternativa promissora para a geração de eletricidade a partir de fontes renováveis. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato da energia eólica ser considerada a fonte de energia mais econômica entre todas as fontes de energia renovável atualmente exploradas (Shi *et al.*, 2014). Além disso, a energia eólica offshore conta com um amplo potencial para fornecer energia limpa e abundante em escala global (Mostafaeipour, 2010).

Essa tecnologia pioneira tem sido adotada por diversos países líderes nesse setor, que enfrentaram desafios significativos para superar as dificuldades técnicas, ambientais e econômicas associadas à implantação de parques eólicos offshore. Nota-se que os países tem se empenhado em explorar o recurso eólico offshore por este fornecer uma maior densidade de energia, menores limitações espaciais e menor probabilidade de gerar queixas civis, quando comparado à energia eólica onshore (Oh *et al.*, 2012).

O Reino Unido é considerado um dos pioneiros e líderes mundiais na indústria de energia eólica offshore. O país possui uma vasta experiência na implantação e operação de parques eólicos offshore, e tem desempenhado um papel fundamental no desenvolvimento de tecnologias avançadas, como turbinas de maior potência, sistemas de fundação inovadores e soluções de transporte e instalação. Atualmente, o Reino Unido possui uma capacidade instalada de mais de 10 GW em parques eólicos offshore (WindEurope, 2023).

A energia eólica offshore tem sido estudada extensivamente no Brasil. O país tem uma alta complementaridade entre recursos eólicos e hidrelétricos e offshore, particularmente na região Nordeste (Borba *et al.*, 2023). O potencial eólico offshore no Brasil foi avaliado usando dados de reanálise e descobriu-se que há um potencial técnico significativo para a energia eólica offshore ao longo da costa brasileira, especialmente em profundidades de água de até 50 metros (Nascimento *et al.*, 2022). A variação temporal do potencial eólico offshore no sudeste do Brasil também foi avaliada, mostrando um aumento na densidade de energia eólica nos últimos 40 anos (Coriolano *et al.*, 2022).

As principais diferenças entre turbinas eólicas instaladas no continente e as turbinas eólicas offshore é relativo à subestrutura e à condição ambiental offshore mais complexa, podendo trazer requisitos mais complexos para o projeto de fundação (Wang *et al.*, 2018). As torres offshore estão sujeitas a cargas marítimas, além das forças do vento (Feyzollahzafeh *et al.*, 2016). As cargas marítimas incluem a excitação das ondas e a agressividade da atmosfera salina (Wormann e Harte, 2002). A combinação das condições do vento e das ondas, bem como o desalinhamento entre o vento e as ondas, podem afetar significativamente as cargas estruturais e a estabilidade do sistema (Christiansen e Knudsen, 2013). Portanto, é importante considerar essas cargas marítimas ao projetar torres e estruturas de suporte de turbinas eólicas (Damiani, 2015).

Desta forma, o estudo da influência destas cargas à estrutura das torres é cada vez mais requerida, uma vez que a segurança e o desempenho a longo prazo dos parques eólicos offshore dependem da robustez das estruturas de suporte. Além disso, a consideração cuidadosa das condições ambientais específicas do local é essencial para otimizar a eficiência da geração de energia eólica offshore. Com o contínuo crescimento desse setor para novas regiões ao redor do mundo, a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias que melhorem a resiliência e a eficácia das torres offshore são de extrema importância.

Um elemento crucial para o desenvolvimento e aperfeiçoamento dessas estruturas é a utilização de simulações por meio de softwares estruturais avançados. Essas simulações desempenham um papel fundamental na análise, no projeto e na validação das torres e das subestruturas das turbinas eólicas offshore. Elas permitem a mensuração precisa dos esforços a partir das cargas ambientais que atuam sobre as estruturas, proporcionando informações valiosas para o aprimoramento do dimensionamento e garantindo a segurança e o desempenho confiável das torres eólicas em ambientes marítimos desafiadores.

2. OBJETIVOS

2.1. GERAL

O objetivo geral deste estudo é analisar estruturalmente torres eólicas offshore considerando cargas ambientais, quantificando valores de força cortante e momento fletor, visando identificar seus efeitos na estrutura.

2.2. ESPECÍFICOS

- Descrever aspectos fundamentais sobre a energia eólica offshore, como: cenário mundial atual; avanços tecnológicos; componentes e elementos estruturais das torres e turbinas.
- Mensurar a real influência de ondas e correntes marítimas que atingem torres eólicas offshore, em relação as cargas exercidas pelo vento.

3. REVISÃO TEÓRICA

3.1. ENERGIA EÓLICA OFFSHORE

A energia eólica offshore é uma tecnologia de energia escalável e comercialmente disponível que tem o potencial de produzir quantidades significativas de energia, ajudando a substituir os combustíveis fósseis e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Os parques eólicos offshore podem estar localizados perto de áreas costeiras densamente povoadas, reduzindo as perdas de transmissão e minimizando a necessidade de transmissão de energia de longa distância. Os recursos eólicos offshore são normalmente mais fortes e consistentes do que os eólicos terrestres, levando a maiores fatores de capacidade e geração de eletricidade mais confiável (GWEC, 2023). A energia eólica offshore é obtida a partir do vento que sopra em corpos d'água, como águas interiores, mar territorial, zona econômica exclusiva e plataforma continental (MegaWhat, 2023), a figura 01 mostra como são dispostas as turbinas em um parque eólico offshore.

Figura 01: Parque Eólico Offshore

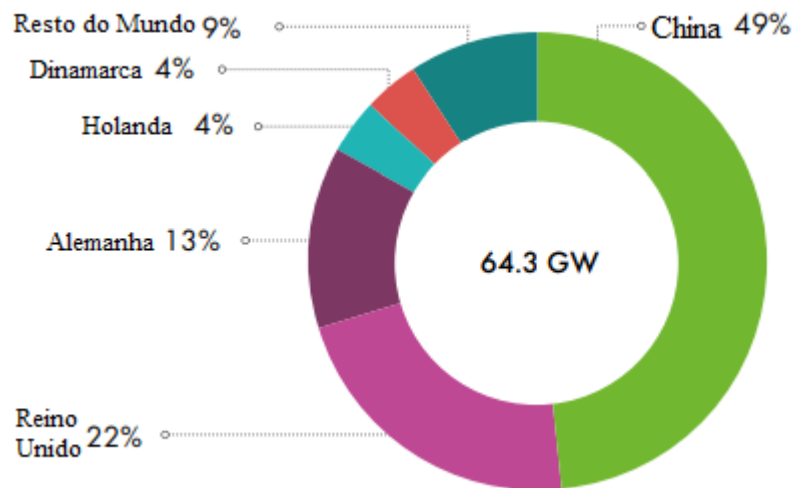


Fonte: BNamericas (2022)

Nos últimos anos, tem havido um avanço significativo no uso da energia eólica como fonte de geração de eletricidade em todo o mundo. Embora a maioria das usinas eólicas estejam localizadas em terra (on-shore), tem ocorrido um aumento no número de usinas instaladas no oceano (off-shore). Isso se deve à escassez de áreas terrestres adequadas para novas infraestruturas, especialmente no continente europeu, e ao bom potencial oferecido pelas áreas marítimas, mesmo que isso resulte em custos mais elevados (Tolmasquim *et al.*, 2016).

Segundo dados do GWEC (2023), a China é o país líder em geração de energia eólica offshore, com metas ambiciosas de 100 GW até 2025, 200 GW até 2030 e 1.000 GW até 2050. O Reino Unido é outro importante player em energia eólica offshore, com uma capacidade instalada cumulativa de mais de 10 GW em 2022. A Alemanha foi pioneira no desenvolvimento eólico offshore e tem uma capacidade instalada cumulativa de mais de 8 GW. Os Estados Unidos estão expandindo rapidamente sua indústria eólica offshore, com vários projetos em andamento e uma meta de 30 GW até 2030. A Dinamarca, líder de longa data em energia eólica, tem uma forte presença em energia eólica offshore e abriga grandes parques eólicos offshore, como vemos na figura 02.

Figura 02: Total de Instalações Offshore



Fonte: Adaptado de GWEC (2023)

O potencial eólico offshore no Brasil foi avaliado por meio de várias abordagens, incluindo a avaliação do potencial bruto, técnico e ambiental e social. Os resultados mostram que o Brasil tem um potencial bruto de 1688 GW, um potencial técnico de 1064 GW e um potencial ambiental e social de 330 GW (Vinhoza *et al.*, 2021). No entanto, a atratividade econômica de diferentes áreas para a implantação de energia eólica offshore varia, com as áreas economicamente mais atraentes concentradas na região Nordeste (Benedet *et al.*, 2021). No geral, o potencial eólico offshore do Brasil é significativo e pode ser desenvolvido de forma sustentável com critérios de localização adequados (do Carmo *et al.*, 2021).

Segundo dados da EPBR (2023), atualmente, há 78 projetos de eólica offshore em desenvolvimento em oito estados brasileiros, nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste. O Rio Grande do Sul lidera o ranking dos estados com mais projetos de eólica offshore. São 24 empreendimentos registrados no Ibama, com capacidade total de 61.719 MW, o equivalente a 33% do total. O Ceará vem logo em seguida, também com 23 parques, totalizando 58.105 MW de potência.

A falta de regulamentação é considerada o principal entrave para o desenvolvimento desse mercado. Para que um leilão aconteça, por exemplo, é necessário aprovar o marco legal das eólicas offshore na Câmara dos Deputados e as regras pela agência reguladora. As áreas com potencial de geração offshore são exploradas a partir de cessão de uso, de acordo com o Decreto Federal nº 10.946/2022. Caso aprovado, no entanto, o Projeto de Lei nº 576/2021, conforme informações da EPBR (2023), vai permitir o desenvolvimento de geração offshore por meio também de outorga, possibilitando a realização de leilões de blocos.

3.1.1. DESAFIOS DA ENERGIA EÓLICA OFFSHORE

Algumas das principais barreiras para o desenvolvimento de parques eólicos offshore incluem a necessidade de maior eficiência na logística offshore (Chartron e Haasis, 2018). Conforme destacado pela DNV GL (2023), projetos de energia eólica offshore enfrentam desafios técnicos, ambientais e econômicos únicos que requerem conhecimentos avançados de engenharia e investimentos significativos. A logística complexa envolvida na instalação e manutenção de parques eólicos offshore, bem como a competição com outras fontes de energia, são alguns dos desafios enfrentados pela indústria.

A energia eólica offshore apresenta desafios significativos de engenharia devido às características do ambiente marinho. Condições ambientais adversas, como ventos fortes, ondas, corrosão e instabilidade do solo, representam desafios para o projeto de fundações dos aerogeradores. Além disso, a localização remota e as condições operacionais complexas exigem soluções robustas e confiáveis. Estudos, como o realizado por Byrne e Houlsby (2003) sobre fundações para aerogeradores offshore, têm sido fundamentais para compreender e superar esses desafios, fornecendo abordagens e metodologias para o projeto e a instalação eficientes e seguras das fundações em ambientes marinhos.

Existem também desafios específicos associados à construção e operação de parques eólicos offshore, incluindo erosão, raios, e seu impacto em animais marinhos (Haritha *et al.*, 2021), os potenciais conflitos com áreas protegidas e portos, bem como a necessidade de área de superfície adequada, são considerações importantes para o desenvolvimento da energia eólica offshore (Hannah, 2013).

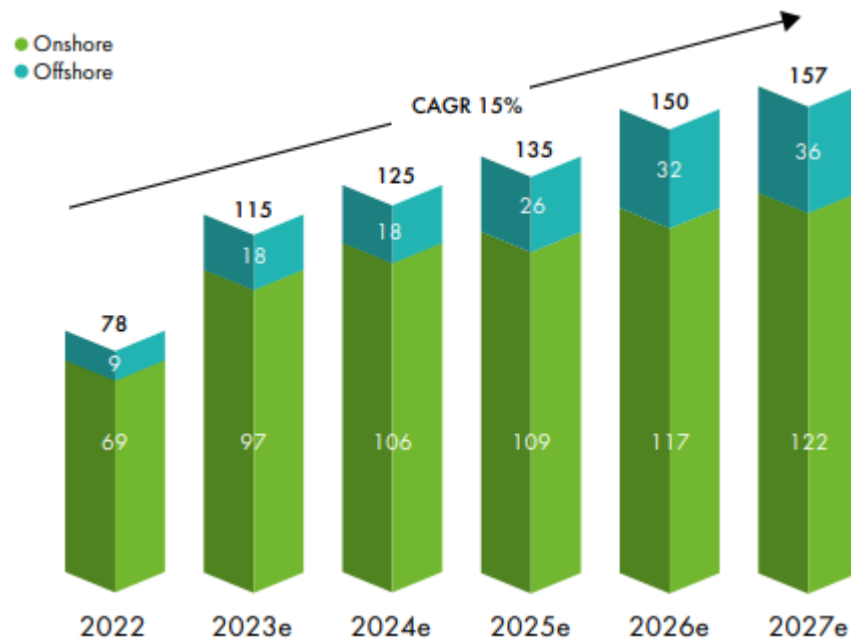
Os desafios relacionados à estrutura da turbina e às conexões da rede representam obstáculos significativos (Petersen *et al.*, 2015). A localização de turbinas próximas umas das outras em um parque eólico e a colocação de vários parques eólicos em uma área confinada também são problemáticas (Spiropulou *et al.*, 2015). Enfrentar esses desafios é crucial para a transição bem-sucedida para um sistema de energia baseado em energia renovável dependente da energia eólica offshore (Veers *et al.*, 2022).

3.1.2. AVANÇOS TECNOLÓGICOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

A indústria de energia eólica offshore está em constante evolução, impulsionada por avanços tecnológicos e inovações. A DNV GL (2023) destaca que o futuro da energia eólica offshore é promissor, com o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e o aumento da capacidade instalada em todo o mundo. Perspectivas futuras incluem a expansão contínua da indústria eólica offshore e a diversificação da matriz energética em direção a uma maior participação de fontes renováveis.

O desenvolvimento eólico offshore também pode levar a avanços nas estruturas de governança marinha, no design do mercado de eletricidade, na cadeia de suprimentos e na política industrial, promovendo a inovação e o compartilhamento de conhecimento (GWEC, 2023). A figura 03 mostra a perspectiva de crescimento da energia eólica (GW) em todo o mundo.

Figura 03: Perspectiva de Instalações Futuras.

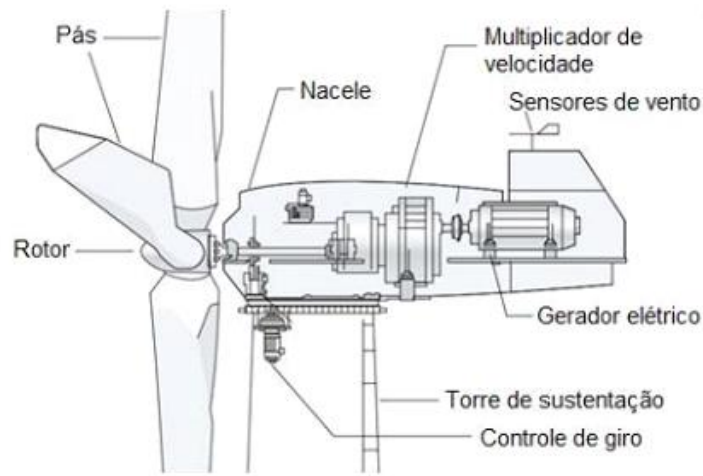


Fonte: GWEC (2023)

Além disso, as inovações tecnológicas deixam as energias renováveis cada vez mais competitivas. Quando olhamos o futuro não resta dúvidas de que ele será feito de fontes de energia de baixo impacto ambiental, mas a preocupação é que a velocidade dessa transformação precisa ser maior. Por isso, é preciso pensar em políticas estruturadas de energias renováveis e criar ambiente adequado para investimentos no setor (ABEEólica, 2022).

3.1.3. COMPENENTES DA TORRE E TURBINA

Uma turbina eólica offshore normalmente consiste em vários componentes. Isso inclui o cubo, a nacele, o rotor, a torre, a peça de transição e a base. O cubo é a parte central da turbina eólica onde o rotor e a nacela estão conectados (Saba Rahman *et al.*, 2021). A nacele abriga o gerador, a caixa de engrenagens e outros componentes necessários para a geração de energia (Ren *et al.*, 2020), como mostrado na figura 04.

Figura 04: Componentes da Turbina**Fonte: Telub (2015)**

O rotor consiste nas pás que capturam o vento e o convertem em energia rotacional (Cui *et al*, 2020). A torre fornece suporte para toda a estrutura e é responsável por suportar as forças exercidas pelo vento (Min, 2020). A peça de transição conecta a torre à fundação e ajuda na transferência das cargas da torre para a base (Liu *et al.*, 2020). A base, também conhecida como fundação, fornece estabilidade e ancora a torre no fundo do mar .

3.1. ESTRUTURAS DE TORRES EÓLICAS OFFSHORE

As estruturas de torres eólicas offshore normalmente consistem em vários componentes que trabalham juntos para suportar a turbina eólica. A torre, que se estende de cima do nível da água até logo abaixo da nacela que abriga o gerador da turbina e outros equipamentos, é uma parte crucial da estrutura de suporte. É fundamental considerar a rigidez e a distribuição de peso da torre a fim de manter a mesma integridade estrutural e características de projeto conforme especificado durante o processo de aprovação, conforme descrito nas diretrizes da DNV-OS-J101.

O elemento mais crucial no avanço e na expansão da energia eólica offshore reside na praticabilidade da subestrutura, que é a porção de suporte da estrutura. A capacidade de ajuste das subestruturas para turbinas eólicas offshore é essencialmente restrita pela profundidade da água, características geotécnicas e dimensões da turbina eólica (Wang *et al.*, 2018).

Com o crescimento da indústria, torres mais altas são requeridas para maior geração de energia. Nesse sentido, o dimensionamento e análise estrutural adequados são fundamentais para garantir a segurança e a estabilidade necessárias. A análise estrutural dinâmica e a interação solo-estrutura são elementos-chave na avaliação da resposta estrutural e na garantia da integridade das turbinas eólicas offshore. O uso de técnicas avançadas de modelagem e simulação permite prever o desempenho estrutural e otimizar o projeto das turbinas. O tamanho crescente dos geradores eólicos exige que eles suportem várias cargas dinâmicas, levando a maiores tensões, fadiga e vibrações, que são considerações importantes no projeto e análise de torres de turbinas eólicas (Hernandez-Estrada *et al.*, 2021).

A estrutura torre-fundação de uma turbina eólica offshore pode ser melhorada para garantir a durabilidade da base subaquática e controlar a frequência de manutenção (Li Bai, 2017). A influência de falhas ou raios em torres eólicas offshore por meio do sistema de aterramento e correntes de fuga também é investigada, considerando a mídia não uniforme ao redor das torres (Stracqualursi *et al.*, 2017).

O dimensionamento e análise estrutural de fundações de torres eólicas offshore devem seguir parâmetros normativos para que sejam confiáveis e suportem todas as solicitações adversas do ambientais que atuam no corpo da estrutura, como a força dos ventos, ação corrosiva da água salgada, ondas, as correntes marítimas e até possíveis colisões de embarcações.

Existem três normas promordiais para o dimensionamento estrutural de fundações eólicas offshore. A IEC 61400-3 é uma norma internacional que estabelece requisitos de projeto abrangentes, considerando aspectos geotécnicos, ambientais e de carga. A DNV-OS-J101 é uma norma desenvolvida pela Det Norske Veritas (DNV) que fornece orientações detalhadas para o projeto de fundações offshore, incluindo métodos de análise estrutural e requisitos de segurança. A API RP 2A-WSD é uma norma americana publicada pelo American Petroleum Institute (API) que aborda o projeto de estruturas offshore, incluindo fundações, considerando condições ambientais e critérios de desempenho. Essas normas são amplamente utilizadas na indústria eólica offshore para garantir a segurança e a eficiência das fundações das turbinas.

3.2.1. AÇÕES

As torres eólicas offshore são projetadas para suportar várias ações e cargas, incluindo peso próprio, cargas de vento, cargas de ondas e cargas dinâmicas causadas pelo movimento das pás da turbina e pela rotação da nacelle. A resposta dinâmica da estrutura pode ser influenciada por fatores como a interação entre vento e ondas, a rigidez da fundação e o material do corpo da torre. Os deslocamentos e acelerações de um cubo em turbinas eólicas offshore flutuantes (FOWT) podem ser notáveis devido à interação entre ondas e vento, o que requer uma abordagem cuidadosa em termos de segurança de projeto (Saba Rahman et al., 2021).

3.2.1.1. PESO PRÓPRIO

O próprio peso das torres eólicas offshore é um fator importante em seu projeto e construção. O peso das torres está aumentando continuamente devido à tendência de construir turbinas cada vez maiores. Diferentes materiais e designs estão sendo otimizados para garantir a integridade estrutural das torres. Torres de aço, concreto armado e híbridas (concreto armado e aço) estão sendo usadas em aplicações offshore. O peso das torres afeta seu deslocamento e comportamento sob diferentes cargas, como cargas ondulatórias e hidrostáticas. O deslocamento dos projetos de torres de aço é menor em comparação com projetos de concreto armado (Kurian e Narayanan, 2010).

Os algoritmos de peso dos componentes do parque eólico offshore são usados para estimar os requisitos de elevação no descomissionamento e o valor de sucata dos materiais (Kaiser e Snyder., 2014). O projeto confiável de estruturas e torres de suporte de turbinas eólicas offshore envolve vários aspectos, incluindo seleção de topologia, identificação de cenários de carregamento, engenharia auxiliada por computador e dinâmica estrutural (Yigit *et al.*, 2018).

3.2.1.2. VENTO

O vento é o resultado do deslocamento de uma massa de ar devido às variações de temperatura e pressão. Essa massa de ar carrega consigo energia cinética e, devido a essa propriedade, apresenta resistência à mudança de direção. Quando uma estrutura é posicionada na trajetória do vento, ocorre uma modificação na direção do fluxo do ar. Isso se deve à interação de forças entre o fluxo de ar e a superfície do corpo do elemento, como explicado por Leão e Aragão (2013).

Segundo Mannini *et al* (2023), as cargas provenientes do vento em torres eólicas offshore têm efeitos significativos em seu design e desempenho. A estimativa precisa dessas cargas é crucial para o projeto seguro e econômico de estruturas de suporte e fundações. Testes em túnel de vento são comumente usados para resolver esse problema, mas pode haver incompatibilidades no número de Reynolds, levando a projetos superconservadores. As características das cargas provenientes do vento em torres de turbinas eólicas offshore podem variar dependendo de fatores como direção e localização do vento (Kazumasa *et al.*, 2017).

O ambiente marítimo possibilita que não haja obstrução das rajadas por meio formações geológicas, edificações. Essas cargas podem influenciar as ondas e a corrente, e seus efeitos nas torres precisam ser determinados adequadamente (Islam *et al.*, 2020). No geral, compreender e estimar com precisão as cargas eólicas em torres eólicas offshore é essencial para sua operação segura e eficiente. A quantificação da força exercida pelo vento pode ser obtida por meio da seguinte equação, conforme especificado no Eurocódigo 1 (EN 1991-1-4):

$$F_w = c_{scd} \cdot \sum c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (1)$$

Onde:

c_{scd} coeficiente estrutural;

c_f coeficiente de força relativo à construção ou ao elemento de construção;

$q_p(z_e)$ pressão dinâmica de pico à altura de referencia z_e ;

A_{ref} área de referencia da construção ou do elemento de construção, sendo em cilindros com uma altura l e diâmetro b , temos $A_{ref} = l \times b$;

Essa equação permite calcular as forças exercidas pelo vento em uma torre eólica offshore. Ela leva em consideração o coeficiente estrutural, os coeficientes de força relativos à construção, a pressão dinâmica de pico na altura e área de referência da construção ou do elemento de construção. Com base nesses parâmetros, é possível determinar as forças de vento que atuam sobre a estrutura, garantindo que a torre seja projetada e construída de forma segura e eficiente para a geração de energia a partir da força do vento no mar. A variação do vento em altura é dependente de alguns fatores como a rugosidade do terreno, da orografia e do valor de referência da velocidade do vento (Pestana (2016)).

3.2.1.3. ONDAS

As cargas de ondas em uma plataforma são de natureza dinâmica. Para a maioria das profundidades de água de projeto atualmente encontradas, essas cargas podem ser adequadamente representadas por seus equivalentes estáticos. Em águas mais profundas ou onde as plataformas tendem a ser mais flexíveis, a análise estática pode não descrever adequadamente as verdadeiras cargas dinâmicas induzidas na plataforma. A análise correta de tais plataformas requer uma análise de carga que envolva a ação dinâmica da estrutura (API RP 2A-WSD 2002).

A Equação de Morison é usada para calcular cargas de ondas e forças marítimas em torres eólicas offshore. O cálculo da força exercida pelas ondas em um objeto cilíndrico depende da relação entre o comprimento de onda e o diâmetro do elemento. Quando essa relação é significativamente grande, o elemento em questão não altera de forma substancial a onda incidente. Nesse contexto, a API RP 2A-WSD (2002) define que a força da onda pode ser calculada como a soma de uma força de arrasto e uma força de inércia, como mostrado na equação 2.

$$F = C_M \frac{\rho \pi D^2}{4} \dot{v} + C_D \frac{\rho D}{4} v|v| \quad (2)$$

Onde:

F	força da onda por metro;
CM	coeficientes de massa;
CD	coeficiente de arrasto igual;
ρ	densidade da água ;
D	diâmetro do elemento;
v	velocidade das partículas da água;
$\dot{v}$	aceleração das partículas da água.

As cargas de ondas têm um impacto significativo no projeto de turbinas eólicas offshore. A resposta dinâmica da turbina eólica apoiada em uma base gravitacional (GBF) é mais afetada pela força distribuída quando se considera apenas as cargas de vento, enquanto a força de arrasto causa um deslocamento dinâmico máximo semelhante ao da força de inércia ao considerar apenas as cargas de onda (Xu *et al.*, 2023).

Quando as cargas de vento e ondas são combinadas, a resposta dinâmica do GBF mostra uma tendência semelhante àquela somente sob cargas de vento, com um grande deslocamento na direção horizontal no início do carregamento (Wenbo *et al.*, 2022). Em experimentos, feitos por Yang *et al* (2022), de laboratório de pequena escala, descobriu-se que as ondas são a principal fonte de cargas instáveis em turbinas eólicas offshore, com ondas de maior amplitude causando um aumento no desvio padrão relativo das cargas integrais.

As cargas de ondas têm um impacto significativo nas torres eólicas offshore. A resposta dinâmica de torres altas de turbinas eólicas de aço monopílico offshore sob vento, onda e corrente durante o estágio de montagem foi estudada, e descobriu-se que o campo atual afeta fortemente a resposta dinâmica dos monopólos offshore, mais significativamente do que o campo de ondas (Edwards *et al.*, 2019).

O desalinhamento entre o vento e as ondas causa grandes cargas na torre na direção lateral, que tem muito pouco amortecimento estrutural em comparação com a direção dianteira e traseira. Para mitigar essas cargas, amortecedores de massa passivos ajustados podem ser usados para absorver e dissipar vibrações estruturais, resultando em uma redução das cargas de fadiga da torre dianteira e lateral (Hu *et al.*, 2020).

3.2.2. FUNDAÇÕES PARA TORRES EÓLICAS OFFSHORE

Diferentes tipos de fundações foram desenvolvidos para atender aos requisitos específicos das turbinas eólicas offshore. Conforme abordado por Nascimento (2018) em seu estudo sobre a tipificação de fundações de turbinas eólicas de parques eólicos off-shore, a implantação de parques eólicos marítimos requer técnicas, equipamentos e infraestruturas de nível superior em comparação aos empreendimentos eólicos terrestres. Um aspecto importante destacado foi a relevância das fundações para a instalação dos aerogeradores em alto mar, considerando os diferentes métodos de fixação e tipos de estruturas de suporte.

Atualmente, existe um número limitado de tipos de fundação para torres eólicas offshore, sendo estas a fundação por gravidade, estaca única, tripé, sucção, jaqueta e as flutuantes. Estas últimas são implantadas a partir do método de ancoragem. As demais são fixadas através da perfuração do solo marinho. Excetuando-se, entretanto, a fundação por gravidade, que se estabiliza no leito marinho por meio da atuação do peso e do tamanho de sua estrutura (Nascimento, 2018).

3.1.2.1. FUNDAÇÕES FIXAS

As fundações fixas são comumente usadas para torres eólicas, tanto em terra quanto em águas rasas. Essas fundações são normalmente empregadas em águas abaixo de 30 m de profundidade e podem incluir opções como monopiles de aço de grande diâmetro ou bases gravitacionais (Lavanya *et al.*, 2020). Existem diferentes tipos de fundações fixas para torres eólicas offshore, sendo a escolha por determinado tipo feita, geralmente, com base na profundidade de instalação e nas condições geológicas do local (Barra *et al.*, 2019). Os tipos de fundação mais comumente utilizados são:

- Gravidade: São estruturas maciças de concreto que utilizam o peso para manter a torre em posição vertical. Elas são adequadas para águas rasas e solos firmes.
- Sucção: São fundações que utilizam vácuo para fixar a torre no fundo do mar. Elas são adequadas para águas rasas e solos arenosos.
- Monopile: São estruturas cilíndricas de aço que são cravadas no leito marinho. Elas são adequadas para águas rasas e solos firmes.

- Tripé: São estruturas em treliça que incorporam três pontos de ancoragem no fundo marinho. Elas são adequadas para águas profundas e solos firmes.
- Jaqueta: São estruturas em treliça que incorporam três ou quatro pontos de ancoragem no fundo marinho, proporcionando mais segurança à fixação das torres.

Figura 05: Fundações Fixas



Fonte: Virtousity Blog

As fundações do tipo monopile consistem em um tubo metálico de dimensões médias de 3 a 6 m de diâmetro. A técnica de cravação é relativamente simples, não exigindo-se qualquer pré-tratamento do terreno. Entretanto durante a instalação são necessários equipamentos com grande capacidade de elevação, ou seja, de erguer uma grande quantidade de peso a uma altura considerável (Mané Junior, 2014). Esse tipo de fundação oferece grandes vantagens em áreas com movimentos de sedimentos, contanto que esteja no intervalo de 10 a 40 m de profundidade (Hammar *et al.*, 2010).

Uma abordagem é o uso de um sistema de fundação que inclui uma monopile colocada no fundo do mar, com interfaces de fixação para uma unidade de plataforma de fundação e uma unidade de plataforma elétrica (Bartminn e Linnemann, 2020). Outro design de base inovador é a base híbrida de tripé, que combina uma caçamba de tripé convencional com grandes tapetes circulares para aumentar a capacidade de capotamento (Montaner *et al.*, 2020).

Vigas pré-fabricadas de concreto ou metal combinadas com pequenas bases construídas in situ com concreto também têm sido usadas para reduzir o volume do material e o tempo de montagem (Faizi *et al.*, 2019). Além disso, os métodos de melhoria para solos fracos ou moles na fundação de torres de turbinas eólicas são discutidos (Thruue e Nielsen, 2019). Esses avanços na tecnologia de fundações contribuem para a instalação eficiente e econômica das turbinas.

3.2.2.1.2. RELAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

A relação solo-base para torres eólicas offshore fixas é um aspecto crucial na otimização do projeto e desempenho dessas estruturas. Vários estudos foram realizados para investigar essa relação. Dessa forma, a análise geotécnica é um aspecto crucial no projeto de fundações para turbinas eólicas offshore. DNV GL (2023) destaca a importância de considerar tanto a resistência quanto as deformações do solo e da estrutura nas fundações. Os fatores de carga e de material são aplicados à resistência do solo, garantindo a segurança das fundações.

Além disso, assentamentos e riscos relacionados ao peso da estrutura devem ser cuidadosamente considerados para evitar problemas futuros. De acordo com Ferreira e Futai (2021), os tipos de solo mais comuns para fundações fixas de torres eólicas offshore são os solos argilosos, que possuem alta resistência à compressão e baixa permeabilidade, e os solos arenosos, que possuem baixa resistência à compressão e alta permeabilidade.

3.1.2.2.FUNDAÇÕES FLUTUANTES

As estruturas flutuantes são ancoradas no fundo do mar, mas não fixas sendo em geral chamadas de estruturas complacentes. Em virtude disso, podem exibir oscilações maiores, demandando análises não lineares do seu comportamento dinâmico-estrutural. Seu diferencial é que podem ser localizadas em regiões de grande profundidade e afastamento da costa. Os principais tipos são: Spar, Semi-Submersible e Tension Leg Platform (Nicaretta 2020). Na Figura 06 esses conceitos são ilustrados.

Figura 06: Fundações Flutuantes

Fonte: Virtousity Blog

As fundações flutuantes para torres eólicas offshore oferecem vantagens. Segundo Stormyr (2023), elas permitem a exploração de energia eólica offshore em áreas com profundidades de água além da faixa adequada para fundações fixas. Isso significa que uma porção maior do potencial offshore pode ser utilizada, já que grande parte dele está localizada nessas profundidades de água mais profundas. Além disso, fundações flutuantes podem ser fabricadas usando métodos industrializados, resultando em custos reduzidos de fabricação, transporte e instalação (Andersen *et al.*, 2018).

O uso de fundações flutuantes também permite a possibilidade de reduzir os custos do projeto conectando várias linhas de amarração a uma única âncora, o que pode levar à economia direta de custos e a uma escala reduzida de investigações geotécnicas offshore (Olabarrieta *et al.*, 2014). Além disso, o uso de tecnologias comprovadas de projeto e fabricação da indústria eólica em conceitos de fundações flutuantes pode resultar em estruturas mais leves, tempos de fabricação mais curtos e processos de montagem e instalação mais fáceis (Tang *et al.*, 2013).

Existem vários tipos de fundações flutuantes para torres eólicas offshore. Isso inclui plataformas de tração (TLPs), grandes caixões flutuantes cilíndricos para embarcações profundas conhecidas como longarinas e semissubmersíveis (Manzano-Agugliaro *et al.*, 2020). Outro tipo de fundação é a fundação de turbina eólica offshore flutuante Spar.

As fundações flutuantes para torres eólicas offshore são um conceito que ainda é limitado em aplicações em grande escala. O projeto Hywind Tampen é atualmente o único projeto executado com subestruturas de concreto em um ambiente comercial (Stormyr, 2023).

4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada coleta de dados para caracterizar os tipos de estruturas e fundações utilizadas atualmente, análises estruturais para identificar soluções viáveis, e a discussão dos resultados para a formulação de recomendações práticas e relevantes para o desenvolvimento da energia eólica offshore. A jornada de campo não foi realizada neste projeto, pois as análises serão baseadas em informações disponíveis na literatura e em fontes confiáveis de dados, além de dados obtidos a partir de simulações.

4.1. ANÁLISE ESTRUTURAL

Esta etapa consiste na análise estrutural de torres eólicas offshore, levando em consideração cargas ambientais, a ser realizada com base nos dados coletados na dissertação de Pestana (2016) e os obtidos a partir do Software Ftool. O projeto toma como base a simulação feita no referido trabalho, intitulado Sistemas estruturais para torres eólicas; dessa forma, utilizam-se dados de carregamento de vento e ondas encontrados por ele. Sendo assim, foi possível fazer a simulação e encontrar valores de força cortante, momento fletor e deslocamentos para torres submetidas a carregamento de vento, e combinação entre vento e ondas, após isto, foi feita uma comparação entre os resultados das duas situações.

4.2.1. CARACTERIZAÇÃO DAS TORRES

As torres analisadas foram tubulares de aço offshore com fundação do tipo monopile, modelo comercial, com três diferentes alturas, as mesmas utilizadas em Pestana (2016) em sua dissertação, de modo que seja possível utilizar os dados de carregamento encontrados. A base monopile é considerada a solução mais barata para profundidades de água inferiores a 30 m (Nasab *et al.*, 2022). A tabela mostra os diâmetros e espessuras das torres em diferentes cotas. A cota “-30 m”, é a cota onde a estrutura encontra o solo marinho, a cota “0 m” é onde está o nível da água.

Tabela 01: Dimensões das torres tubulares em aço offshore

	Seção (m)	Diâmetro externo (m)	Espessura (cm)
Torre 75 m	-60 — -30	5,0	—
	-30 — -20	5,0	8,5
	-20 — -10	5,0	7,5
	-10 — 0	4,7	7,0
	0 — 15	4,5	7,0
	15 — 35	4,0	7,0
	35 — 55	3,0	5,5
	55 — 75	2,0	3,5
Torre 100 m	-60 — -30	5,5	—
	-30 — -20	5,5	9,3
	-20 — -10	5,5	8,5
	-10 — 0	5,0	8,5
	0 — 15	5,0	8,5
	15 — 35	5,0	8,5
	35 — 55	5,0	8,5
	55 — 75	4,0	7,0
Torre 125 m	75 — 100	3,0	5,5
	-60 — -30	6,0	—
	-30 — -20	6,3	11,2
	-20 — -10	5,9	10,1
	-10 — 0	5,9	10,1
	0 — 15	5,4	9,3
	15 — 35	5,4	9,3
	35 — 55	5,4	9,3
	55 — 75	5,0	8,5
	75 — 100	4,0	7,0
	100 — 125	3,0	5,5

Fonte: Pestana (2016)

4.2.2. SOLICITAÇÕES

Para esta análise, é importante ressaltar que não foram considerados carregamentos axiais, como o peso próprio da torre e do rotor, bem como o peso de componentes estruturais, como parafusos e soldas. A razão para essa exclusão reside no foco da análise, que é a mensuração dos efeitos das cargas ambientais, especificamente vento e ondas, que atuam perpendicularmente nas torres. Dessa forma, o estudo não incorporou efeitos de segunda ordem, nem considerou imperfeições geométricas. Vale destacar que a consideração de cargas de segunda ordem, juntamente com as imperfeições geométricas, pode aumentar significativamente a complexidade da análise estrutural, tornando-a mais desafiadora e exigindo recursos computacionais mais avançados. No entanto, para os propósitos deste estudo, as dificuldades associadas às cargas de segunda ordem não foram abordadas, já que o enfoque principal era a avaliação das cargas ambientais para atender aos objetivos estabelecidos.

4.2.2.1. VENTO

Na análise estrutural, foram adotadas as cargas de vento determinadas por Pestana (2016), com base em diretrizes do Eurocódigo 1 e da norma EN 1991-1-4. Esses padrões forneceram orientações para o cálculo das cargas de vento. A abordagem integrou métodos analíticos e experimentais, com foco na direção horizontal da ação do vento. A estrutura foi dividida em trechos de 15 metros, o que se mostrou apropriado para torres de grande altura.

É considerada a pressão dinâmica do vento, que é influenciada pela velocidade, variando de acordo com a altura acima do solo e a rugosidade da área. A força do vento foi calculada para incorporação ao programa de análise estrutural, com base em coeficientes de força determinados a partir do diâmetro da torre e da pressão dinâmica do vento. Esses coeficientes variaram de acordo com a esbelteza da estrutura.

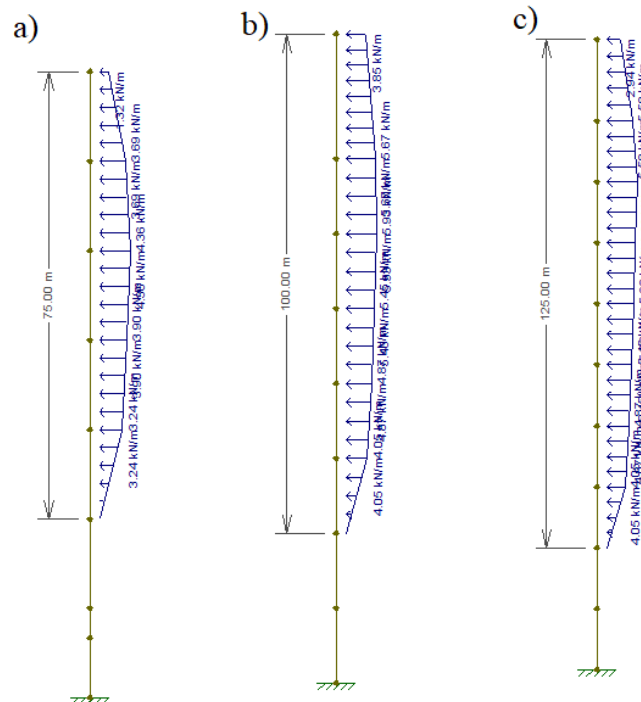
É importante mencionar que a análise não abordou as pás do aerogerador, uma vez que o foco principal estava nas torres de suporte. No entanto, Pestana (2016) reconheceu que, em situações de vento superior a 30 m/s, o aerogerador é travado para evitar rotações excessivas e possíveis danos ao sistema de rotação na nacela. Essa parada é controlada para minimizar os esforços na torre.

Tabela 02: Forças do Vento nas Torres

Torre 75 m		Torre 100 m		Torre 125 m	
Altura(m)	Força do Vento (kN/m)	Altura(m)	Força do Vento (kN/m)	Altura(m)	Força do Vento (kN/m)
15	3,24	15	4,05	15	4,05
30	3,9	30	4,87	30	4,87
45	4,36	45	5,45	45	5,45
60	3,69	60	5,93	60	5,93
75	1,32	75	5,67	75	6,33
		100	3,85	90	6,68
				105	5,58
				125	2,94

Fonte: Pestana (2016)

As influencia do vento fica maior a medida que a altura aumenta, uma vez que a velocidade das correntes de vento são mais elevadas em grandes cotas, mas como as torres tem diâmetros menores em cotas a mais altas, o carregamento diminui, devido a menor área de influência. O carregamento do vento foi aplicado como cargas distribuídas trapezoidais na torre, para modelagem no ftool, como vemos na figura 07 abaixo, que mostra como foram distribuídas as cargas na torre, os valores aplicados estão na tabela 02.

Figura 07: Carregamento de Vento nas Torres. a) 75m b) 100m c) 125m.**Fonte: Autor (2023)**

4.2.2.2. ONDAS

Para a análise estrutural foram utilizadas cargas marítimas encontradas por Pestana (2016) em sua dissertação. A força marítima acontece em cotas próximas da superfície da água, tanto acima quanto superfície. As ondas são perturbações na superfície do mar que se propagam através da água. Elas podem ser geradas pelo vento ou por outros eventos, como terremotos. As ondas podem transmitir sua energia até camadas mais profundas da água, afetando a coluna d'água como um todo, as cargas marítimas na estrutura pode ser calculada utilizando a equação de Morison (2).

As forças das ondas marítimas são determinadas com base em diversos fatores. Estes incluem os coeficientes de massa e de arrasto, que foram determinantes para a análise. Além disso, a densidade da água, o diâmetro do elemento estrutural, a velocidade das partículas da água e a aceleração dessas partículas também desempenharam papéis cruciais na determinação das cargas de ondas. Esses valores de velocidade e aceleração das partículas da água, necessários para o cálculo em consideração diferentes profundidades.

As forças de ondas, que foram calculadas em intervalos específicos, permitiram uma análise completa das influências das ondas nas torres eólicas offshore, sendo fundamentais para o estudo em questão.

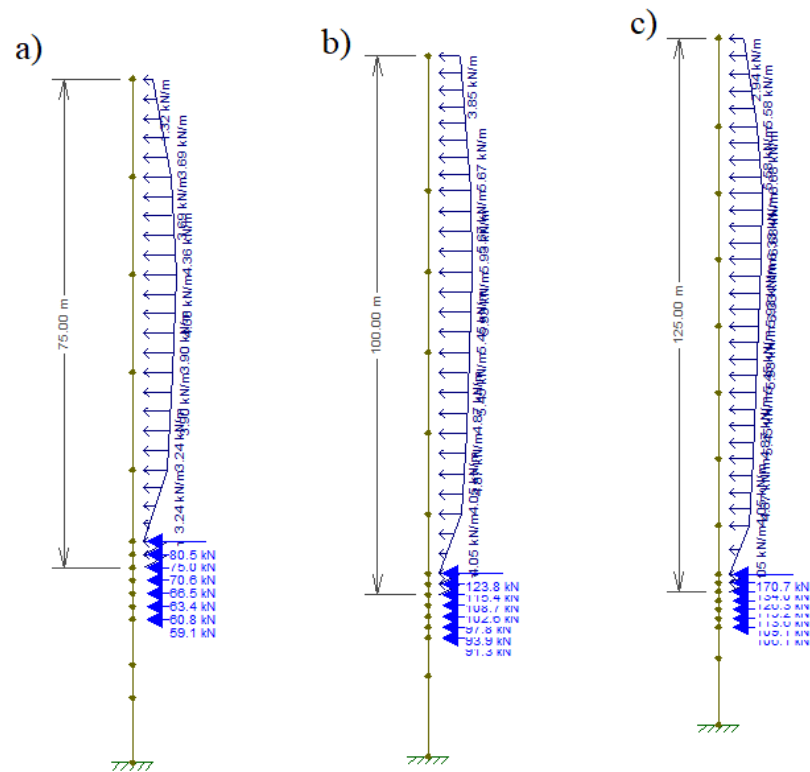
Tabela 03: Cargas das ondas marítimas nas torres

	Torre 75 m	Torre 100 m	Torre 125 m
Z (m)	F (kN)	F (kN)	F (kN)
4,0	80,50	123,80	170,69
2,0	74,97	115,39	133,98
0,0	70,57	108,71	126,26
-2,0	66,54	102,57	119,16
-4,0	63,41	97,80	113,63
-6,0	60,83	93,87	109,08
-8,0	59,13	91,27	106,07

Fonte: Pestana (2016)

Neste segundo momento, as cargas marítimas das ondas como forças pontuais foram adicionadas a simulação nas cotas apresentadas. A figura 08 mostra a distribuição das cargas na estrutura, os valores da cargas aplicadas estão nas tabelas 02 e 03.

Figura 08: Carregamento de Vento e Ondas nas Torres. a) 75m b) 100m c) 125m



Fonte: Autor (2023)

5. RESULTADOS

5.1. ANÁLISE ESTRUTURAL DE TORRES EÓLICAS OFFSHORE

Neste capítulo, será apresentado e discutido os resultados obtidos na análise estrutural das torres eólicas offshore. A análise concentrou-se nos esforços causados pelo vento e pelas ondas, uma vez que as torres estão localizadas no mar, e sofrem este tipo de carregamento perpendicular. Foram realizadas comparações entre os resultados obtidos utilizando o software Ftool com base nas cargas de vento e ondas obtidas da dissertação de mestrado de Pestana (2016).

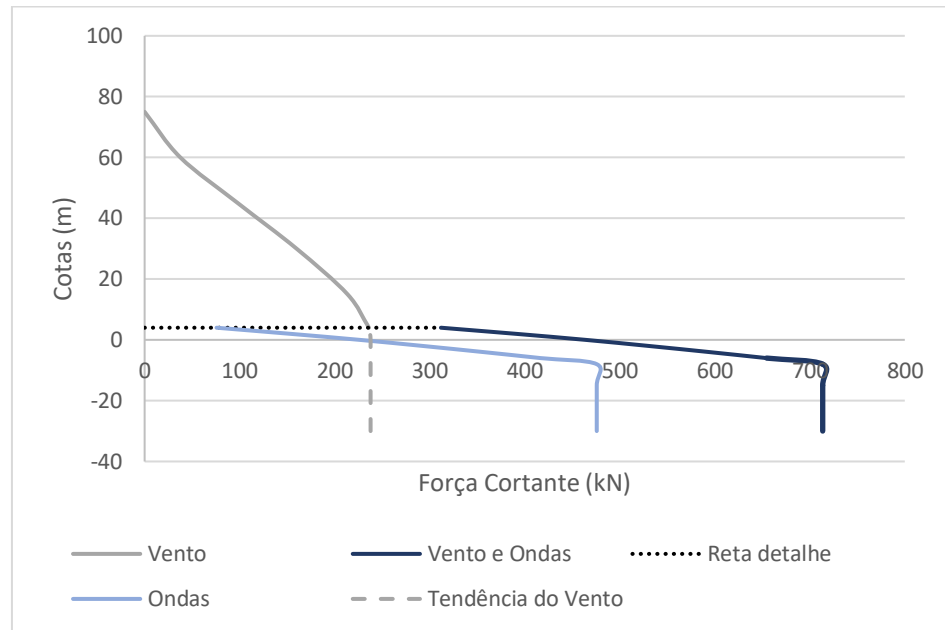
Os momentos de flexão em torres eólicas offshore podem ter efeitos significativos em sua integridade estrutural e desempenho. As propriedades mecânicas dos revestimentos marinhos aplicados a essas torres podem influenciar os momentos de flexão experimentados pela estrutura (Isbelis Lopez, 2016). Além disso, a rigidez flexural da própria torre desempenha um papel crucial na determinação da magnitude dos momentos de flexão (Devdas Menon, 1998).

5.1.2. TORRES SUBMETIDAS A CARGAS DE VENTO E ONDAS

5.1.2.1. FORÇA CORTANTE

Neste momento, são exibidos os resultados dos valores de força cortante no corpo das torres, causados pelos efeitos combinados do vento, das ondas e da sua interação. As simulações foram realizadas por meio do software Ftool, os valores são apresentados a cada 15 metros de altura e a cada 2 metros, nos pontos de aplicação das forças marítimas, com o objetivo de tornar visível a influência dessa componente. No apêndice A estão as tabelas de força cortante para as três torres. Abaixo, os gráficos demonstram a magnitude da força cortante em cada torre, levando em conta o aumento das forças marítimas e relacionando a altura de cada torre com a força cortante na cota correspondente.

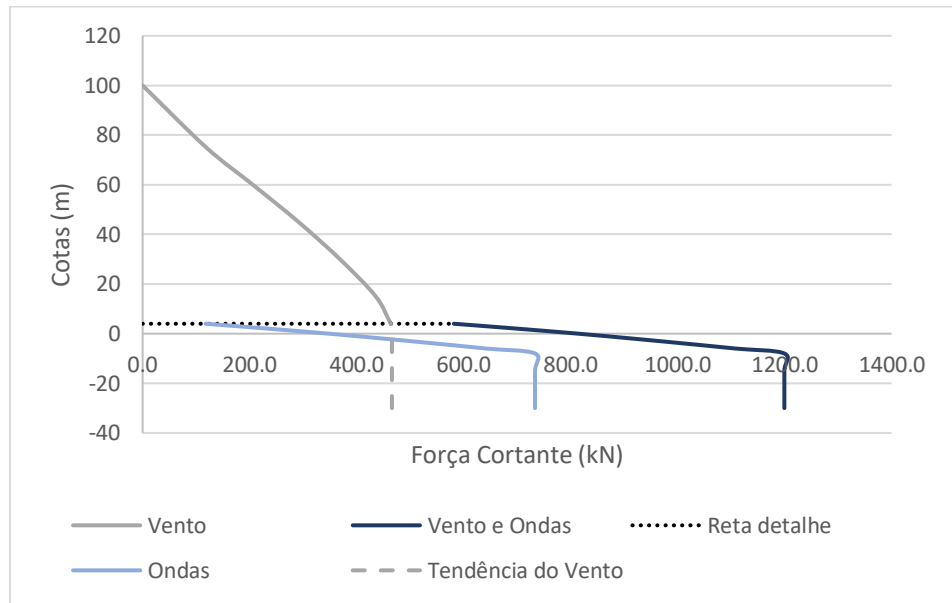
Na parte superior da torre de 75m, a força cortante é relativamente baixa devido à menor exposição às condições ambientais. À medida que descemos em direção ao nível da água, a força cortante começa a aumentar, devido a maior área de influência para ação do vento e incidência das cargas marítimas. A cota do nível da água marca o ponto crítico onde as cargas de vento e ondas começam a ter um impacto mais significativo na torre.

Gráfico 05: Comparação Força Cortante – Torre 75 m

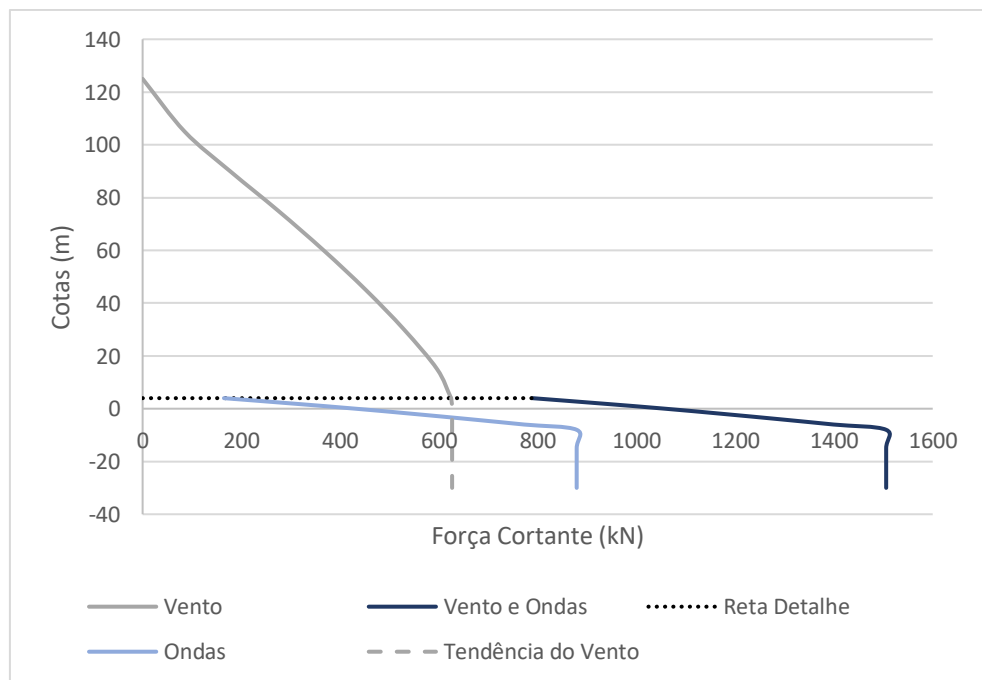
Fonte: Autor (2023)

O destaque aqui é o aumento significativo na força cortante quando ambas as cargas são combinadas. Por exemplo, a força cortante em -30 metros de profundidade aumenta em 200% quando se considera a combinação de vento e ondas em comparação com apenas o vento. Esse aumento é mais acentuado em cotas mais baixas.

Na torres de 100m, observa-se novamente um aumento significativo na força cortante quando se adicionam as cargas de ondas às de vento. Por exemplo, a força cortante em -30 metros aumenta em 157% quando consideramos a combinação de vento e ondas em comparação com apenas o vento. Esse aumento também é mais pronunciado em cotas mais baixas.

Gráfico 04: Comparação Força Cortante – Torre 100 m**Fonte: Autor (2023)**

Nesta torre 125m, percebe-se um padrão semelhante de aumento na força cortante quando se incluem as cargas de ondas. O aumento na força cortante é de 140% em -30 metros de profundidade quando se consideram vento e ondas em comparação com apenas o vento. Assim como nas outras torres, os acréscimos são mais significativos em cotas mais baixas.

Gráfico 05: Comparação Força Cortante – Torre 125 m**Fonte: Autor (2023)**

Nota-se que à medida que a altura das torres aumenta, o impacto das forças do vento e das ondas se torna mais evidente, resultando em acréscimos significativos na força cortante. Entretanto, as cargas das ondas também desempenharam um papel significativo no aumento das forças cortantes, especialmente nas torres de menor altura. Nas torres de 75 metros, por exemplo, a força cortante atinge seu pico em -30 metros de profundidade, onde as cargas de vento e ondas combinadas resultam em um aumento de 200%. Essa tendência de aumento progressivo se mantém nas torres de 100 metros e 125 metros.

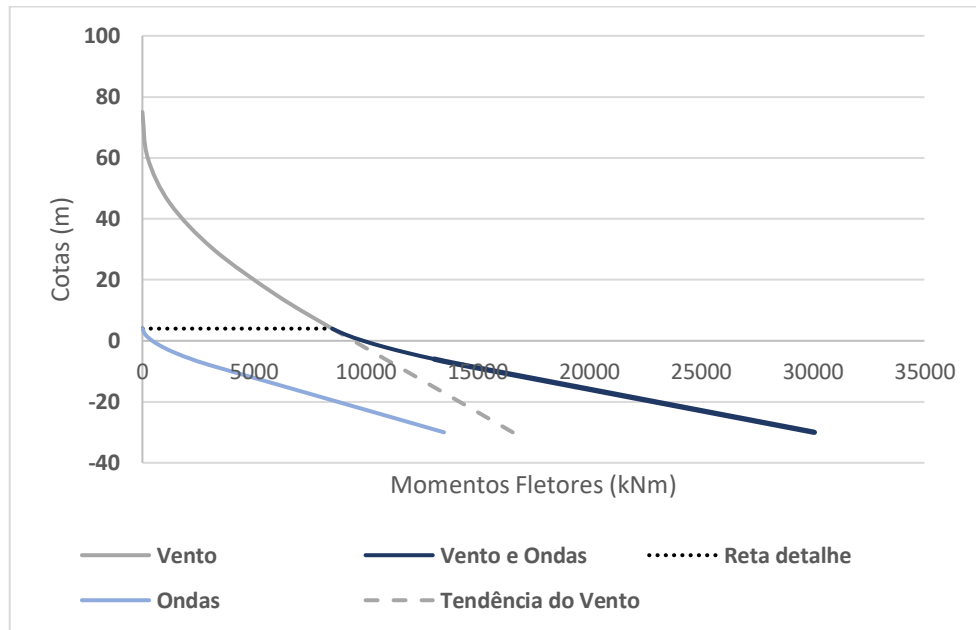
Além disso, observa-se que nas torres mais altas, a força cortante aumenta mais abruptamente com a profundidade, indicando a influência substancial das forças marítimas em cenários de maior altitude. À medida que a profundidade aumenta, as forças marítimas ganham influência gradualmente, até atingir uma profundidade em que as pressões hidroestáticas praticamente se anulam, resultando em uma estabilização no aumento da intensidade das forças.

Como demonstrado nos gráficos, a partir do momento em que as torres sofrem a influência das cargas marítimas, a força cortante mais que duplica, evidenciando a considerável influência das ondas nesse tipo de esforço. A força cortante é um fator de extrema importância, pois pode afetar a estabilidade da fundação, especialmente no que diz respeito a deslizamentos horizontais e ao tombamento da estrutura.

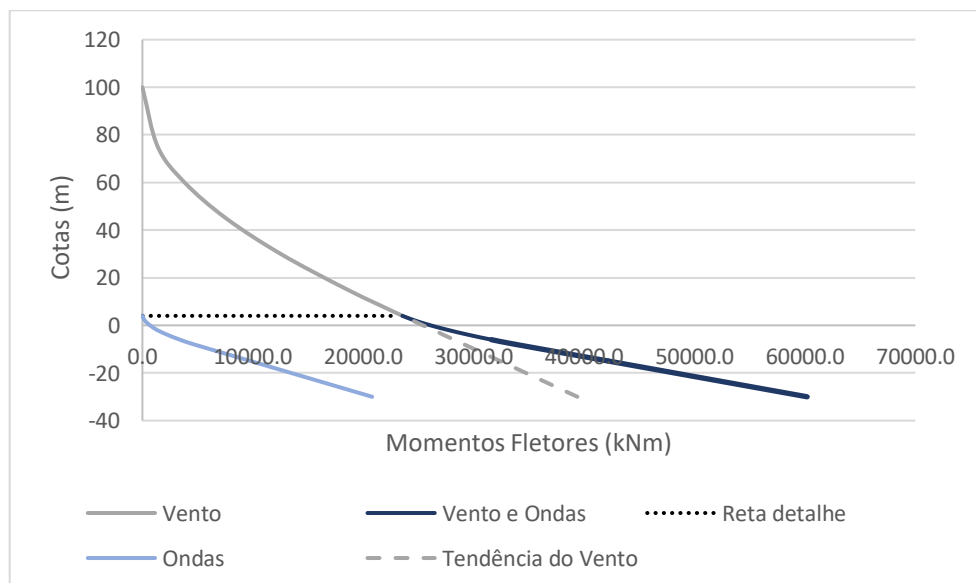
5.1.2.2. MOMENTO FLETOR

Neste tópico são apresentados os resultados dos valores de momento fletor nas torres, influenciados pelas forças do vento, das ondas e pela combinação desses fatores. Foi utilizado o software Ftool para conduzir as simulações. Assim como no caso da força cortante, os valores são registrados a cada 15 metros de altura e a cada 2 metros, nos pontos onde as forças marítimas são aplicadas, para evidenciar a influência desta componente. No apêndice B estão as tabelas de momento fletor para as três torres. Os gráficos mostram a magnitude dos momentos fletores em cada torre, com o incremento das forças marítimas. São relacionados a altura de cada torre com o momento gerado na cota em questão.

Na torre de 75m os momentos fletores são mais baixos em comparação com as mais altas, o que era esperado. No entanto, é notável que, em -30 metros de profundidade, o momento fletor aumenta em impressionantes 81% quando se consideram as cargas de vento e ondas em comparação com apenas o vento. Isso ressalta a influência significativa das cargas marítimas nas solicitações estruturais.

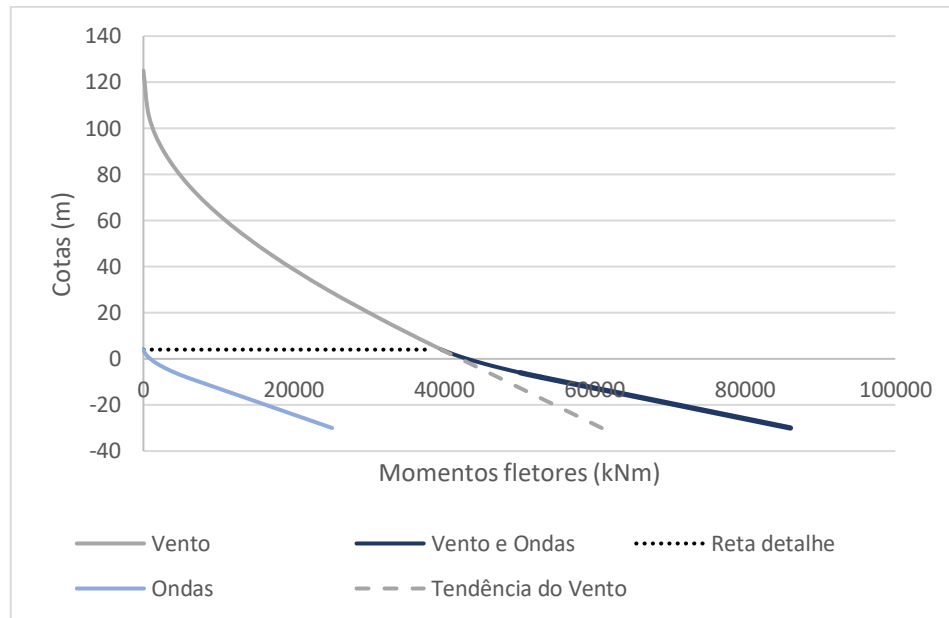
Gráfico 06: Comparação Momentos – Torre 75 m**Fonte: Autor (2023)**

Os momentos fletores na torre de 100m são mais elevados em comparação com a torre de 75 metros, devido à maior altura. Ainda assim, a combinação de vento e ondas resulta em um aumento de 53% no momento fletor em -30 metros de profundidade em relação ao vento apenas. Essa diferença evidencia a importância das cargas de ondas, mesmo em torres mais altas.

Gráfico 07: Comparação Momentos – Torre 100 m**Fonte: Autor (2023)**

Nesta torre ainda mais alta, de 125m, os momentos fletores são os mais altos de todas as torres analisadas. A combinação de vento e ondas aumenta o momento fletor em 41% em - 30 metros de profundidade em relação ao vento de forma isolada.

Gráfico 08: Comparação Momentos – Torre 125 m



Fonte: Autor (2023)

Os momentos fletores nas torres são significativamente influenciados pelo vento, com aumentos substanciais à medida que a altura da torre aumenta. A torre de 75 metros apresentou os menores momentos fletores, enquanto a torre de 125 metros experimentou os maiores. Isso era esperado, já que torres mais altas estão sujeitas a cargas de vento mais intensas, possuem mais área de influência além de um maior braço de alavanca. As cargas de ondas tem contribuição maior em torres menores, uma vez que na torre de 75 m teve um aumento de 81 %, o maior entre as três torres, no momento fletor na base da estrutura. As forças máximas contribuem para aumentar os momentos fletores, mas em geral, sua influência é menor do que a do vento, devido tanto as magnitudes menores das forças.

5.1.2.3.DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS

Também utilizando o Software de análise estrutural ftool, foi possível mensurar o deslocamentos da torre. Na tabela abaixo estão os deslocamentos do topo das torres devido as cargas de vento e combinação de vento e ondas.

Tabela 4: Deslocamentos Horizontais no Topo das Torres

	Vento(mm)	Vento e Ondas(mm)	Acréscimo
75 m	87,59	113,10	23%
100 m	192,90	226,05	15%
125 m	281,80	310,20	9%

Fonte: Autor (2023)

Os deslocamentos horizontais no topo das torres são significativamente influenciados pelas forças do vento e pelas ondas. À medida que a altura da torre aumenta, os deslocamentos também aumentam. Observa-se um aumento de 23% nos deslocamentos quando se considera a combinação de vento e ondas em relação apenas ao vento para a torre de 75 metros. Esse acréscimo é menor para as torres mais altas, indicando que as cargas de vento têm um impacto mais substancial nos deslocamentos horizontais em torres mais altas.

6. CONCLUSÃO

A energia eólica offshore desempenha um papel crucial na transição global para fontes de energia mais limpas e sustentáveis. É uma opção viável e renovável que aproveita os ventos constantes e fortes sobre os oceanos. Comparada à energia eólica onshore, a offshore oferece várias vantagens, incluindo ventos mais consistentes e velocidades mais elevadas, resultando em uma produção de energia mais estável e maior eficiência. A energia eólica offshore é uma opção melhor em muitos aspectos. Ela evita problemas de paisagem e ruído associados à energia eólica terrestre, além de proporcionar a possibilidade de instalar turbinas de maior capacidade. Além disso, a energia eólica offshore pode ser localizada mais próxima das áreas de demanda, reduzindo perdas na transmissão de energia.

Os resultados demonstram claramente que as cargas de vento têm um impacto significativo na resposta estrutural das torres. À medida que a altura da torre aumenta, as forças de vento também aumentam substancialmente. Além disso, as cargas de ondas, embora geralmente menores que as de vento, desempenham um papel relevante, especialmente em torres de menor altura, elas ainda são significativas, especialmente em torres mais baixas. Isso enfatiza a necessidade de considerar uma abordagem integrada que leve em consideração todas as cargas ambientais ao projetar as fundações das torres eólicas offshore.

Os momentos fletores nas torres eólicas offshore são amplamente influenciados pelo vento. À medida que a altura das torres aumenta, as cargas de vento tornam-se substancialmente maiores. Isso é consistente com as expectativas, uma vez que torres mais altas estão sujeitas a correntes de vento mais intensas. Embora as cargas de ondas contribuam para o aumento dos momentos fletores, sua influência geralmente é menor do que a do vento. As ondas exercem pressão na parte inferior da torre, especialmente em cotas próximas à superfície da água, mas seus efeitos tendem a ser secundários em comparação com o vento na geração de momentos fletores. Já em relação a força cortante, as cargas marítimas são as mais relevantes em cotas mais baixas.

Os deslocamentos horizontais no topo das torres também aumentam com a altura, e as cargas de vento desempenham um papel fundamental nesse aumento. Isso ressalta a importância de projetar fundações robustas e sistemas de ancoragem para garantir a estabilidade das torres eólicas em condições adversas.

A energia eólica offshore desempenha um papel fundamental na busca por um futuro sustentável e na redução das emissões de carbono. Ao aproveitar os recursos naturais do vento sobre os oceanos, contribui para a geração de eletricidade limpa, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. Isso não apenas ajuda a mitigar as mudanças climáticas, mas também promove a saúde do planeta e das gerações futuras.

A expansão da energia eólica offshore é um componente crucial para a transição global para fontes de energia limpa e renovável. Ela desempenha um papel vital na redução das emissões de gases de efeito estufa, na melhoria da qualidade do ar e na criação de empregos na indústria de energia renovável. Além disso, a energia eólica offshore oferece a oportunidade de fornecer eletricidade confiável a áreas costeiras densamente povoadas.

No contexto brasileiro, a viabilidade da energia eólica offshore é clara. O país possui uma extensa costa ao longo do Atlântico, com ventos favoráveis em muitas áreas costeiras. Investir na expansão da energia eólica offshore pode contribuir para a diversificação da matriz energética brasileira, reduzir a dependência de fontes de energia não renovável e impulsionar a economia por meio da criação de empregos e investimentos em tecnologias limpas.

Portanto, a análise estrutural das torres eólicas offshore é um componente crítico do desenvolvimento da energia eólica em ambientes marinhos. Os resultados desta pesquisa não apenas fornecem informações valiosas para engenheiros e projetistas, mas também contribuem para a expansão sustentável da energia eólica offshore como uma fonte viável e renovável de energia. A busca por um futuro mais limpo e sustentável depende do aproveitamento inteligente e responsável dos recursos naturais, e a energia eólica offshore desempenha um papel essencial nesse esforço global.

6.1. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise de efeitos de segunda ordem, de torres eólicas offshore.
- Análise estrutural devido cargas sísmicas em torres eólicas offshore.
- Análise estrutural devido efeitos de geleiras em torres eólicas offshore.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSEN, Morten Thøtt; TÊTU, Amélie; STIESDAL, Henrik. **Economic Potential of Industrializing Floating Wind Turbine Foundations**. Aalborg University, 24 Sep 2018.

Agência Internacional de Energia (AIE). **Renewable Energy Market Update - 2023 Outlook**. 2023. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-june-2023>>. Acesso em 07 jul. 2023.

ARSHAD, M. A.; O'KELLY, B. C. **Offshore wind-turbine structures: a review**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Energy. v. 166, n. EN4, p. 139-152. DOI: 10.1680/ener.12.00019. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEÓLICA). **Boletim Anual 2022**. 2022. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2023/06/Boletim-de-Geracao-Eolica-2022.pdf>>. Acesso em 04 jul. 2023.

BAI, Li. **Tower-silo structure of offshore wind turbine**. 2017.

BARRA, Maria Fernanda Wamser et al. **Modelos Físicos de Fundações para Torres Eólicas Offshore**. In: XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul (GEOSUL), 2019, Joinville, Santa Catarina, Brasil. Rio de Janeiro: ABMS, 2019.

BARTMINN, Daniel; LINNEMANN, Claus. **Foundation for an offshore structure**. 2020.

BENEDET, G. W., PARGA, H., Paiva, M. de, NORÕES, J. J., DUTRA, J. de A. **Potential synergy between natural gas production and offshore wind power generation: a case study in northeast Brazil**. Dyna. doi: 10.15446/DYNA.V88N219.93083. 2021.

BNAMERICAS. **Regulamentação de energia eólica offshore no Brasil em fase final**. Disponível em: <<https://www.bnamericas.com/pt/noticias/regulamentacao-de-energia-eolica-offshore-no-brasil-em-fase-final>>. Acesso em 04 set. 2023.

BORBA, Paula; SOUSA, Wilson Cabral De; SHADMAN, Milad; PFENNINGER, Stefan. **Enhancing drought resilience and energy security through complementing hydro by offshore wind power—The case of Brazil**. Energy Conversion and Management. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.116616. 2023.

BULJAC, Andrija; KOZMAR, Hrvoje; YANG, Wenxian; KAREEM, Ahsan. **Concurrent wind, wave and current loads on a monopile-supported offshore wind turbine**. Engineering Structures. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.113950. 2022.

BYRNE, B. W.; HOULSBY, G. T. **Foundations for Offshore Wind Turbines**. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Vol. 361, p. 2909–2930. 2003.

CHARTRON, Sylvain; HAASIS, Hans-Dietrich. **Improving Logistics Efficiency in Offshore Wind Farms Construction**. DOI: 10.1007/978-3-319-74225-0_17. 2018.

CHRISTIANSEN, Thomas Bak; KNUDSEN, Torben. **Damping Wind and Wave Loads on a Floating Wind Turbine**. Energies. DOI: 10.3390/EN6084097. 2013.

CORIOLOANO, Thiago Ribeiro et al. **Study of the temporal variation of offshore wind energy potential in southeast Brazil**. Ciência e Natura. DOI: 10.5902/2179460x68814. 2022.

CUI, Yinan; CUI, Xinwei; WANG, Hui. **Horizontal-axis offshore wind turbine set tower**. 2020.

DAMIANI, R. **Design of offshore wind turbine towers**. DOI: 10.1016/B978-0-08-100779-2.00010-6. 2015.

DIÁRIO OFICIAL DE UNIÃO. **Decreto nº 10.946, de 25 de janeiro de 2022**. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.946-de-25-de-janeiro-de-2022-376016988>>. Edição 17. 2022.

DNV GL. **"Foundations for Offshore Wind Farms: Key Considerations for Successful Projects."** DNV GL Energy Transition Insights. 1-10. 2023.

DNV-OS-J101. **Design of Offshore Wind Turbine Structures**. Offshore Standard. 2014.

DO CARMO, Luiz Felipe Rodrigues; DE ALMEIDA PALMEIRA, Ana Cristina Pinto; DE JESUS LAURIANO, Carlos Felipe; DE JESUS PALMEIRA, Ronaldo Maia. **Comparison of wind profile estimation methods for calculating offshore wind potential for the Northeast region of Brazil**. International Journal of Energy and Environmental Engineering. DOI: 10.1007/S40095-021-00428-7. 2021.

EDWARDS, Samuel J.; COLLETTE, Matthew; TROESCH, Armin W. **Wind and Wave Environments that Lead to Extreme Loads on Offshore Structures**. DOI: 10.1109/OCEANSE.2019.8867418. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2032**. 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2032>>. Acesso em 07 jul. 2023.

EPBR. **Mapa da energia eólica offshore no Brasil**. Disponível em: <<https://epbr.com.br/mapa-da-energia-eolica-offshore-no-brasil/>>. Acesso em 04 set. 2023.

FAIZI, K., Faramarzi, A., DIRAR, S., & CHAPMAN, D. **Investigating the monotonic behavior of hybrid tripod suction bucket foundations for offshore wind towers in sand**. Applied Ocean Research. doi: 10.1016/J.APOR.2019.05.018. 2019.

FERNANDES, Italo Gusmão. **Exploração da Complementaridade Eólica Offshore para Redução da Variabilidade de Geração**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, Janeiro 2023.

FERREIRA, Ynaê Almeida; FUTAI, Marcos Massao. **Influência da Fundação e do Solo na Frequência Natural de Torres Eólicas**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2021.

FEYZOLLAHZADEH, M. J., MAHMOODI, S. M. Y., & JAMALI, J. **Wind load response of offshore wind turbine towers with fixed monopile platform**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. doi: 10.1016/J.JWEIA.2016.09.007. 2016.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). **Global Wind Report 2023**. 2023.

HAMMAR, L.; ANDERSSON, S.; ROSENBERG, R. **Adapting offshore wind power foundations to local environment** *Adapting offshore wind power foundations to local environment*. [s.l.] Swedish Environmental Protection Agency, 2010.

HANNAH, K. M. **The Coordinated Development of Offshore Energy Infrastructure: Legal Challenges and Possible Solutions**. Competition and Regulation in Network Industries, 14(3), 59-80. doi: 10.1177/178359171301400304. 2013.

HARITHA, K., Raju, L., RANI, F., & KAMAL, B. **Converging Offshore Wind Energy Difficulties**. 2021.

HERNANDEZ-ESTRADA, Edwin et al. **Considerations for the structural analysis and design of wind turbine towers: A review**. Renewable & Sustainable Energy Reviews. DOI: 10.1016/J.RSER.2020.110447. 2021.

HSIEH, Chih-Hung; LU, Louise Y.; LIN, Chien Huei; LIU, John S. **Offshore Wind Energy Research Trajectory and Trends**. DOI: 10.23919/PICMET.2018.8481999. 2018.

HU, Yu. et al., **Dynamic analysis of offshore steel wind turbine towers subjected to wind, wave, and current loading during construction**. Ocean Engineering, Volume 216, 14 Nov 2020, Pages 108084.

IBERDROLA. **O que é a energia eólica offshore**. Disponível em: <<https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/como-funcionam-os-parques-eolicos-offshore>>. Acesso em 04 set. 2023.

ISLAM, Zaheer Nazrul. **Effect of current on the dynamic response of a bi-articulated offshore tower**. Advances in Structural Engineering. DOI: 10.1177/1369433220930324. 2020.

KAISER, B. F., & Snyder, B. **Offshore wind structure weight algorithms**. Ships and Offshore Structures. doi: 10.1080/17445302.2013.870772. 2014.

KAZUMASA, O. et al. **Wind Loads on a Bottom-mounted Offshore Wind Turbine Tower**. Published on 14 Mar 2017, Pages 746.

KURIAN, S. P., & NARAYANAN, C. G. **Towers for Offshore Wind Turbines**. doi: 10.1063/1.3464894. 2010.

LAVANYA, C.; DARGA KUMAR, Nandyala. **Foundation Types for Land and Offshore Sustainable Wind Energy Turbine Towers**. In: Gokaraju Rangaraju Institute of Engineering and Technology1, pp 01094, 2020.

LI, Lingling; LIU, Zhi-Feng; WANG, Chengshan; LI, Heng-Yi; ZHANG, Junting. **Offshore wind energy-wave energy combined power generation device**. 2020.

LIU, Yuxia; ZHANG, Chentian; WANG, Junjie; ZHANG, Chengqin; LIU, Lu; HUANG, Yanhong; YANG, Chao. **Buffer mechanism for offshore wind power tower overturn**. 2020.

LOPEZ, I., Leung, P. S., Inam, F., Till, C., & Paulsen, A. L. **Mechanical characterization of protective coatings for offshore wind turbine towers and transition pieces**. doi: 10.1109/ICSAE.2016.7810207. 2016.

MAIA, V. M. J. **Análise e Dimensionamento de Torre Eólica Offshore: Estudo Paramétrico**. FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO. 2009.

MANÉ JUNIOR, A. **Estruturas metálicas offshore para suporte de turbinas eólicas**. janeiro de 2014. Dissertação mestrado, FCTUC, Coimbra

MANNINI, Tommaso; MASSAI, Andrea; GIACHETTI, Alessandro; GIUSTI. **Aerodynamic loads on groups of offshore wind turbine towers stored on quaysides during the pre-assembly phase**. 2023.

MANZANO-AGUGLIARO, Francisco et al. **Wind Turbines Offshore Foundations and Connections to Grid**. Department of Engineering, University of Almeria, ceiA3, 04120 Almeria, Spain, 2020.

MARCOLINO, Matheus; NASCIMENTO, de Souza; SHADMAN, Milad; SILVA, Corbiniano; FREITAS ASSAD, Luiz Paulo; ESTEFEN, Segen F.; LANDAU, Luiz. **Offshore wind and solar complementarity in Brazil: A theoretical and technical potential assessment**. Energy Conversion and Management. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.116194. 2022.

MEGAWHAT. **Eólica Offshore**. 2023. Disponível em: <<https://megawhat.energy/verbetes/69735/eolica-offshore>>. Acesso em 25 jun. 2023.

MELO, D. C., González, M. O. A., VASCONCELOS, R. M., Neto, F. C. G., MAZETTO, B. M., Nunes, J. P. C. e S. **Estrutura de custo de empreendimento eólico offshore: estudo de caso comparativo de projetos da Europa e da América do Sul**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFRN. Grupo de Pesquisa Cri-Ação: Renewable Energy. 2020.

MIN, J. M. **Tower structure and wind turbine tower**. 2020.

MONTANER, Fragüet Jesus; ECHAVE, Jose Manuel; PEREZ, Mariano Abadia. **Foundation for wind turbine towers**. 2020.

MOSTAFAEIPOUR, A. **Feasibility study of offshore wind turbine installation in Iran compared with the world**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 14, n. 7, p. 1722–1743, 2010.

NASAB, Navid Majdi; KILBY, Jeff; BAKHTIARYFARD, Leila. **Analysis and Design of Monopile Foundations for Offshore Wind and Tidal Turbine Structures**. WATER, 2022.

NASCIMENTO, W. S. **Tipificação de fundações de turbinas eólicas de parques eólicos off-shore**. Revista de Engenharia e Tecnologia, ISSN 2176-7270. 2018.

NICARETTA, Gabriel Armando. **Análise Dinâmica Não-Linear de uma Turbina Eólica Flutuante - Modelo SPAR**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

NP EN1991-1-4, EUROCÓDIGO 1: **Acções em estruturas - Parte 1-4: Acções do vento**, Bruxelas: CEN, 2010.

PESTANA, D. A. C. **Sistemas estruturais para torres eólicas**. FCEE – Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia. Campus Universitário da Penteada. 2016.

PETERSEN, Erik Lundtang et al. **Offshore Wind Farms**. DOI: 10.1002/9781118991978.HCES080. 2015.

REN, Zhengru et al. **Anti-swing device for offshore wind turbine tower installation**. 2020. Disponível em: <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmloi/bitstream/handle/11250/2831923/Ren_etal_2021.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. Acesso em: 30 set. 2023.

REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA. **A Energia Eólica Offshore como Alternativa para a Diversificação da Matriz Energética Brasileira**. Revista de Engenharia e Tecnologia, 10(1), 1-15. 2023.

SABA, Rahman et al. **Wind induced vibration of the tower of offshore wind turbine**. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 682, n. 1. DOI: 10.1088/1755-1315/682/1/012008. 2021.

SHAH, Syed Awais Ali et al. **Advanced robust control techniques for the stabilization of translational oscillator with rotational actuator based barge-type OFWT**. DOI: 10.1177/1475090221991431. 2021.

SHI, W. et al. **Feasibility study of offshore wind turbine substructures for southwest offshore wind farm project in Korea.** Renewable Energy, v. 74, p. 406–413, 2014.

SIYOU, Xia et al. **Potential of China's offshore wind energy.** Science. DOI: 10.1126/science.adh0511. 2023.

SPIROPOULOU, I., KARAMANIS, D., & KEHAYIAS, G. **Offshore wind farms development in relation to environmental protected areas.** Sustainable Cities and Society. doi: 10.1016/J.SCS.2014.05.006. 2015.

STORMYR, Erik. **Serial Production of Floating Wind Concrete Foundations.** 23 Apr 2023.

STRACQUALURSI, Erika; ARANEO, Rodolfo; BURGHIGNOLI, Paolo; CELOZZI, Salvatore; LOVAT, Giampiero. **Offshore Wind Towers Interaction Through Their Grounding Systems.** DOI: 10.1109/EMCEUROPE.2018.8485085. 2018.

TANG, Yougang; LI, Jiawen; ZHANG, Ruoyu; HAN, Wang. **Offshore wind power floating foundation suitable for small water plane with water depth below 100m.** 02 de abril de 2013.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno (Org.). **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica.** EPE: Rio de Janeiro, 2016.

THRUE, Carsten; NIELSEN, Soeren E. **Foundation building system for an offshore wind turbine and method for installation of an offshore wind turbine.** 2019.

VEERS, Paul, S. et al. **Grand Challenges: wind energy research needs for a global energy transition.** Wind energy science. 2022. doi: 10.5194/wes-7-2491-2022.

VINHOZA, Amanda; SCHAEFFER, Roberto. **Brazil's offshore wind energy potential assessment based on a Spatial Multi-Criteria Decision Analysis.** Renewable & Sustainable Energy Reviews. DOI: 10.1016/J.RSER.2021.111185. 2021.

WANG, X. Zeng, X. Li, J. Yang, X. Wang, H. **A review on recent advancements of substructures for offshore wind turbines.** Energy Conversion and Management, v. 158, n. January, p. 103–119, 2018.

WENBO, Tu et al. **Time Domain Nonlinear Dynamic Response Analysis of Offshore Wind Turbines on Gravity Base Foundation under Wind and Wave Loads.** Journal of Marine Science and Engineering. doi: 10.3390/jmse10111628. 2022.

WINDEUROPE. **Offshore Wind in Europe: Key Trends and Statistics 2022.** 2023. Disponível em: <

WÖRMANN, Reinhard; HARTE, Harte. **Structural degradation of wind-turbine towers under combined wind and thermic action.** DOI: 10.1016/B978-008044046-0.50385-7. 2002.

YANG, Yu. et al. **Robust design of monopiles for offshore wind turbines considering uncertainties in dynamic loads and soil parameters.** Ocean Engineering. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.112822. 2022.

YIGIT, M. et al. **Analysis of Offshore Wind Turbine Towers with Different Designs by Finite Elements Method**. DOI: 10.24178/IJARE.2018.4.3.01. 2018.

XU, K. J., Liu, F., & Liu, D. **A multifield loads evaluation method for offshore wind turbines considering multivariate coherence effect**. Ocean Engineering. doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.114586. 2023.

APÊNDICE A – Tabelas de força cortante

Torre 75m

Altura(m)	Diâmetro(m)	Vento (kN)	Ondas (kN)	Vento e Ondas (kN)	Acréscimo
-30	5	237,8	475,8	713,6	200%
-15	5	237,8	475,8	713,6	200%
-8	4,7	237,8	475,8	713,6	200%
-6	4,7	237,8	416,7	654,5	175%
-4	4,7	237,8	355,9	593,7	150%
-2	4,7	237,8	292,5	530,3	123%
0	4,5	237,8	226,1	463,9	95%
2	4,5	237,3	152,7	390,0	64%
4	4,5	236,1	75,7	311,8	32%
15	4,5	213,5	0,0	213,5	0%
30	4	159,9	0,0	159,9	0%
45	3	98,0	0,0	98,0	0%
60	2	37,6	0,0	37,6	0%
75	2	0	0,0	0	0%

Fonte: Autor (2023)

Torre 100m

Altura(m)	Diâmetro(m)	Vento (kN)	Ondas (kN)	Vento e Ondas (kN)	Acréscimo
-30	5,5	466,0	733,5	1199,5	157%
-15	5,5	466,0	733,5	1199,5	157%
-8	5	466,0	733,5	1199,5	157%
-6	5	466,0	642,2	1108,2	138%
-4	5	466,0	548,3	1014,3	118%
-2	5	466,0	450,5	916,5	97%
0	5	466,0	347,9	813,9	75%
2	5	465,5	235,7	701,2	51%
4	5	463,9	117,8	581,7	25%
15	5	435,7	0,0	435,7	0%
30	5	368,8	0,0	368,8	0%
45	5	291,4	0,0	291,4	0%
60	4	206,0	0,0	206,0	0%
75	3	119,0	0,0	119,0	0%
100	3	0	0,0	0	0%

Fonte: Autor (2023)

Torre 125m

Altura (m)	Diâmetro (m)	Vento (kN)	Ondas (kN)	Vento e Ondas (kN)	Acréscimo
-30	6,3	626,7	879,0	1505,7	140%
-15	5,9	626,7	879,0	1505,7	140%
-8	5,9	626,7	879,0	1505,7	140%
-6	5,9	626,7	772,9	1399,6	123%
-4	5,9	626,7	663,8	1290,5	106%
-2	5,9	626,7	550,2	1176,9	88%
0	5,4	626,7	431,0	1057,7	69%
2	5,4	626,2	301,1	927,3	48%
4	5,4	624,6	164,7	789,3	26%
15	5,4	596,3	0,0	596,3	0%
30	5,4	529,4	0,0	529,4	0%
45	5,4	452,0	0,0	452,0	0%
60	5	366,7	0,0	366,7	0%
75	4	274,7	0,0	274,7	0%
90	4	177,2	0,0	177,2	0%
105	3	85,2	0,0	85,2	0%
125	3	0	0,0	0	0%

Fonte: Autor (2023)

APÊNDICE B – Tabelas de momento fletor

Tabela - Torre 75m

Altura(m)	Diâmetro(m)	Vento (kNm)	Ondas (kNm)	Vento e Ondas (kN*m)	Acréscimo
-30	5	16573,5	13498,9	30072,4	81%
-15	5	13007,3	6360,3	19367,6	49%
-8	4,7	11342,6	3029,5	14372,1	27%
-6	4,7	10867,3	2195,7	13063,0	20%
-4	4,7	10392,7	1482,8	11875,5	14%
-2	4,7	9916,3	898,5	10814,8	9%
0	4,5	9441,0	446,1	9887,1	5%
2	4,5	8967,5	135,2	9102,7	2%
4	4,5	8493,1	0,0	8493,1	0%
15	4,5	5996,2	0,0	5996,2	0%
30	4	3183,7	0,0	3183,7	0%
45	3	1241,2	0,0	1241,2	0%
60	2	237,4	0,0	237,4	0%
75	2	0	0,0	0	0%

Fonte: Autor (2023)**Torre 100m**

Altura(m)	Diâmetro(m)	Vento (kNm)	Ondas (kNm)	Vento e Ondas (kNm)	Acréscimo
-30	5,5	39393,7	20807,9	60201,6	53%
-15	5,5	32403,3	9805,7	42209,0	30%
-8	5	29141,8	4670,7	33812,5	16%
-6	5	28206,9	3389,1	31596,0	12%
-4	5	27277,1	2290,3	29567,4	8%
-2	5	26384,8	1349,6	27734,4	5%
0	5	25413,0	693,6	26106,6	3%
2	5	24481,5	217,3	24698,8	1%
4	5	23552,0	0,0	23552,0	0%
15	5	18574,5	0,0	18574,5	0%
30	5	12526,1	0,0	12526,1	0%
45	5	7564,5	0,0	7564,5	0%
60	4	3825,3	0,0	3825,3	0%
75	3	1392,7	0,0	1392,7	0%
100	3	0	0,0	0	0%

Fonte: Autor (2023)

Torre 125m

Altura(m)	Diâmetro(m)	Vento (kNm)	Ondas (kNm)	Vento e Ondas (kNm)	Acréscimo
-30	6,3	60953,7	25092,2	86045,9	41%
-15	5,9	51553,2	11907,2	63460,4	23%
-8	5,9	47168,9	5751,7	52920,6	12%
-6	5,9	45910,7	4210,7	50121,4	9%
-4	5,9	44658,8	2881,6	47540,4	6%
-2	5,9	43403,5	1783,1	45186,6	4%
0	5,4	42152,7	918,5	43071,2	2%
2	5,4	40900,1	311,0	41211,1	1%
4	5,4	39645,6	0,0	39645,6	0%
15	5,4	32904,1	0,0	32904,1	0%
30	5,4	24445,6	0,0	24445,6	0%
45	5,4	17073,9	0,0	17073,9	0%
60	5	10924,6	0,0	10924,6	0%
75	4	6106,6	0,0	6106,6	0%
90	4	2711,0	0,0	2711,0	0%
105	3	764,0	0,0	764,0	0%
125	3	0	0,0	0	0%

Fonte: Autor (2023)