



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Exame de Estado:

**Avaliação da Implementação De Uma Usina De
Energia Eólica Offshore**



Candidato:

Dagoberto de São Henriques Victorino João de Deus

Maputo, Outubro de 2024

Dedicatória

Este trabalho dedico a memória da minha mãe Sílvia Zical Pande

Agradecimentos

Primeiramente agradeço ao meu Pai Victorino João de Deus, ao meu filho Dexter, a minha esposa Suvânia, aos meus amigos Manuel, Júlio, Mário, Aurora, aos meus colegas de trabalho Arlindo, Hortência, Panganai, Paulina, Adélia e ao meu chefe Tobias Joaquim Dai pelo apoio moral e direcção.

Agradeço igualmente aos Docentes dr. Helder Marrenjo, dr^a. Adelaide Panguene, que me ajudaram com as minhas dúvidas, agradeço também ao dr. Issufo Abílio por me orientar com a organização do trabalho, bem como todos aqueles que de um jeito ou do outro participaram da elaboração do presente trabalho.

Declaração de Honra

Este trabalho foi realizado com base no material a que ao longo do mesmo se faz referência. As ideias originais nele, são da inteira responsabilidade do Candidato.

Maputo, Outubro de 2024

O Candidato

(Dagoberto de São Henriques Victorino João de Deus)

Lista de abreviatura

MW – MegaWatt

kW – KiloWatt

TWh – TeraWatt-hora

EE – Energia Eólica

m² – Metros quadrados

Kg/s – Quilogramas por segundo

Kg/m³ – Quilogramas por metro cúbico

TEEV – Turbinas Eólicas de Eixo Vertical

TEEH - Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal

Km – Quilômetro

m- Metros

GW- GigaWatt

SG- Siemens Gamesa

Cp – Coeficiente de Potência

Lista de figuras

Figura 1 Formação do vento (Fonte: https://www.brasildefatomg.com.br/2018/06/12/coluna-or-como-se-formam-os-ventos)	3
Figura 2 Brisa do Mar e Brisa terrestre (Fonte: https://br.freepik.com/vetores-gratis/infografico-de-ciencia-para-brisa-terrestre-e-maritima_6408010.htm).	4
Figura 3 Perfil vertical da velocidade do vento (Fonte: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Perfil-vertical-da-velocidade-do-vento-O-comprimento-da-rugosidade-Z-0-e-a_fig1_316178684).....	5
Figura 4 Físico James Blyth (Fonte: https://www.powerenergia.eu/lenergia-eolicain-10-curiosita/).....	6
Figura 5 Engenheiro Charles Brush (Fonte: https://windmillstech.com/the-worlds-first-automatic-wind-turbine/).....	6
Figura 6 Usina eólica (Fonte: Manual Modelagem e Simulação pág. 31)	7
Figura 7 Conversão de energia (Fonte: (Castro, 2009)).....	8
Figura 8 Limite de Betz. (Fonte: pinterest.pt)	9
Figura 9 Usina eólica offshore (Fonte: Programa de Pós-Graduação-Modelagem e Simulação de Unidades Eólicas Para Estudos Indicadores de Qualidade da Energia Elétrica- Artur Fernando Bonelii, 2010).....	10
Figura 10 Usina Vindeby. (Fonte: https://www.diariorenovables.com/2018/03/primer-parque-eolico-marino-del-mundo.html?m=1).	11
Figura 11 Turbina eólica de eixo vertical e turbina eólica de eixo horizontal. (Fonte: pinterest.pt)	12
Figura 12. Fundações: Estruturas treliçadas, base gravitacional e plataformas flutuantes. (Fonte: Adaptado da Pinterest.pt)	13
Figura 13. Tipos de fundação de turbinas eólicas offshore e sua profundidade adequada. (Fonte: Google.com).....	13
Figura 14 Localização da usina de energia offshore Hornsea One (Fonte: https://orsted.co.uk/offshore-wind-farm/hornsea1).....	16
Figura 15 Turbina Siemens Gamesa SG7.0-0154 (Fonte: Adaptado Gurutz Begona)	17

Lista de tabelas

Tabela 1 Escala de Beaufort para alturas de 10m. Fonte: (Organização Meteorológica Mundial, 2012)	5
Tabela 2 Velocidade do vento (m/s) da reação de Hornsea entre 2020 a 2023	16
Tabela 3 Dados técnicos da turbina Siemens Gamesa SG7.0-0154	18
Tabela 4 Impactos ambientais	18
Tabela 5 Dados meteorológicos, oceanográficos (Hornsea One).....	20
Tabela 6 Geotérmicos e geofísicos da usina.....	21

Lista de equações

Equação 1 Energia cinética do vento	8
Equação 2 Potência disponível no vento.....	9
Equação 3 Coeficiente de potência	10
Equação 4 Potência mecânica	10
Equação 5 velocidade média do vento	16

Resumo

Este trabalho analisa a viabilidade técnica e ambiental da implementação de usinas de energia eólica *offshore*, com foco na usina *offshore* Hornsea One, localizada no Mar do Norte. O estudo é fundamentado na crescente necessidade de alternativas às energias fósseis, conforme evidenciado pelo relatório "Limites do crescimento" do Club de Roma (1972), que alertava sobre a exaustão dos recursos naturais e suas consequências ambientais. A pesquisa explora como a energia eólica *offshore* pode contribuir para a diversificação da matriz energética, especialmente em países africanos, onde o crescimento da demanda energética requer soluções sustentáveis.

A metodologia empregada é exploratória e descritiva, baseada em revisão bibliográfica de artigos científicos e relatórios técnicos. Os dados sobre condições meteorológicas e geotécnicas da usina Hornsea One demonstram um ambiente favorável para a geração de energia, com velocidade de vento 12 m/s e uma estabilidade do solo adequada para instalação de turbinas. No entanto, a pesquisa também identificou desafios técnicos, como a instalação e manutenção em condições adversas, e desafios ambientais, incluindo impactos sobre a fauna marinha e a poluição sonora.

Os resultados indicam que, apesar dos desafios, a implementação de usinas eólicas *offshore* é uma opção viável que pode mitigar a dependência de combustíveis fósseis e reduzir a poluição ambiental. A pesquisa conclui com recomendações para o desenvolvimento de tecnologias inovadoras e para o engajamento das comunidades locais, garantindo uma transição energética que respeite o meio ambiente e promova a aceitação pública.

Palavras-chave: Energia eólica *offshore*, viabilidade técnica, impactos ambientais, sustentabilidade, Hornsea One.

Abstract

This work analyzes the technical and environmental feasibility of implementing offshore wind power plants, focusing on the Hornsea One offshore plant, located in the North Sea. The study is based on the growing need for alternatives to fossil fuels, as evidenced by the Club of Rome's "Limits to Growth" report (1972), which warned about the depletion of natural resources and its environmental consequences. The research explores how offshore wind power can contribute to the diversification of the energy matrix, especially in African countries, where growing energy demand requires sustainable solutions.

The methodology used is exploratory and descriptive, based on a literature review of scientific articles and technical reports. Data on meteorological and geotechnical conditions at Hornsea One demonstrate a favorable environment for power generation, with wind speeds of 12 m/s and soil stability suitable for turbine installation. However, the research also identified technical challenges, such as installation and maintenance in adverse conditions, and environmental challenges, including impacts on marine wildlife and noise pollution.

The results indicate that, despite the challenges, the implementation of offshore wind farms is a viable option that can mitigate dependence on fossil fuels and reduce environmental pollution. The research concludes with recommendations for the development of innovative technologies and the engagement of local communities, ensuring an energy transition that respects the environment and promotes public acceptance.

Keywords: Offshore wind energy, technical feasibility, environmental impacts, sustainability, Hornsea One.¹

¹ Texto traduzido por: www.onlinedoctranslator.com

Índice

Dedicatória	i
Agradecimentos	ii
Declaração de Honra	iii
Lista de abreviatura	iv
Lista de figuras	v
Lista de tabelas	vi
Lista de equações	vii
Resumo	viii
Abstact	ix
Capítulo 1 Introdução e Objectivos	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Justificativa e importância da pesquisa	2
1.3. Pergunta de pesquisa	2
1.4. Objectivos	2
1.4.1. Objectivo geral	2
1.4.2. Objectivos específicos.....	2
Capítulo 2 Revisão bibliográfica	3
2.1. O vento	3
2.1.1. Brisa Marítima e Brisa Terrestre	4
2.1.2. Relação entre altura e velocidade do vento	4
2.1.3. Escala de Beaufort.....	5
2.2. Evolução da produção e tecnologia da energia eólica.....	6
2.3. Usinas de energia eólica.....	7
2.3.1. Conversão da energia eólica.....	7
2.3.2. Tipos de usinas de energia eólica	10
2.3.2.1. Usina de energia eólica offshore	10
2.3.2.2. Turbinas.....	12
2.3.2.3. Fundações.....	12
Capítulo 3 Materiais e metodologia	15
3.1. Materiais.....	15
3.2. Metodologia	15
3.3. Fonte de dados.....	15
3.3.1. Dados técnicos	16
3.3.2. Dados ambientais	18

Capítulo 4 Resultados e Discussões	20
4.1. Dados meteorológicos e Oceanográficos	20
4.2. Dados geotécnicos e geofísicos	21
4.3.1. Análise da viabilidade técnica	21
4.3.2. Avaliação dos impactos ambientais	21
4.4. Propostas de mitigação	22
Capítulo 5 Considerações finais	23
Recomendações.....	23
Capítulo 6 Bibliografia	24

Capítulo 1 Introdução e Objectivos

Neste capítulo proceder-se-á à contextualização do trabalho, justificativa da sua pesquisa, importância do estudo, definição dos objectivos e pergunta de pesquisa.

1.1.Contextualização

Em 1972, um relatório publicado pelo Club de Roma¹ intitulado “Limites do crescimento”, abordou as consequências da exploração dos recursos naturais, incluindo os combustíveis fósseis, o relatório também alertava sobre a exaustão inerente dos recursos e os impactos ambientais associados, como a poluição e o aquecimento global. Por fim, o relatório recomendou que a sociedade reconsiderasse suas prioridades económicas para evitar um colapso ambiental e social

Desde então, tem-se falado muito sobre impactos ambientais, das indústrias de produção de energia eléctrica e mudanças climáticas. É importante referenciar que a forma como produzimos e usamos a energia eléctrica impacta directamente o meio ambiente terrestre e os seres que nela vivem. Com a mesma direcção, nos últimos anos os cientistas têm estudado meios de reduzir esses impactos, implementando medidas tecnológicas que ajudam a reduzir de forma significativa a emissão de poluentes para o meio ambiente terrestre, através de fontes limpas de energia, como o caso das energias renováveis.

Uma dessas alternativas limpas é a energia eólica *offshore*, que vem como uma das soluções para a geração de energia renovável, aproveitando os fortes ventos marítimos para produzir electricidade de forma sustentável.

¹ Constituído em 1968, composto por Cientistas, Industriais e Políticos

1.2. Justificativa e importância da pesquisa

O consumo de energia está a crescer com o passar dos anos, se este aumento continuar e não formos capazes de alimentar essa demanda será difícil fazer a transição das energias fósseis para as energias renováveis e isso irá resultar no agravamento da poluição ambiental. Como forma a suportar essa demanda por energia, é crucial que estudemos novas formas de energia, que sejam limpas e que não entrem em choque com a sociedade, o meio ambiente e as políticas governamentais. A implementação de uma usina de energia eólica *offshore* principalmente em países Africanos, é uma oportunidade promissora para diversificar a matriz energética, o que garante um desenvolvimento sustentável e reduz a poluição do meio ambiente terrestre. Através de uma metodologia de pesquisa robusta e o uso de tecnologias digitais é possível avaliar a viabilidade de projectos de energia eólica *offshore*. Este trabalho visa avaliar a possibilidade da implementação de uma usina de energia eólica *offshore* para atenuar a forte dependência em combustíveis fósseis.

1.3. Pergunta de pesquisa

- a) Quais são os principais desafios técnicos e ambientais na implementação de usinas eólicas *offshore*?

1.4. Objectivos

1.4.1. Objectivo geral

- Avaliar a viabilidade técnica e ambiental da implementação de uma usina de energia eólica *offshore*.

1.4.2. Objectivos específicos

- Estudar as tecnologias disponíveis para geração de energia eólica *offshore*;
- Avaliar os impactos técnicos e ambientais associados aos projectos de energia eólica *offshore*;
- Propor estratégias que possam ser implementadas para superar os obstáculos identificados.

Capítulo 2 Revisão bibliográfica

Este capítulo irá abordar a evolução da energia eólica *offshore*, definições, conceitos e bibliografias necessárias para entender a implementação das principais tecnologias que culminam com funcionamento de uma usina eólica *offshore*.

2.1. O vento

O vento é o movimento horizontal do ar relativamente a terra, causado pela distribuição desigual horizontal da pressão atmosférica, representando uma tentativa de restabelecer o equilíbrio da depressão (Pressão baixa) (Medonça & Bornia, 2020).

Os ventos são formados a partir da interacção entre a temperatura, a pressão atmosférica, e a rotação da Terra. Esses factores associados a geografia do local, determinam o comportamento e as características dos ventos em diferentes regiões (Akhmatov, 1988).

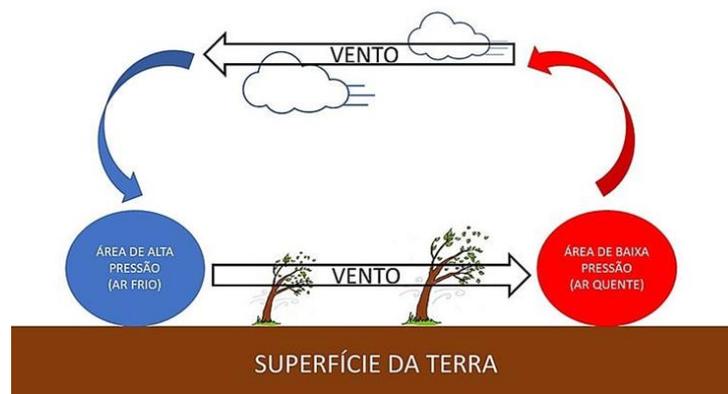


Figura 1 Formação do vento (Fonte: <https://www.brasildefatomg.com.br/2018/06/12/coluna-or-como-se-formam-os-ventos>)

Boyle (1996) sugere que o movimento do ar ocorre quando a diferença de pressão entre dois pontos da superfície, ou seja ela surge da diferença do peso do ar entre dois pontos da superfície. Pois o ar tende a se movimentar de uma zona de alta pressão para uma zona de baixa pressão atmosférica. A zona de alta pressão é uma área atmosférica onde a pressão do ar é maior e zona baixa é o contraste.

Há também outras formas de geração de ventos, muito importantes para a geração de energia eólica, as quais são denominadas secundárias e terciárias, como a brisa marítima e a brisa terrestre, que são formadas pela diferença do aquecimento da Terra em relação

ao Mar. As brisas marítima e terrestre são fenômenos atmosféricos que ocorrem devido às diferenças de temperatura entre a terra e o mar, influenciando a circulação do ar nas regiões costeiras (Custódio, 2009).

2.1.1. Brisa Marítima e Brisa Terrestre

A brisa marítima ocorre durante o dia. A terra aquece mais rápido do que o mar devido à sua menor capacidade térmica. Isso faz com que o ar sobre a terra se aqueça e suba, criando uma área de baixa pressão, o ar mais frio e de alta pressão do mar se move em direção à terra para preencher esse espaço, resultando na brisa marítima (Akhmatov, 1988).

A brisa terrestre ocorre à noite. A terra esfria mais rapidamente que o mar, que retém calor por mais tempo. Isso faz com que o ar sobre o mar seja mais quente e suba, criando uma área de baixa pressão sobre o mar. O ar mais frio e de alta pressão da terra se movem em direção ao mar, resultando na brisa terrestre (Akhmatov, 1988).

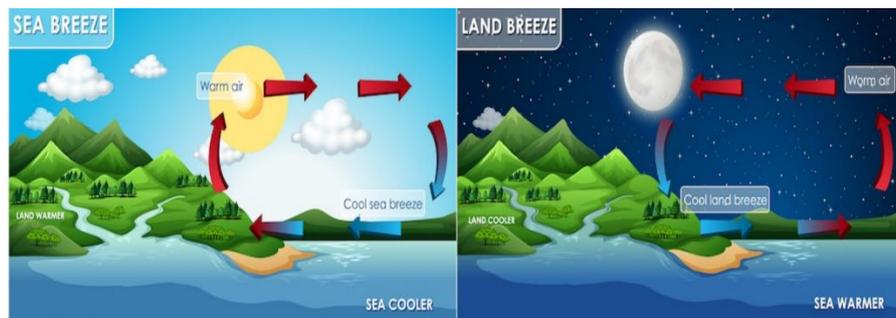


Figura 2 Brisa do Mar e Brisa terrestre (Fonte: https://br.freepik.com/vetores-gratis/infografico-de-ciencia-para-brisa-terrestre-e-maritima_6408010.htm).

A associação entre as Brisas está associada ao ciclo diário de aquecimento e resfriamento da terra e do mar. Durante o dia, a brisa marítima ajuda a refrescar as áreas costeiras, enquanto à noite, a brisa terrestre pode levar o ar mais frio da terra para o mar, influenciando o clima local e a circulação atmosférica (Boyle, 1996).

2.1.2. Relação entre altura e velocidade do vento

É importante entender essa relação, principalmente quando se trata de projectos de engenharia, física e aviação. A velocidade do vento tende a aumentar com a altura na atmosfera, isso deve-se a vários factores como Efeito de Fricção e Topografia (SFRG, 2016).

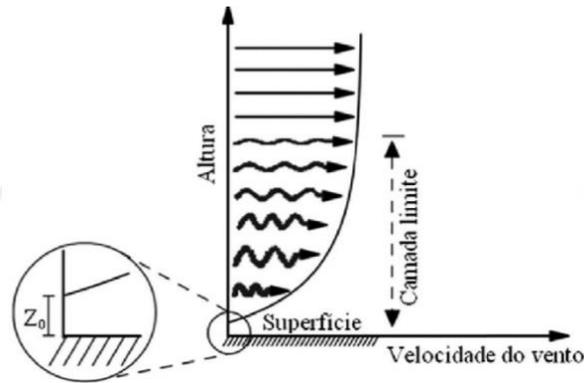


Figura 3 Perfil vertical da velocidade do vento (Fonte: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Perfil-vertical-da-velocidade-do-vento-O-comprimento-da-rugosidade-Z-0-e-a_fig1_316178684)

Como ilustra a figura, a velocidade do vento próximo a superfície é baixa comparada com alturas mais altas, isso porque o efeito fricção perto do solo terrestre contribui, juntamente com a topografia do local (montanhas e vales podem afectar significativamente a velocidade do vento) (SFRG, 2016).

2.1.3. Escala de Beaufort

A escala de Beaufort é uma escala empírica que classifica a intensidade dos ventos com base na sua velocidade e nos efeitos observáveis no mar e em Terra (Organização Meteorológica Mundial, 2012).

Tabela 1 Escala de Beaufort para alturas de 10m. Fonte: (Organização Meteorológica Mundial, 2012)

Velocidade do vento à altura de 10 metros da superfície do solo		Escala de Beaufort dos ventos	Classificação
[m/s]	[km/h]		
< 0,4	< 1	0	Calmo
0,4 – 1,8	1 – 5	1	Ar suave
1,8 – 3,6	6 – 11	2	Brisa suave
3,6 – 5,8	12 – 19	3	Brisa
5,8 – 8,5	20 – 28	4	Brisa moderada
8,5 – 11	29 – 38	5	Brisa fresca
11 – 14	39 – 49	6	Brisa forte
14 – 17	50 – 61	7	Próximo de temporal
17 – 21	62 – 74	8	Temporal
21 – 25	75 – 88	9	Temporal forte
25 – 29	89 – 102	10	Tempestade
29 – 34	103 – 117	11	Tempestade violenta
> 34	> 117	12	Furacão

Essa escala ajuda a determinar a velocidade do vento, o que ajuda muito na hora de escolher um local para instalar aerogeradores, para além disso a escala de Beaufort pode ser usada para prever o desempenho dos aerogeradores e garantir a segurança operacional (Organização Meteorológica Mundial, 2012).

2.2. Evolução da produção e tecnologia da energia eólica

Sua história começa em 1887, na Escócia quando o Físico James Blyth criou o primeiro moinho já registado capaz de gerar eletricidade. A estrutura possuía aproximadamente 10 metros de altura e era capaz de carregar acumuladores na sua casa de campo.

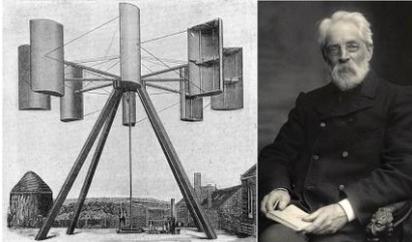


Figura 4 Físico James Blyth (Fonte: <https://www.powerenergia.eu/lenergia-eolicain-10-curiosita/>).

Já um ano mais tarde em 1888 o engenheiro Charles E. Brush, desenvolveu um moinho maior e com capacidade de gerar mais electricidade do que a do Blyth, o que leva algumas fontes históricas a darem-lhe os créditos pela descoberta da tecnologia. Desde então, cientistas e pesquisadores de várias nacionalidades desenvolveram estudos nesse campo, o que impulsionou a evolução dessa tecnologia eólica (Castro, 2009).

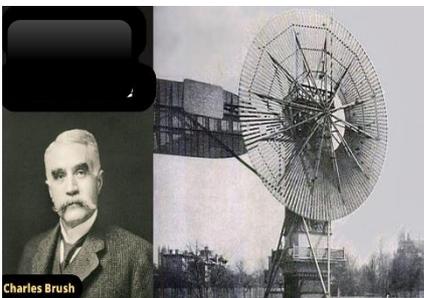


Figura 5 Engenheiro Charles Brush (Fonte: <https://windmillstech.com/the-worlds-first-automatic-wind-turbine/>).

Na década de 70 surge uma crescente demanda energética, porém com a Guerra do Yom Kippur² em 1973, os países árabes membros da OPEP³ impulsionaram um bloqueio no fornecimento de petróleo, o que resultou no aumento do preço de compra em 4 vezes o preço de compra. Já em 1978 desencadeia-se a Revolução Iraniana que culminou com a interrupção da produção do petróleo, o que levou a subida de preços novamente. Em meio

² Conhecida como a guerra de Outubro, Ocorreu de 6 a 26 de Outubro de 1973 entre o Israel e a coligação de países árabes (Lideradas por Egipto e Síria).

³ Organização dos Países Exportadores de Petróleo.

a crise dos petróleos, discutia-se também os impactos que os mesmos tinham ao meio ambiente, até que em 1972, um relatório publicado pelo Club de Roma intitulado “Limites do crescimento”, abordou as consequências da exploração dos recursos naturais, incluindo os combustíveis fósseis, o relatório também alertava sobre a exaustão inerente dos recursos e os impactos ambientais associados, como a poluição e o aquecimento global. Por fim, o relatório recomendou que a sociedade reconsiderasse suas prioridades económicas para evitar um colapso ambiental e social (Meadows, 2024).

Com os acontecimentos de 1972 e a crise do petróleo de 1973, os Estados Unidos embarcou na pesquisa e desenvolvimento da energia eólica. A evolução no mercado comercial de aplicações domésticas e agrícolas (1 e 25 kW) para aplicações de energia eólica interligadas (50 e 600 kW), sucedeu-se entre os anos de 1973 a 1986 (Kaldellis, 2011).

2.3. Usinas de energia eólica

Usinas de energia eólica, também chamadas de parques eólicos, são instalações que utilizam turbinas eólicas agrupadas para converter energia do vento em energia elétrica (Castro, 2009).



Figura 6 Usina eólica (Fonte: Manual Modelagem e Simulação pág. 31)

2.3.1. Conversão da energia eólica

A energia eólica (EE) é convertida em eletricidade por meio de turbinas eólicas que captam a força do vento e a transformam em energia mecânica e, posteriormente em energia elétrica (Custódio, 2009).

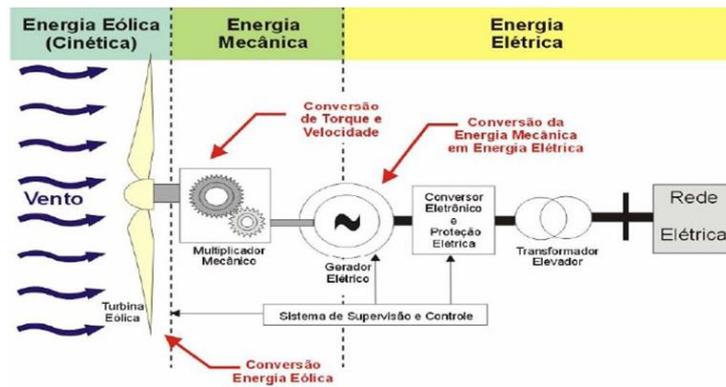


Figura 7 Conversão de energia (Fonte: (Castro, 2009))

Com é possível ver na figura 9, a energia cinética do vento que incide sobre as pás da turbina eólica, rotacionando o rotor que a converte em energia mecânica de rotação, fazendo com que as engrenagens girem por torque e o multiplica no multiplicador mecânico, transformando assim a energia cinética do vento em energia mecânica (Castro, 2009).

O eixo que está unido ao tudo do rotor se encarrega de receber a energia mecânica rotacional entregue pelo rotor, e de a transferir a um gerador elétrico que está conectado no outro extremo, que por sua vez é responsável por converter a energia mecânica em energia elétrica através da potência fornecida pelo rotor (Castro, 2009).

Equação 1 Energia cinética do vento

$$E_{cvento} = \frac{1}{2} \times m \times u^2$$

- E_{cvento} - Energia cinética do vento;
- m - Massa de ar em movimento;
- u - Velocidade instantânea do vento.

No ano de 1919, foi definido pelo físico alemão Albert Betz o que hoje é denominada Lei de Betz. O Limite de Betz, ou Lei de Betz, demonstra que ao passar pela turbina eólica, a velocidade do vento é diminuída pelo rotor, que por sua vez absorve a energia cinética sendo posteriormente transformada em energia mecânica necessária para provocar a rotação do rotor (Bunch & Hellemans, 2020).

Em se tratando da velocidade efetiva com que o vento passa pelo rotor, Betz provou que esta pode ser calculada como a média entre a velocidade que chega e a velocidade que sai do rotor. Demonstrou ainda que como ilustrado na Figura 10, no máximo 59,3% da

potência total existente em uma corrente de vento podem ser efetivamente aproveitados, este valor é chamado de Rendimento Limite de Betz, o qual indica o máximo rendimento que pode ser atingido por uma máquina eólica (Boyle, 1996).

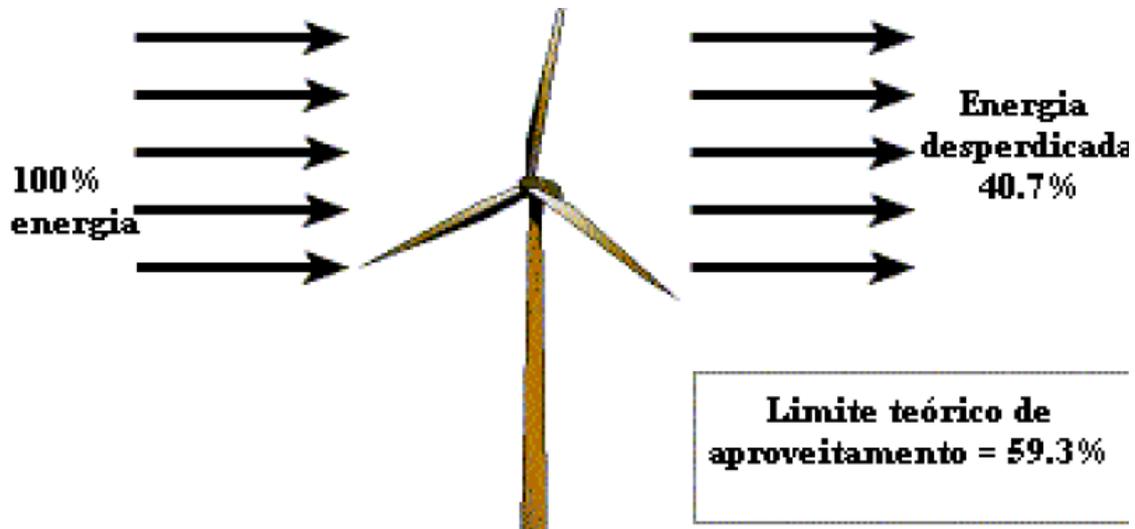


Figura 8 Limite de Betz. (Fonte: pinterest.pt)

Para Castro (2009) a energia disponível para uma turbina eólica é a energia cinética associada a uma coluna de ar que se desloca a uma velocidade uniforme e constante u (m/s). Na unidade de tempo, aquela coluna de ar ao atravessar a seção plana transversal A (m^2) do rotor da turbina e desloca uma massa de ar para ρAu (kg/s).

Equação 2 Potência disponível no vento

$$P_{disp} = \frac{1}{2}(\rho Au)u^2 = \frac{1}{2}\rho Au^3$$

- P_{disp} - É a potência do vento (dada em watts);
- ρ - É a densidade do ar (que é de aproximadamente 1.225 kg/m^3 ao nível do mar);
- A - É a área varrida pelas pás da turbina (dada em m^2);
- u - É a velocidade média do vento (dada em m/s).

A quantidade de potência disponível no vento que pode ser convertida em potência mecânica por uma turbina eólica é chamada de coeficiente de potência (c_p), normalmente utilizado para comparar a eficiência de diferentes turbinas eólicas (Castro, 2009).

Equação 3 Coeficiente de potência

$$C_p = \frac{P_{mec}}{P_{disp}}$$

Combinando a equação 2 e 3, temos:

Equação 4 Potência mecânica

$$P_{mec} = \frac{1}{2} C_p \times n \times \rho \times A \times u^3$$

- C_p - Coeficiente de potência;
- n - Limite de Betz.

2.3.2. Tipos de usinas de energia eólica

- Usina de energia eólica *onshore*;
- Usina de energia eólica *offshore*;
- Usina de energia eólica de sistema isolado;
- Usina de energia eólica de sistemas interligados;
- Usina de energia eólica híbrida.

2.3.2.1. Usina de energia eólica offshore

A usina de energia eólica *offshore* consiste na obtenção de energia proveniente do vento por meio de construção de parques eólicos ao longo da Costa marítima. Essa Tecnologia tem muitas vantagens comparado as usinas de energia eólica *onshore* (terrestre), como aumento da potência instalada, ruído e impacto visual (Mané, 2014).

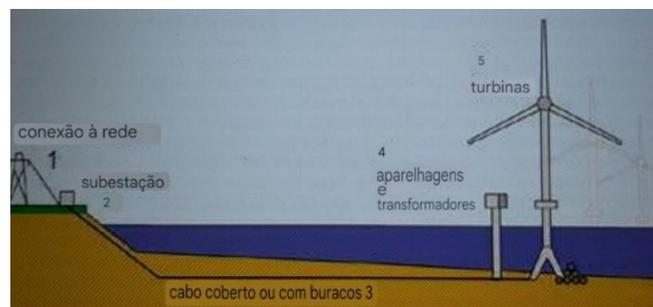


Figura 9 Usina eólica *offshore* (Fonte: Programa de Pós-Graduação-Modelagem e Simulação de Unidades Eólicas Para Estudos Indicadores de Qualidade da Energia Elétrica- Artur Fernando Bonelii, 2010).

As usinas de energia eólica *offshore* constituem em uma série de turbinas, transformadores, cabos de transmissão, recepção e uma subestação (normalmente em Terra) que recebe a energia elétrica produzida nas turbinas e a transmite para a rede (AZEVEDO, 2009).

A primeira instalação de turbinas eólicas *offshore* estabeleceu-se no ano de 1990, na Suécia, onde foi instalada uma única turbina a 350 m da costa. Essa turbina apresentava uma capacidade de 220 kW, e encontrava-se apoiada em uma estrutura tripé ancorada ao fundo do mar, a uma profundidade de 6 m (Esteban, 2011).

Já a primeira usina eólica *offshore*, foi construído em 1991 na Dinamarca, com o nome Vindeby, tendo sido desmantelado em 2017. A usina era composta por 11 aerogeradores de 450 kW, tinha uma capacidade de 4,95 MW, e localizava-se a 1,8 km da costa estando a 3m de profundidade (Bunch & Hellemans, 2020).



Figura 10 Usina Vindeby. (Fonte: <https://www.diariorenovables.com/2018/03/primer-parque-eolico-marino-del-mundo.html?m=1>).

Por sua vez, as turbinas sobre estruturas flutuantes podem ser instaladas mais distantes da costa, onde os ventos são mais fortes e constantes, o que aumenta a produtividade. As principais vantagens da energia eólica offshore em relação à onshore estão no maior tamanho e eficiência elétrica dos seus projetos. Como não demandam o uso de terra, os aerogeradores offshore podem ser bem maiores e potentes que suas versões costeiras. Além disso, eles também contam com a maior força e constância dos ventos marítimos, que não encontram barreiras, como os ventos que sopram em terra (Bunch & Hellemans, 2020).

2.3.2.2. Turbinas

As turbinas eólicas são classificadas por diversas características e podem ser subdivididas em dois grandes grupos baseados na direção de rotação do eixo das pás. São assim denominadas como Turbinas Eólicas de Eixo vertical (TEEV) e Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (TEEH) (Ritchie, Rosado, & Roser, 2020).

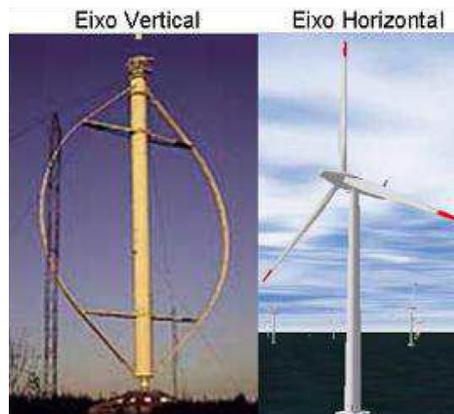


Figura 11 Turbina eólica de eixo vertical e turbina eólica de eixo horizontal. (Fonte: pinterest.pt)

As turbinas de eixo horizontal foram assim nomeadas devido ao seu eixo de rotação do rotor ser paralelo ao sol, o qual é montado no topo da torre. Os rotores de eixo horizontal são mais utilizados comercialmente, e grande parte das iniciativas internacionais em projetos de expansão de energia eólica está voltada para a sua utilização. O funcionamento dessas turbinas é baseado no princípio de sustentação do perfilar das pás, tendo assim que possuir mecanismos capazes de permitir que o disco varrido pelas pás esteja sempre em posição perpendicular ao vento (Mané, 2014).

2.3.2.3. Fundações

Para FILHO (2011) a maior diferença entre as usinas eólicas *offshore* e *onshore* no que diz respeito à instalação das turbinas são as fundações. No processo de instalação de torres com turbinas eólicas no mar devem ser considerados problemas voltados a sua estabilidade, resistência as correntes e à erosão.

Tratando-se de grandes profundidades, o custo e as características vibracionais de toda a instalação são características ainda mais significativas. Contudo, esta relação entre custo,

estabilidade e resistência faz das fundações segmento do projecto de instalação das usinas uma etapa de enorme relevância (Boyle, 1996)

Existem diversos tipos de estruturas de fundações disponíveis para a instalação de turbinas *offshore*, para tanto o processo de escolha da fundação adequada ao projecto envolve fatores relacionados principalmente a profundidade, e a natureza do fundo mar. de instalação e o aumento dos recursos necessários (Carvalho, 2017).

As estruturas de fundações são essencialmente de três tipos: As estruturas treliçadas compostas por tubos, as de base gravitacional de concreto como fundamentais de fundações e as plataformas flutuantes.

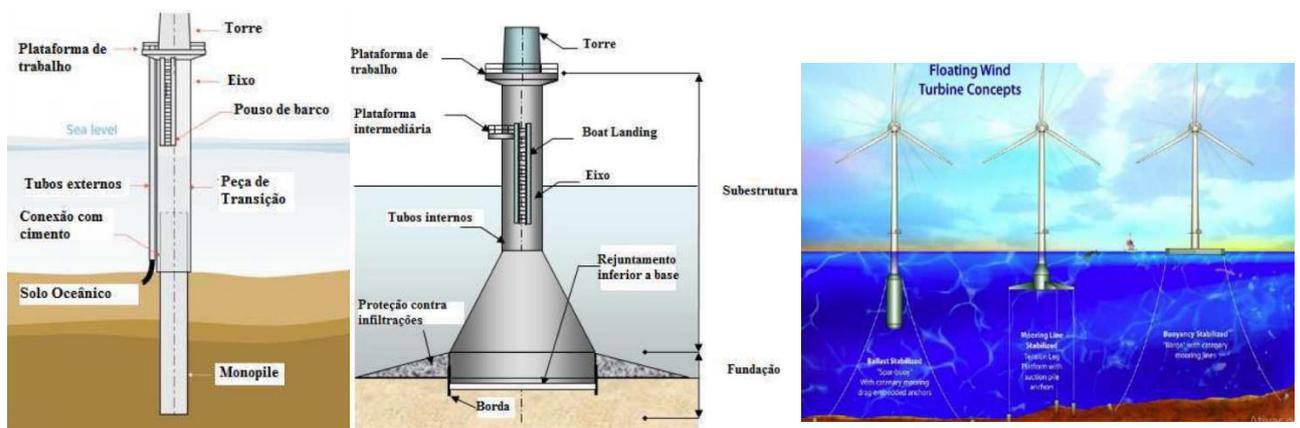


Figura 12. Fundações: Estruturas treliçadas, base gravitacional e plataformas flutuantes. (Fonte: Adaptado da Pinterest.pt)

Este último vem sendo muito estudado, seu projecto baseia-se na ideia de que a turbina é ligada ao fundo do mar por meio de cabos, funcionando de maneira que são ancoradas no fundo do oceano.



Figura 13. Tipos de fundação de turbinas eólicas *offshore* e sua profundidade adequada. (Fonte: Google.com)

A análise da composição e estabilidade do solo é vital para garantir que as turbinas sejam instaladas em uma base sólida. Solos instáveis podem levar a falhas nas estruturas e aumentar os custos de manutenção. Portanto, conhecer a geologia local ajuda a planejar a fundação das turbinas, garantindo segurança e eficiência a longo prazo (Carvalho, 2017).

- **Monopile**

- Solo Ideal: Solos arenosos e argilosos.

- Descrição: Consiste em um único cilindro de aço cravado no fundo do mar. É adequado para águas rasas (10 a 30 metros de profundidade) e é o tipo mais simples e econômico.

- **Fundações por Gravidade**

- Solo Ideal: Solos rochosos ou solos com alta capacidade de suporte.

- Descrição: Utiliza grandes estruturas de concreto que se apoiam no fundo do mar pelo seu próprio peso. São adequadas para águas rasas e médias.

- **Estacas de Sucção**

- Solo Ideal: Solos argilosos moles.

- Descrição: Consiste em grandes cilindros que são cravados no solo por sucção. São usadas em águas mais profundas e oferecem boa estabilidade.

- **Jaquetas (Jackets)**

- Solo Ideal: Solos arenosos e rochosos.

- Descrição: Estruturas de aço em forma de treliça que são fixadas ao fundo do mar com estacas. São usadas em águas médias a profundas (30 a 80 metros).

- **Fundações Flutuantes**

- Solo Ideal: Não dependem diretamente do tipo de solo, mas são ancoradas ao fundo do mar.

- Descrição: Plataformas flutuantes ancoradas por cabos ou correntes. São adequadas para águas muito profundas (acima de 80 metros).

Capítulo 3 Materiais e metodologia

Neste capítulo se fará a descrição dos materiais utilizados para a elaboração deste trabalho de pesquisa e também a metodologia usada para alcançar os objectivos pretendidos neste trabalho de investigação.

3.1. Materiais

- Artigos Científicos: Publicações sobre os desafios técnicos e ambientais da energia eólica *offshore*.
- Relatórios Técnicos: Documentos de organizações e agências governamentais sobre a implementação de usinas eólicas *offshore*.
- *Software* de Análise de Dados: Utilização de ferramentas como Excel 2013 para organizar e analisar os dados
- *Software* de Referências Bibliográficas: Utilização de ferramentas como *Mendeley* para gerenciar as referências bibliográficas.
- Para a digitação do trabalho foi usada um *laptop* Lenovo Yoga 2 pro, um modem de internet movitel para internet.

3.2. Metodologia

Este estudo é de natureza exploratória e descritiva, baseado em uma revisão bibliográfica de artigos científicos, relatórios técnicos e outras fontes secundárias de dados sobre a implementação de usinas eólicas *offshore*, também é composto por figuras, quadros e tabelas que auxiliam o leitor na análise do trabalho técnico usado com finalidade de alcançar os objectivos anteriormente propostos.

3.3. Fonte de dados

Os dados neste trabalho de investigação foram extraídos dos relatórios e revistas científicas desenvolvidos pelos autores (Duarte, et al., 2024,), (Ribeiro, 2019) e (Ørsted As, 2015) feitos na usina de Hornsea one, localizado no Mar Norte, a cerca de 120 km da Costa de Yorkshire (Reino Unido), construída em 2016, com capacidade técnica de 1.218 MW.

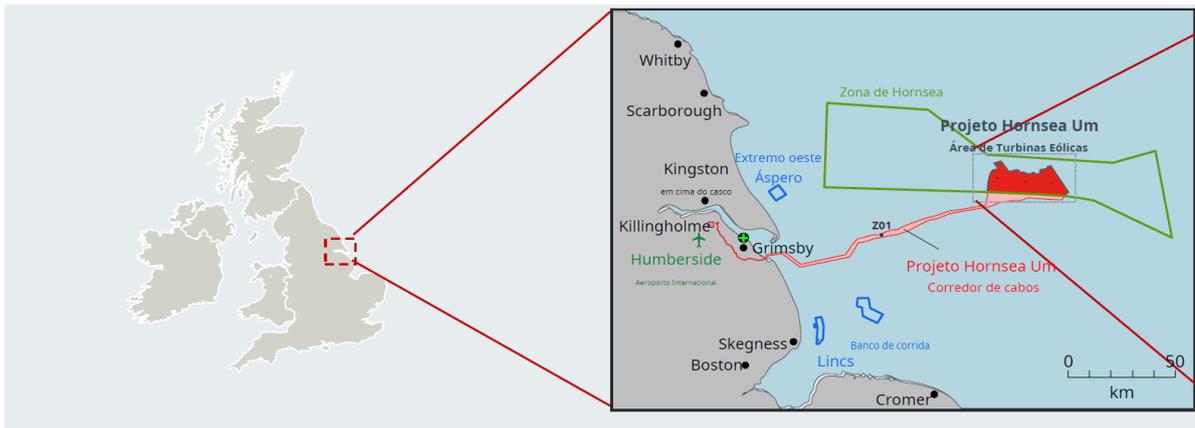


Figura 14 Localização da usina de energia *offshore* Hornsea One (Fonte: <https://orsted.co.uk/offshore-wind-farm/hornsea1>)

3.3.1. Dados técnicos

Os dados meteorológicos, oceanográficos, geotérmicos e geofísicos foram obtidos no relatório (Ørsted As, 2015) obtidos em: <https://orsted.co.uk/offshore-wind-farm/hornsea1> representada na tabela abaixo.

Dados meteorológicos e oceanográficos:

Tabela 2 Velocidade do vento (m/s) da região de Hornsea entre 2020 a 2023

Estação	Meses	2020	2021	2022	2023
Inverno	Janeiro	12,87	13,31	12,93	12,02
Inverno	Fevereiro	12	13,25	13,2	12,9
Primavera	Março	11,8	12,78	12,8	13,1
Primavera	Abril	11,6	12,44	12,7	12,24
Primavera	Maio	11,01	12,03	12,73	12,18
Verão	Junho	11,01	12	12,17	12,13
Verão	Julho	10,88	12	12,02	12,11
Verão	Agosto	10,76	11,81	12,1	12,06
Outono	Setembro	10,03	11,1	11,97	12,03
Outono	Outubro	9,89	10	11,78	12,21
Outono	Novembro	11,79	11,27	11,1	12,78
Inverno	Dezembro	13,99	12,44	11,5	13,56

A Velocidade média é determinada usando a equação:

Equação 5 velocidade média do vento

$$V_{mv} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n}$$

V_{mv} – Velocidade média do vento

n - número total de medições

- Direcção do vento – Predominantemente de Noroeste - 2020-2023;
- Altura das ondas - Média de 1 a 2 metros e de até 4 metros durante tempestade - 2020-2023;
- Frequência das ondas - Varia de 5 a 10 segundos - 2020-2023;
- Direcção das ondas – Predominantemente a Noroeste - 2020-2023;
- Variação da maré - Amplitude de até 2 metros - 2020-2023

Dados geotécnicos e geofísicos:

- a) Composição do solo marinho - Predominância de areia e silte, presença de argila em camadas mais profundas - 2020-2023.
- b) Estabilidade do solo - Compactação e resistência adequado para instalação de turbinas eólicas- 2020-2024.

A medição contínua da velocidade e direcção do vento é crucial para a eficiência das turbinas eólicas, pois ventos fortes e consistentes são ideais para maximizar a geração de energia. A análise em diferentes alturas permite entender como as condições do vento variam, o que é essencial para otimizar a instalação das turbinas.

A velocidade ideal para aproveitamento da energia eólica *offshore* é de 7 a 9 m/s (Dahmen, 2019)

Esses dados sobre a altura, frequência e direcção das ondas são fundamentais, pois influenciam a estrutura das turbinas e a sua resistência (Duarte, et al., 2024,).

A usina eólica *offshore* Hornsea One utiliza turbinas eólicas do tipo offshore da Siemens Gamesa SG 7.0-0154, com 7 MW de potencial nominal, diâmetro do rotor de 154 m, altura de 100m (Ørsted As, 2015).



Figura 15 Turbina Siemens Gamesa SG7.0-0154 (Fonte: Adaptado Gurutz Begona)

Tabela 3 Dados técnicos da turbina Siemens Gamesa SG7.0-0154

Parâmetro	Valor	Unidade
Diâmetro do rotor	154	m
Altura do hub	100	m
Coefficiente de potência	0.4	
Potência nominal por Turbina	7.000	kW
Número de turbinas	174	
Capacidade total	1.200,000	kW(1.2 GW)
Eficiência média	40-50%	

3.3.2. Dados ambientais

Segundo a pesquisa feita pela (Ribeiro, 2019), a usina eólica *offshore* hornsea, tem os seguintes impactos:

Tabela 4 Impactos ambientais

Categoria	Descrição	Nível de gravidade (%)
Impacto na fauna marinha	<ul style="list-style-type: none"> ↯ Alterações nos habitats aquáticos; ↯ Potencial risco de colisão para peixes e mamíferos marinhos; ↯ Alterações migrações de espécies. 	70%
Impactos na flora marinha	<ul style="list-style-type: none"> ↯ Mudanças na biodiversidade local; ↯ Possível mudança de espécie invasoras; ↯ Alteração na estrutura do ecossistema marinho. 	60%
Impacto em aves	<ul style="list-style-type: none"> ↯ Risco de colisão com turbinas; ↯ Alteração nos padrões de migração; ↯ Efeito na reprodução e alimentação. 	75%
Impacto no ecossistema local	<ul style="list-style-type: none"> ↯ Mudança na dinâmica ecológica; ↯ Alteração na qualidade da água 	70%
Ruído	<ul style="list-style-type: none"> ↯ Aumento do nível sonoro durante a construção e operação; ↯ Impacto sobre a fauna marinha sensível; 	55%

3.4. Desafios

Usando o caso da usina de energia eólica *offshore* hornsea One, pode-se notar que os principais desafios técnicos e ambientais enfrentados durante sua operação são:

Desafios técnicos

- Instalação e Manutenção:
 - Condições climáticas adversas podem dificultar a instalação e a manutenção das turbinas;
 - Necessidade de barcos especializados e equipamentos para acesso a locais remotos e em condições difíceis.
- Conexão à Rede Elétrica:
 - Desenvolvimento de infraestrutura para conectar a usina à rede elétrica existente;
 - Desafios na transmissão de energia a longas distâncias, incluindo perdas de energia.
- Tecnologia das Turbinas:
 - Necessidade de turbinas resistentes à corrosão e danos causados por mares agitados;
 - Desenvolvimento contínuo de tecnologias para aumentar a eficiência e a capacidade das turbinas.
- Monitoramento e Controle:
 - Implementação de sistemas de monitoramento em tempo real para garantir a operação eficiente;
 - Desafios na previsão de produção de energia devido a variabilidade do vento.

Desafios ambientais

- Impacto na Fauna e Flora Marinha:
 - A construção e operação podem afetar habitats marinhos, incluindo áreas de reprodução de espécies.
- Ruído e Poluição:
 - Ruído gerado durante a construção e operação pode afetar a fauna local.
 - Possível poluição causada por derramamentos de óleo ou outros materiais durante a instalação.
- Mudanças nos Ecossistemas:
 - Alterações nas correntes marítimas e sedimentação podem impactar ecossistemas locais.

Capítulo 4 Resultados e Discussões

Este capítulo abordará os resultados obtidos da avaliação da implementação da energia eólica *offshore*, olhando para os dados os desafios técnicos e ambientais identificados,

4.1. Dados meteorológicos e Oceanográficos

Os dados colectados da usina Hornsea One, localizada no mar do Norte demonstram condições favoráveis para geração de energia eólica *offshore*.

Tabela 5 Dados meteorológicos, oceanográficos (Hornsea One).

Dados meteorológicos e oceanográficos			
a	Direcção do vento	Predominantemente de Noroeste	2020-2023
b	Altura das ondas	Média de 1 a 2 metros de até 4 metros durante a tempestade	2020-2023
c	Frequência das ondas	Varia de 5 a 10 segundos	2020-2023
d	Direcção das ondas	Predominantemente de Noroeste	2020-2023
e	Variacção da maré	Amplitude de até 2 metros	2020-2023



Determinando a velocidade média da velocidade:

$$V_{mv} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} = \frac{11,5m/s + 12,0m/s + 12,3m/s + 12,4m/s}{4} = 12,05m/s \approx 12m/s$$

4.2. Dados geotécnicos e geofísicos

A composição geotécnica do solo marinho indica que a composição e estabilidade do solo são adequados para a instalação de turbinas eólicas. A tabela abaixo detalha esses dados:

Tabela 6 Geotécnicos e geofísicos da usina

Dados geotécnicos e geofísicos			
a	Composição do solo marinho	Predominância de areia e silte, presença de argila em camadas mais profundas	2020-2023
b	Estabilidade do solo	Compactação e resistência adequado para instalação de turbinas eólicas	2020-2023

4.3. Discussões

4.3.1. Análise da viabilidade técnica

Os dados meteorológicos mostram que a velocidade média do vento na usina Hornsea One varia de 12 m/s, o que é considerado ideal para a operação eficiente das turbinas eólicas. O estudo de Duarte, et al. (2024) destaca que a análise em diferentes alturas permite entender como as condições do vento variam, o que é essencial para otimizar a instalação das turbinas. A direção do vento a Noroeste favorece a captação do vento pelas turbinas facilitando a geração de energia e evitando as turbulências por efeito esteira sobre as turbinas subsequentes.

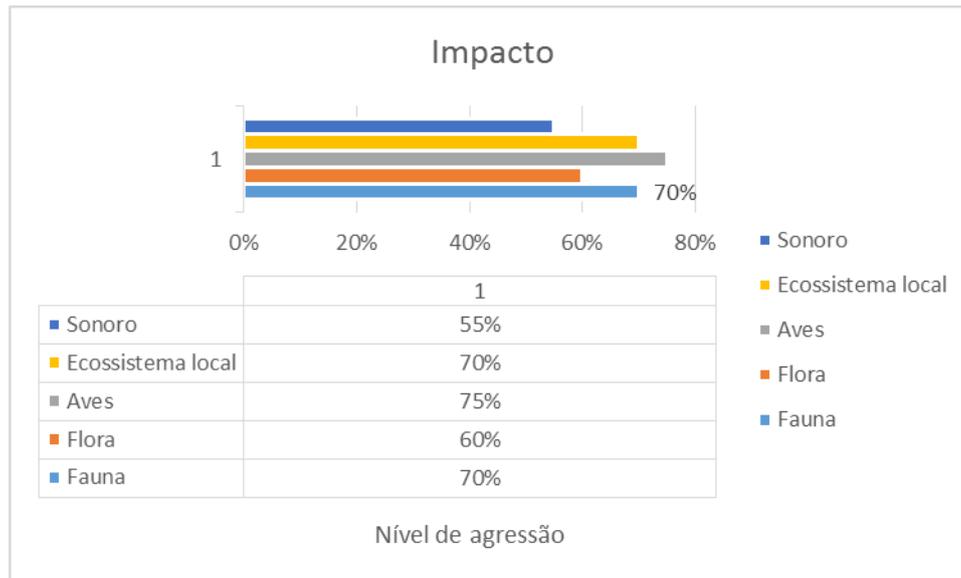
Entretanto, a instalação e manutenção das turbinas em ambientes marinhos são desafiadoras, pois as adversidades climáticas podem afetar a acessibilidade e a segurança, o que exige a utilização de barcos especiais e equipamento adequado. Este aspecto deve ser cuidadosamente planejado, visto que a eficiência das operações dependem da manutenção regular e da integridade estrutural das turbinas.

4.3.2. Avaliação dos impactos ambientais

Os impactos identificados na população de fauna e flora marinha são significativas. O risco de colisão dessas aves com as turbinas representa uma ameaça real conforme indicado pelo nível de gravidade de 75% associado a este impacto. Estudos anteriores

também sugerem que as usinas eólicas podem alterar padrões migratórios, o que pode ter consequências a longo prazo para a biodiversidade local (Ribeiro, 2019).

A mudança na qualidade da água e a dinâmica ecológica, com um nível de gravidade de 70%, apontam para a necessidade de um monitoramento rigoroso durante e após a construção da usina. A poluição sonora, com um impacto de 55% pode afetar a fauna sensível ao ruído, evidenciando a necessidade de estratégias mitigatórias.



4.4. Propostas de mitigação

Para mitigar os desafios identificados, a pesquisa sugere algumas estratégias:

- **Tecnologias de Turbinas:** Investir em turbinas com resistência a corrosão e capacidade de adaptação a condições adversas pode aumentar a longevidade e eficiência das operações.
- **Monitoramento e controle:** A implementação de sistemas de monitoramento em tempo real para a produção de energia e a saúde do ecossistema é vital. Isso permitirá intervenções rápidas em caso de variações significativas nos padrões de ventos ou impactos ambientais.
- **Engajamento a comunidade circunvizinha:** É essencial promover um diálogo aberto com a comunidade local para abordar preocupações sobre impactos ambientais e visuais. O envolvimento da comunidade pode aumentar a aceitação pública e apoiar a viabilidade do projecto.

Capítulo 5 Considerações finais

A avaliação da implementação de uma usina de energia eólica *offshore*, com foco na usina Hornsea One, revelou resultados significativos que atendem ao objectivo geral de analisar a viabilidade técnica e ambiental desse tipo de projecto. A pesquisa contemplou tanto dados meteorológicos e oceanográficos quanto informações geotécnicas e geofísicas, que são cruciais para a compreensão das condições adequadas para a geração de energia eólica em ambientes marinhos.

Os dados meteorológicos indicaram que a velocidade do vento na usina Hornsea One varia entre 6 a 12 m/s, com uma direcção predominantemente a noroeste. Essas condições são ideais para a operação de turbinas eólicas, potencializando a eficiência da geração de energia. Além disso, as informações sobre a altura das ondas, que variaram de 1 a 2 metros reforçam a viabilidade operacional da usina. A estabilidade do solo foi classificada como adequada, o que é essencial para a instalação segura das turbinas eólicas.

A pesquisa também abordou os objectivos específicos, como o estudo das tecnologias disponíveis para geração de energia eólica offshore e a avaliação dos impactos associados. Os resultados apontaram a necessidade de considerar os desafios técnicos e ambientais, como a instalação e manutenção das turbinas em condições adversas e os impactos sobre a fauna e flora marinha. A identificação desses desafios é crucial para o desenvolvimento de estratégias mitigadoras que assegurem a sustentabilidade do projecto.

Em suma, a pesquisa demonstra que a implementação de usinas de energia eólica *offshore*, como a Hornsea One, é viável e pode contribuir significativamente para a diversificação da matriz energética em países como Moçambique.

Recomendações

Para estudos futuros incluem a exploração de tecnologias inovadoras que minimizem os impactos ambientais, e engajamento com comunidades locais para garantir a aceitação pública dos projetos.

Essa abordagem não só ampliará a capacidade de geração de energia renovável, mas também promoverá um desenvolvimento sustentável e responsável.

Capítulo 6 Bibliografia

- Akhmatov, V. (1988). *Solar Dynamics Wind*. Louisiana.
- Anthony, L., Green, R., Williams, T., Lantz, E., Beiter, P., Pérez, P., & Baranowski, R. (2022). *Offshore Wind Energy Technical Potential For Contiguous United States*. NREL.
- AZEVEDO, C. (2009). *Um Panorama da Indústria de Bens*.
- Boyle, G. (1996). *Renewable energy: Power for a Sustainable Future*. Oxford University Press.
- Bunch, B., & Hellemans, A. (2020). *The History of Science And Technology*. Boston: Houghton Mifflin Company.
- Carvalho, I. F. (2017). Estruturas e fundações para parques eólicos offshore. *Ciybrapa*.
- Castro, R. M. (2009). *Energias Renováveis e Produção Descentralizada Introdução à Energia Eólica*. Lisboa: DEEC / Área Científica de Energia.
- Custódio, R. d. (2009). *Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica*. Rio de Janeiro: Eletrobrás.
- Duarte, C. G., Dibo, A., Gay, J. S., Denadai, M. R., Turra, A., & Sánchez, L. E. (2024,). *Challenges for impact assessment in Offshore Wind Energy Development*. iaia24.
- Dutra, R. M., & Szklo, A. S. (2006). *A energia eólica no Brasil: Proinfa e o novo modelo do sector elétrico*.
- Esteban, D. (2011). Why offshore wind energy?
- Kaldellis, D. Z. (2011). *The wind energy (r)evolution: A short review of a long history*. Renewable Energy.
- Mané, A. J. (2014). Estruturas Metálicas Para Suporte de Turbinas Eólicas Offshore. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)*. Coimbra: Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Meadows, D. H. (29 de 09 de 2024). Fonte: Clubofrome: <https://www.clubofrome.org/publication/the-limits-to-growth/>
- Medonça, A. K., & Bornia, A. C. (2020). *Energia Eólica Aerotransportada: Uma revisão da Tecnologia*.
- Musial, W., Hammond, R., Mulas, D., & Duffy, H. (2024). *Offshore Wind Market Report: 2024*. NREL.
- Neves, D. (2008). *Caracterização dos Ventos e Trovoadas Junto aos Aeroportos de Maputo de Quelimane*.
- Organização Metereológica Mundial. (2012). *Manual on Marine Metereological Services: Volume I*. Global Aspect.

- Ørsted As. (2015). *Hornsea one – Offshore wind Farm* .
- Our World Data. (2024). *Global Primary Energy Consumption By Source*.
- Ribeiro, A. F. (2019). *Avaliação do impacto da geração de energia eólica offshore no Reino Unido*. Coimbra.
- Ritchie, H., Rosado, P., & Roser, M. (2020). Energy Production and Consumption. *Our World Data*.
- SFRG. (2016). *Caracterização do Regime de Ventos no Piauí para Aproveitamento de Energia Eólica*.
- Vasconcelos, R. M. (2019). *Complexos Eólicas Offshore: Estudo Sobre Avaliação de Impactos*. São Paulo.