



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO  
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

POLLIANY ALVES DE LIMA

Desafios e Impasses para Consolidação da Geração Eólica *Offshore* na Matriz  
Energética Brasileira

Cabo de Santo Agostinho – PE

2023

POLLIANY ALVES DE LIMA

Desafios e Impasses para Consolidação da Geração Eólica *Offshore* na Matriz  
Energética Brasileira

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Denis Keuton Alves

Cabo de Santo Agostinho – PE

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Sistema Integrado de Bibliotecas  
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- L732d Lima, Polliany Alves de  
Desafios e impasses para consolidação da geração eólica offshore na matriz energética brasileira /  
Polliany Alves de Lima. - 2023.  
84 f. : il.
- Orientador: Denis Keuton Alves.  
Inclui referências.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco,  
Bacharelado em Engenharia Elétrica, Cabo de Santo Agostinho, 2023.
1. energia eólica. 2. energia eólica onshore. 3. energia eólica offshore. 4. empreendimento eólico. I.  
Alves, Denis Keuton, orient. II. Título

CDD 621.3

---


POLLIANY ALVES DE LIMA

Desafios e Impasses para Consolidação da Geração Eólica *Offshore* na Matriz  
Energética Brasileira

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.


Aprovada em: 02/05/2023

Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente  
 DENIS KEUTON ALVES  
Data: 18/05/2023 16:20:13-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. Dr. Denis Keuton Alves  
Orientador

Documento assinado digitalmente  
 ANA VITORIA DE ALMEIDA MACEDO  
Data: 21/05/2023 16:07:36-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Ana Vitória de Almeida Macêdo  
Examinador Interno

Documento assinado digitalmente  
 FERNANDO GONCALVES DE ALMEIDA NETO  
Data: 18/05/2023 17:04:42-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Fernando Gonçalves de Almeida Neto  
Examinador Interno

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, autor e razão da minha vida, que foi sustento e conforto nos momentos mais difíceis. Entre obstáculos e vitórias, Ele foi auxílio presente em cada detalhe.

À minha família, pelo apoio e incentivo durante esses árduos anos de graduação. Ensinaram-me a ser forte e perseverante diante das adversidades da vida e a acreditar que sou capaz de atingir meus sonhos e objetivos.

Ao meu noivo, Kevin Mendes, pelo apoio e zelo dedicados a mim. Gratidão por estar ao meu lado e ser minha referência de resiliência e profissionalismo.

Aos meus amigos da engenharia elétrica, especialmente Maria Eduarda Albuquerque, que me auxiliaram durante toda a graduação.

Ao Prof<sup>o</sup> Dr. Denis Keuton Alves, por ser solícito durante todo o desenvolvimento desse trabalho e por me orientar com excelente maestria. Serei eternamente grata por acreditar em mim, me incentivar e por tornar esse processo muito mais leve.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que eu chegasse até aqui.

*Nada te perturbe, nada te espante, tudo passa!  
Só Deus não passa.  
A paciência, por fim, tudo alcança.  
Quem a Deus tem, nada lhe falta, pois só Deus basta.  
Santa Teresa D' Avila*

## RESUMO

O aumento da demanda energética associada à preocupação ambiental serviu para impulsionar a busca por fontes alternativas de energia. No Brasil, a geração eólica *onshore* já está consolidada e tem se mostrado eficiente para complementar o fornecimento de energia sobretudo nos períodos secos, quando os níveis dos reservatórios das hidrelétricas estão baixos. Uma vez explorado o potencial do recurso eólico *onshore*, órgãos ambientais em conjunto o setor energético brasileiro tem se unido para melhor averiguar o potencial eólico marinho brasileiro. Embora já se tenha comprovado que o potencial de geração de energia eólica *offshore* é superior ao apresentado na geração eólica *onshore*, o Brasil ainda não possui nenhum empreendimento eólico instalado em ambiente marinho. Dessa forma, este trabalho busca desbravar quais os principais desafios e impasses que a geração eólica *offshore* brasileira deverá enfrentar para que sejam instaladas as primeiras turbinas no mar. Para tanto, serão identificadas as áreas com os maiores potenciais de geração de energia eólica *offshore*, as principais estruturas que compõem os parques eólicos em ambiente marinho, os impactos atrelados à tecnologia *offshore* e o modo como os países europeus conseguiram contornar os obstáculos até tornarem-se as atuais referências em geração eólica no mar.

Palavras-chave: energia eólica; energia eólica *onshore*; energia eólica *offshore*; empreendimento eólico.

## **ABSTRACT**

The increase in energy demand and its environmental concerns have increased the search for alternative energy sources. In Brazil, onshore wind generation is already consolidated and has proven efficient to complement the energy supply, especially in dry periods, when hydroelectric reservoir levels are low. Once the potential of the onshore wind resource has been exploited, environmental agencies along with the Brazilian energy sector must come together to better investigate the Brazilian marine wind potential. Although it has been proven that the potential of offshore wind power generation is higher than that presented in onshore wind generation, Brazil does not yet have any wind projects installed in the marine environment. Thus, this work seeks to unravel the main challenges and impediments that the Brazilian offshore wind generation will have to face to install the first turbines at the sea. For this end goal, the areas with the greatest potential for offshore wind power generation will be identified, the main structures that make up wind farms in the marine environment, the impacts linked to offshore technology and how European countries have managed to circumvent the obstacles shall be used as current references in offshore wind generation.

Keywords: wind energy; onshore wind energy; offshore wind energy; wind farm.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Esquema da composição da matriz energética mundial .....	22
Figura 2: Composição da matriz energética brasileira .....	23
Figura 3: Formação dos ventos devido a movimentação das massas de ar .....	25
Figura 4: Turbinas de eixo horizontal e vertical .....	26
Figura 5: Principais componentes de um aerogerador .....	27
Figura 6: Curva da potência das turbinas eólicas.....	28
Figura 7: Zona Econômica Exclusiva brasileira, Mar Territorial e Plataforma.....	37
Figura 8: Mapa do potencial eólico <i>offshore</i> brasileiro .....	41
Figura 9: Velocidade do vento a 100 m de altura .....	42
Figura 10: Parque Vindeby <i>Offshore</i> Wind Farm, localizado na Dinamarca.....	43
Figura 11: Potência eólica <i>offshore</i> instalada nos países europeus em 2017 .....	44
Figura 12: Evolução dos diâmetros das turbinas <i>offshore</i> .....	46
Figura 13: Espaçamento entre as turbinas.....	47
Figura 14: Fundações Fixas: (a) Monopilar, (b) Tripod, (c) Jaqueta, (d) Base de Gravidade.....	50
Figura 15: Fundação tripile.....	50
Figura 16: Fundações Flutuantes: (a) Boia do tipo Spar , (b) TLP, (c) Barge .....	52
Figura 17: Estrutura <i>offshore</i> de acordo com a profundidade .....	52
Figura 18: Sistema de transmissão por corrente alternada .....	54
Figura 19: Empreendimento eólico <i>offshore</i> utilizando Sistema de Transmissão HVDC - LCC .....	56
Figura 20: Empreendimento eólico <i>offshore</i> utilizando Sistema de Transmissão HVDC-VSC.....	58
Figura 21: Etapas do licenciamento ambiental no Brasil.....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estudos estimativos do potencial energético <i>offshore</i> brasileiro e as respectivas exclusões adotadas.....	39
Tabela 2: Características dos 10 primeiros parques eólicos <i>offshore</i> no mundo.....	43
Tabela 3: Faixa de frequência de percepção sonora para diferentes tipos de espécies .....	60

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAE - Avaliação Ambiental Estratégica

ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica

AFMHA - Agência Federal Marítima e Hidrográfica da Alemanha

AIA - Análise de Impacto Ambiental

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

BRAMS - *Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System*

CAPEX - *Capital Expendure*

CBIE - Centro Brasileiro de Infraestrutura

CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CNPE - Conselho Nacional de Política Energética

CNUDM - Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar

CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

DEA - *Danish Energy Agency*

DNA - Ácido Desoxirribonucleico

ECMWF - *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*

EIA - Estudo de Impacto Ambiental

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

ESMAP - *Energy Sector Management Assistance Program*

FCA - Ficha de Caracterização de Atividade

FCFS - *First Come, First Served*

FCP - Fundação Cultural Palmares

FUNAI - Fundação Nacional do Índio

GOOS - *Global Ocean Observation System*

GPS - *Global Positioning System*

GWA - *Global Wind Atlas*

GWEC - *Global Wind Energy Council*

HVAC - *High Voltage Alternating Current Transmission*

HVDC - *High Voltage Direct Current Transmission*

HVDC-LCC - *High Voltage Direct Current Transmission with Line Conventional*

*Commuted*

HVDC-VSC - *High Voltage Direct Current Transmission with Voltage Source Converter*

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

IEA - Instituto de Economia Agrícola

IGBT - *Insulated Gate Bipolar Transistor*

IPHAN- Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional

IRENA - Agência Internacional de Energia Renovável

LI – Licença de Instalação

LIDAR - *Light Detection and Ranging*

LO - Licença de Operação

LP - Licença Prévia

MMO - *Marine Management Organization*

MPS - *Marine Policy Statement*

OCEATLAN - Aliança Regional para Oceanografia no Atlântico Sudoeste Superior e Tropical

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

OPEX - *Operating Expenditure*

PIRATA - *Prediction and research Moored Array in the Tropical Atlantic*

PNBOIA - Programa Nacional de Boias

PWM - *Pulse Width Modulation*

RAMS - *Regional Atmospheric Modeling System*

RIMA - Relatório de Impacto Ambiental

SE – Subestação

SIN - Sistema Interligado Nacional

SODAR - *Sonic Detection and Ranging*

STATCOM - *Static Synchronous Compensator*

SVS/MS - Secretaria de Vigilância em Saúde do Ministério da Saúde

TLP - *Tension Leg Platform*

TR - Termo de Referência

USP - Universidade de São Paulo

XLPE - Polietileno Reticulado

ZEE - Zona Econômica Exclusiva

ZER - Zona de Energia Renovável

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
1.1	IMPORTÂNCIA DO TEMA.....	16
1.2	MOTIVAÇÃO .....	17
1.3	OBJETIVO GERAL.....	19
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	19
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	21
2.1	A MATRIZ ENERGÉTICA.....	21
2.1.1	<b>A matriz energética mundial</b> .....	21
2.1.2	<b>A matriz energética brasileira</b> .....	22
<b>3</b>	<b>A GERAÇÃO EÓLICA ONSHORE</b> .....	24
3.1	OS VENTOS.....	24
3.2	PRINCIPAIS COMPONENTES DA GERAÇÃO EÓLICA ONSHORE .....	25
3.3	VANTAGENS E DESVANTAGENS DA GERAÇÃO EÓLICA ONSHORE .....	28
3.4	POTENCIAL EÓLICO ONSHORE BRASILEIRO <i>VERSUS</i> POTENCIAL EÓLICO ONSHORE MUNDIAL .....	30
<b>4</b>	<b>A GERAÇÃO EÓLICA OFFSHORE</b> .....	31
4.1	O RECURSO EÓLICO OFFSHORE.....	31
4.1.1	<b>Formas de medição do recurso eólico</b> .....	31
4.1.2	<b>O recurso eólico offshore brasileiro</b> .....	35
4.2	POTENCIAL EÓLICO OFFSHORE BRASILEIRO.....	37
4.2.1	<b>Aspecto teórico, técnico e ambiental do potencial eólico offshore</b> .....	37
4.2.2	<b>Áreas brasileiras com maior potencial eólico offshore</b> .....	38
4.3	POTENCIAL EÓLICO OFFSHORE MUNDIAL .....	42
<b>5</b>	<b>ASPECTOS TECNOLÓGICOS DA GERAÇÃO EÓLICA OFFSHORE</b> .....	46
5.1	A TURBINA EÓLICA OFFSHORE .....	46
5.1.1	<b>O Efeito Esteira</b> .....	47
5.2	FUNDAÇÕES .....	48
5.2.1	<b>Fundações fixas</b> .....	48
5.2.2	<b>Fundações flutuantes</b> .....	51
5.3	CONEXÃO DA GERAÇÃO EÓLICA OFFSHORE AO SISTEMA ELÉTRICO .....	53
5.3.1	<b>Sistema de Transmissão em Alta Tensão em Corrente Alternada</b> .....	53

5.3.2	Sistema de Transmissão em Alta Tensão em Corrente Contínua .....	54
6	<b>IMPACTOS DA GERAÇÃO EÓLICA <i>OFFSHORE</i></b> .....	59
6.1	IMPACTO AMBIENTAL.....	59
6.1.1	<b>Ruídos</b> .....	59
6.1.2	<b>Campo eletromagnético</b> .....	60
6.1.3	<b>Impacto na fauna e na flora marinha</b> .....	61
6.2	IMPACTO SOCIAL .....	61
6.3	IMPACTO ECONÔMICO .....	62
7	<b>NORMAS E REGULAMENTAÇÕES DO SETOR EÓLICO <i>OFFSHORE</i></b> .....	64
7.1	PAÍSES EUROPEUS.....	64
7.1.1	<b>Dinamarca</b> .....	65
7.1.2	<b>Reino Unido</b> .....	68
7.1.3	<b>Alemanha</b> .....	70
7.2	BRASIL.....	73
8	<b>DESAFIOS E IMPASSES PARA IMPLANTAÇÃO DA GERAÇÃO EÓLICA <i>OFFSHORE</i> NO BRASIL</b> .....	74
8.1	LICENCIAMENTO AMBIENTAL DO SETOR EÓLICO <i>OFFSHORE</i> <i>BRASILEIRO</i> .....	74
8.2	CUSTOS ATRELADOS À GERAÇÃO EÓLICA <i>OFFSHORE</i> .....	76
9	<b>CONCLUSÃO</b> .....	79
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	81

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

A crise do petróleo ocorrida na década de 1970 despertou nas principais potências mundiais o interesse pela busca de fontes alternativas de energia. De acordo com Carvalho (2017), toda essa “corrida” aconteceu com o intuito de minimizar a importação da energia e garantir um fornecimento energético contínuo. Além disso, a emissão de gases provocada pelas fontes fósseis de energia também serviram para fortalecer a ideia de que era preciso aprofundar os estudos que viabilizassem a implantação das energias renováveis.

Com o passar do tempo, as ideias de desenvolvimento sustentável ganharam força e levaram os representantes das maiores potências mundiais à realização das conferências de Estocolmo (em 1972), Rio + 92 (em 1992), Rio +10 (em 2002), Rio +20 (em 2012) e o Acordo de Paris (em 2015). Com isso, a tendência mundial do crescimento da oferta de energia elétrica por meio de fontes renováveis intermitentes, como eólica e solar, é resultado não só de políticas governamentais de incentivo, como também do aumento da competitividade dessas tecnologias (PAZ, 2020).

Dentre várias fontes alternativas de energia, está a energia eólica. Esta é gerada por meio da conversão da energia cinética dos ventos em energia mecânica, que aciona as pás do rotor, de modo que este esforço é convertido em energia elétrica (MARINHO, 2020). A energia elétrica advinda de fonte eólica pode ser obtida por meio de parques eólicos situados em terra (*onshore*) ou no mar (*offshore*). Os empreendimentos *onshore* já encontram-se consagrados no mercado energético e embora o investimento nos *offshore* seja algo relativamente novo, este tem apresentado considerável crescimento nos últimos anos em consequência dos avanços tecnológicos, da minimização de custos e também por vencer obstáculos encontrados na geração *onshore*, tais como congestionamento de linhas de transmissão e restrições de terreno, por exemplo.

De acordo com Nunes e Silva (2021), em 2018 a energia eólica foi responsável pela produção de 17,8% da energia total global. Diante disso, o Brasil tem se destacado na geração eólica *onshore* e já possui alguns projetos de empreendimentos *offshore* para serem distribuídos ao longo do litoral brasileiro. Em 2020, a empresa



Equinor iniciou a fase de licenciamento perante o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) para regularizar os parques eólicos de Aratu I e II, os quais serão os primeiros empreendimentos eólicos *offshore* localizados no Rio de Janeiro e no Espírito Santo.

O mapa dos complexos eólicos que estão em processo de licenciamento ambiental encontra-se em constante atualização pelo IBAMA. Atualmente, é possível ver um total de 70 (setenta) projetos *offshore* distribuídos nos estados do Ceará, Espírito Santo, Maranhão, Piauí, Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte, Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Dentre esses ganham destaque o projeto CE-06 Alpha com 6 GW de potência total, obtidos a partir de 400 torres com 15 MW cada e também o projeto RS-02 Ventos do Sul com potência instalada de 6,5 GW, adquirida por meio de 482 torres de 13,5 MW cada.

Diantes desses aspectos, o presente trabalho apresenta os principais desafios e impasses para consolidação da geração eólica *offshore* na matriz energética brasileira. Ao aprofundar as questões que envolvem a verificação do potencial eólico *offshore* brasileiro, principais componentes da geração eólica *offshore* e o modo como os países europeus conseguiram consolidar seus empreendimentos *offshore*, será possível identificar quais os principais obstáculos que o Brasil enfrentará para instalar os parques eólicos *offshore*.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

O Brasil utilizou energia elétrica pela primeira vez no ano de 1879 para fins de iluminação pública e também de transporte. Anos depois, especificamente dentro do cenário da Segunda Guerra Mundial, Brasil e Estados Unidos firmaram uma aliança que proporcionou o crescimento da industrialização e urbanização do país e, conseqüentemente, aumento da demanda energética.

Ribeiro (2017) afirma que entre os anos de 1940 e 1960, a geração de energia brasileira era essencialmente estatal. Com a crise do petróleo e redução dos investimentos estadunidenses, as dívidas em ambiente nacional acentuaram-se e o governo brasileiro diminuiu a ampliação da oferta de energia. Nesse sentido, o Brasil precisou traçar novas alternativas de modo a depender menos de combustíveis fósseis e impulsionar seu crescimento tanto econômico quanto tecnológico. A

privatização do setor energético, em 1990, foi o primeiro passo no novo plano de reestruturação a fim de trazer mais investimentos para o país. Entre os anos de 1990 e 2003 criou-se a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) com o intuito de reger, vistoriar, operar e ampliar o mercado de energia nacional.

Apesar da geração da energia do Brasil se dar majoritariamente por energia renovável, a dependência das hidrelétricas contribui para uma matriz energética limitada e com valor de geração intrinsecamente ligado a condições climáticas. Ribeiro (2017) cita o episódio de seca vivido nos anos de 2013 e 2014 que levaram a necessidade da utilização da energia proveniente das usinas termelétricas e nucleares, elevando o custo da geração. Cenários como esse servem como um alerta para a necessidade de investir em outras fontes alternativas, que não só complementem a geração de energia hidrelétrica mas que também sejam economicamente mais viáveis do que a termelétrica e a nuclear, por exemplo.

Em vista disso a energia eólica, especificamente a *onshore*, tem mostrado um desempenho satisfatório dentro do contexto energético brasileiro por produzir energia limpa e com um bom custo-benefício. Os maiores potenciais eólicos podem ser vistos especificamente nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Bahia e Rio Grande do Sul. Esses estados brasileiros possuem disponibilidade de áreas com um potencial eólico que viabiliza a instalação dos aerogeradores em terra firme e que contribuem para expansão do setor energético do país. Assim como essa disponibilidade de áreas com forte recurso eólico no continente possibilita que o Brasil diversifique sua matriz energética, o país também tem se tornado um polo interessante para implementação de parques eólicos *offshore* devido à vasta área oceânica disponível e ao fato do recurso eólico ser estável nesse meio.

No ano de 2019, o IBAMA e a União Européia firmaram parceria por intermédio do programa “Diálogos Setoriais” com o intuito de aprimorar os projetos com energia renovável, atingir os objetivos do acordo de Paris, aumentar a consciência ambiental e ampliar os investimentos no setor energético. É certo afirmar que essa aliança teve importante colaboração, visto que as companhias internacionais são detentoras de uma ampla experiência no setor *offshore* e também apresentam outros aspectos essenciais, tais como :

- Conseguiram identificar os impactos ambientais provocados pela tecnologia eólica *offshore*;
- Encontraram formas para amenizar os danos ambientais atrelados à geração eólica *offshore*;
- Possuem um banco de dados robusto, contendo informações de monitoramento.

Desse modo, a parceria entre União Européia e IBAMA contribuirá para estabelecer quais medidas deverão ser adotadas para licenciamento ambiental do setor eólico *offshore* no Brasil e assim fortalecer a situação regulamentatória dessa forma de geração de energia dentro do território brasileiro.

### 1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo dos principais desafios e impasses para consolidação da geração eólica *offshore* na matriz energética brasileira, discutindo quais são as vantagens de implementação dos parques eólicos no mar e pontuando as dificuldades ligadas à desse tipo de empreendimento.

### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Examinar o potencial eólico *offshore* no Brasil;
- Entender a estrutura de um parque eólico *offshore*;
- Realizar um estudo comparativo da geração eólica *offshore* no Brasil com países europeus (Dinamarca, Reino Unido e Alemanha), os quais possuem uma experiência consolidada nesse tipo de empreendimento;
- Efetuar uma análise dos impactos ambientais e econômicos provocados pela implementação de um parque eólico *offshore*.

### 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esse trabalho está dividido em nove capítulos, distribuídos da seguinte forma:

No Capítulo 1, está presente a introdução contendo a importância do tema, a sua motivação, o objetivo geral e o objetivo específico.

No Capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica referente a matriz energética mundial e brasileira, destacando suas principais características e a diferença entre elas.

No Capítulo 3, é apresentada a geração eólica *onshore*, seus principais componentes, vantagens, desvantagens, potencial do recurso eólico mundial e brasileiro. Acerca deste, destaca-se que sua importância é fundamentada no fato de que muitos princípios da tecnologia *onshore* serviram de base para que as primeiras turbinas eólicas *offshore* fossem implantadas no mar.

No Capítulo 4, é abordada a geração eólica *offshore*, destacando as principais formas de medição do recurso eólico marinho, o potencial eólico *offshore* no Brasil e as áreas brasileiras em que se pode encontrar os maiores potenciais de geração de energia elétrica no mar.

No Capítulo 5, são tratados os aspectos tecnológicos da geração eólica *offshore*, tais como as turbinas, tipos de fundações, o efeito esteira e os modos de transmissão de energia.

No Capítulo 6, são abordados os principais impactos apresentados pela geração eólica *offshore*. Embora esse tipo de tecnologia ofereça uma série de benefícios, como redução da emissão de gases causadores do efeito estufa e diversificação da matriz energética, ainda assim é importante considerar os impactos sociais, ambientais e econômicos que estão associados à implementação e funcionamento dos parques eólicos em ambiente marinho.

No Capítulo 7, encontram-se as atuais normas e regulamentações adotadas pelos países europeus para instalação dos parques eólicos no mar e também o atual estado regulatório apresentado pelo Brasil, referente a esse tipo de tecnologia.

No Capítulo 8, são apresentados os custos e licenciamento ambiental, sendo estes os atuais desafios e impasses para a consolidação da geração eólica *offshore* na matriz energética brasileira.

No Capítulo 9, é apresentada a conclusão do trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será abordado a fundamentação teórica necessária para entender como a geração eólica *offshore* pode contribuir para que o Brasil diversifique sua matriz energética, tornando-a menos dependente de combustíveis fósseis e sustentável. Para tanto, serão introduzidos os conceitos de recursos naturais renováveis e não renováveis e expostos a atual composição da matriz energética brasileira e mundial.

### 2.1 A MATRIZ ENERGÉTICA

#### 2.1.1 A matriz energética mundial

Segundo Gejima Junior (2021) os recursos naturais tais como a água, o ar, a biomassa, os raios solares e os resíduos fósseis caracterizam-se por serem fontes geradoras de energia e o somatório delas é o que denominamos de matriz energética.

Os recursos naturais podem ser divididos em duas categorias:

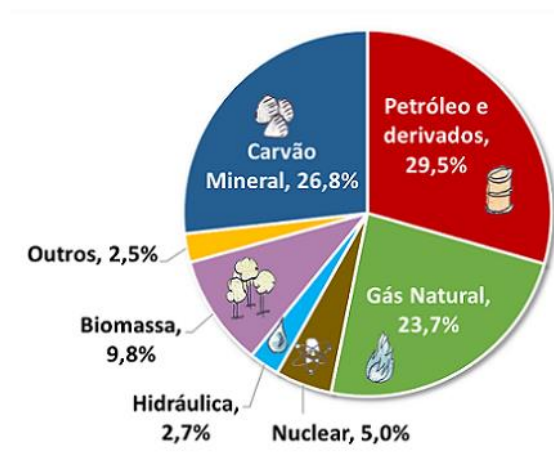
- Renováveis: Quando a natureza repõe os recursos em um prazo relativamente pequeno e esse processo não gera efeitos danosos ao meio ambiente;
- Não renováveis: Quando a natureza não consegue repor os recursos em um curto prazo. Como exemplo desse tipo de recurso tem-se os de origem fóssil, que levaram milhões de anos para serem formados e são frutos da decomposição de animais e vegetação. Esse tipo de recurso é o grande responsável pela emissão dos gases causadores do efeito estufa e podem ser classificados como hidrocarbonetos sólidos, líquidos ou gasosos.

Os hidrocarbonetos sólidos (sendo o carvão o mais popular dessa categoria) são formados a partir da atividade, em elevadas pressões e temperaturas, que os agentes bioquímicos exercem sob os depósitos de vegetação. Já os hidrocarbonetos líquidos (como o petróleo, por exemplo) são originados devido ao acúmulo de animais marinhos e de vegetação sob altas pressões. Por fim tem-se o gás natural como exemplo de hidrocarbonetos gasosos, composto majoritariamente por uma concentração de metano que varia de 60 até 98%.

Na Figura 1 é ilustrada a composição da matriz energética mundial, do ano de

2020. De acordo com a Figura 1, as fontes fósseis são as maiores responsáveis pela geração de energia. O petróleo e seus derivados apresentaram um percentual de 29,5% da geração de energia, enquanto o carvão mineral e o gás natural contribuíram com 26,8% e 23,7%, respectivamente. Já outras fontes como biomassa, nuclear, hidráulica e outras (solar, eólica, etc) geraram, respectivamente, apenas 9,8%, 5,0%, 2,7%, e 2,5% de toda energia mundial.

Figura 1: Esquema da composição da matriz energética mundial



Fonte: Adaptado de EPE (2022).

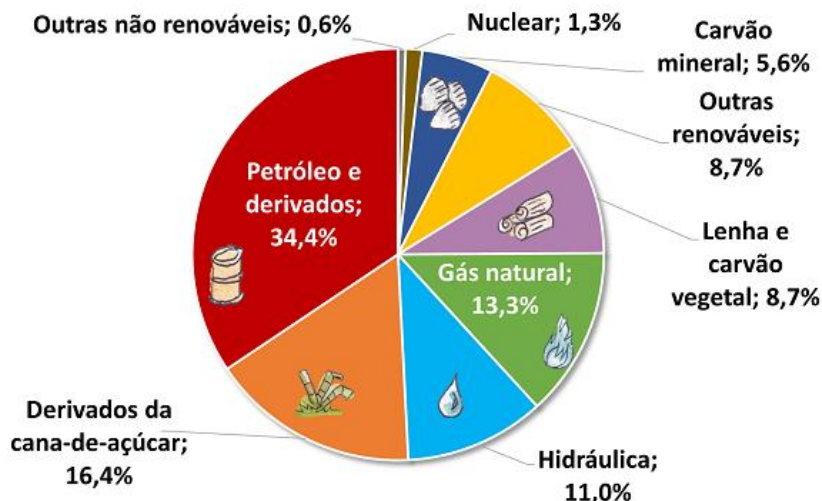
### 2.1.2 A matriz energética brasileira

A matriz energética mundial é composta essencialmente por fontes fósseis, já a matriz energética brasileira conta com mais de 44% da energia produzida sendo proveniente de fontes limpas. Em 2019 cerca de 46,1% de toda energia consumida no país foi gerada por fontes renováveis (biomassa, hidráulica, eólica, solar, dentre outras), ou seja, quase metade de toda produção de energia no país foi oriunda de fonte renovável.

Na Figura 2 é ilustrada a matriz energética brasileira, do ano de 2021. Com base na Figura 2, os combustíveis fósseis representados pelo petróleo e seus derivados, são a fonte de energia não renovável mais consumida no Brasil. Entretanto, fazendo o somatório dos percentuais de lenha e carvão vegetal, derivados da cana-de-açúcar, hidráulica e outras fontes renováveis vê-se que quase 50% do uso da energia brasileira é provido por fontes renováveis, indicando assim uma vantagem em

relação ao cenário mundial.

Figura 2: Composição da matriz energética brasileira



Fonte: Adaptado de EPE (2022).

Segundo Gejima Junior (2021), a pandemia da COVID-19 influenciou no consumo energético brasileiro. Assim como ocorrido em vários lugares do mundo, o Brasil adotou o isolamento social como uma forma de conter o vírus e isso fez com que o consumo de energia, comparado com o ano anterior, fosse reduzido para 4,5% já no primeiro semestre de 2020. A partir desse cenário, ficou claro que a demanda energética de um país está intrinsecamente ligado a fatores ambientais, sociais e econômicos e por esse motivo é importante investir em meios que diversifiquem a matriz energética e garantam um fornecimento de energia contínuo.

### 3 A GERAÇÃO EÓLICA ONSHORE

Neste capítulo será abordado a definição da geração eólica *onshore*, seus principais componentes, vantagens e desvantagens e análise do potencial eólico brasileiro e mundial. Esses pontos servirão de base para um melhor entendimento do capítulo posterior, que tratará da geração eólica *offshore* e que é o foco desse trabalho.

#### 3.1 OS VENTOS

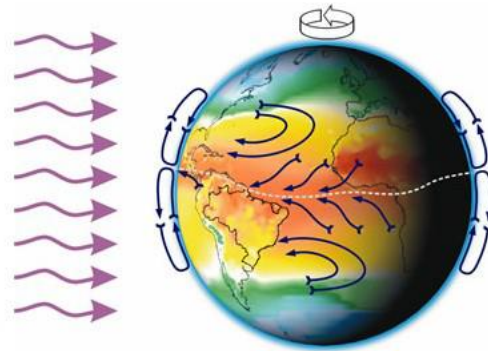
Segundo Nunes e Silva (2021), o vento é uma massa de ar em movimento e essa movimentação é gerada devido a dois principais fatores: 1) por meio dos movimentos da Terra e 2) pelo aquecimento diferenciado das camadas de ar pelo Sol.

Em geral, o ar pode ser descrito como um agrupamento de gases e por isso é controlado por características físicas típicas dos fluidos. Em suma, o ar quente tem uma tendência a expandir-se mais do que o ar frio, o que o torna menos denso e com tendência a subir, enquanto o ar frio é muito mais denso e tende a descer. Sabendo-se que o Sol fornece uma maior quantidade de energia para áreas em que os raios formam ângulos iguais ou próximos a  $90^\circ$  em relação a linha do Equador e que a temperatura no trópico do Equador é superior a dos polos, pode-se inferir que os ventos mais intensos serão gerados por intermédio de um maior aquecimento nas regiões mais próximas ao Equador.

Na Figura 3 é apresentada a formação dos ventos provenientes da movimentação das massas de ar. À vista disso, as regiões tropicais com a coloração amarelo-alaranjadas são mais quentes do que as polares e desse modo, conforme a direção das setas, vê-se que o ar quente que está em baixas altitudes nas zonas tropicais tende a subir e posteriormente será substituído pelo ar frio que sai das áreas polares. Já os ventos frios, estes saem dos polos em direção ao Equador para substituir o ar quente que está nos trópicos e que vai em direção aos polos, fazendo-se assim um ciclo completo.



Figura 3: Formação dos ventos devido a movimentação das massas de ar



Fonte: CRESESB

As estações do ano ou variações sazonais são geradas em virtude da inclinação que o eixo de rotação da Terra possui em relação ao Sol durante o movimento de translação. As variações sazonais influenciam diretamente tanto na força quanto na durabilidade dos ventos e agem na formação dos ventos continentais, podendo estes serem classificados como brisas ou monções.

As monções são ventos periódicos que mudam de sentido a cada estação do ano. Já as brisas estão diretamente relacionadas ao tipo de terreno (tais como, mares e continentes) e à maneira como ele reage ao calor recebido pelo Sol (capacidade de armazenamento, reflexão e absorção de calor), se caracterizando por serem ventos periódicos que sopram do mar para o continente e vice-versa (RIBEIRO, 2017).

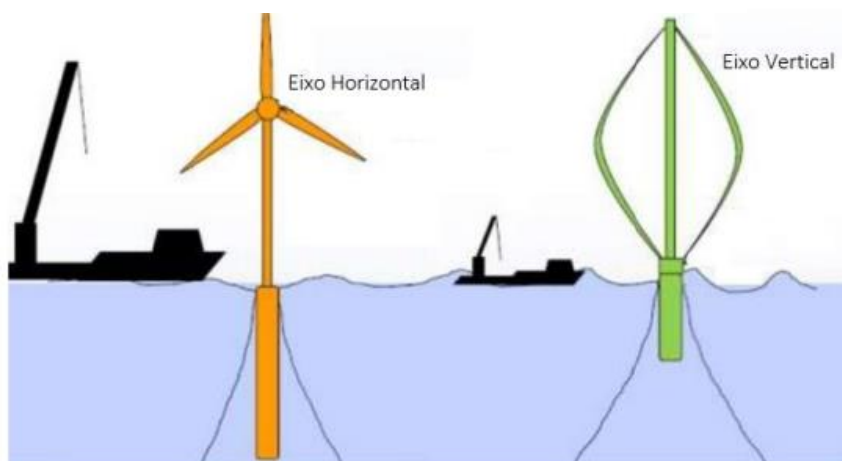
### 3.2 PRINCIPAIS COMPONENTES DA GERAÇÃO EÓLICA *ONSHORE*

As turbinas eólicas, os sistemas auxiliares (sistema de segurança e sistema de orientação) e o gerador elétrico fazem parte de um componente essencial para a geração eólica: o aerogerador. Em uma primeira fase, a turbina transforma a energia cinética dos ventos em energia mecânica. A partir de um eixo, a energia mecânica presente na rotação da turbina acionará o gerador, que por sua vez finalizará o processo convertendo a energia mecânica em elétrica alternada a partir da indução eletromagnética.

De acordo com a direção da rotação dos eixos e das pás, as turbinas podem ser classificadas em turbinas de eixo vertical ou horizontal, conforme apresentada na Figura 4. Nas turbinas de eixo vertical, o eixo de rotação, geradores e outros

componentes da torre encontram-se fixos verticalmente. As turbinas de eixo vertical não necessitam do sistema de controle de direção do vento, mas caso seja necessário realizar a troca do rolamento do rotor, toda turbina precisará ser desmontada. Já as turbinas de eixo horizontal são aquelas cujo eixo é fixo na posição horizontal e os outros equipamentos são colocados em cima da torre. Apesar desse tipo de turbina apresentar um alto custo, ainda assim é o mais utilizado e eficiente.

Figura 4: Turbinas de eixo horizontal e vertical



Fonte: Adaptado de Inovação Tecnológica (2012)

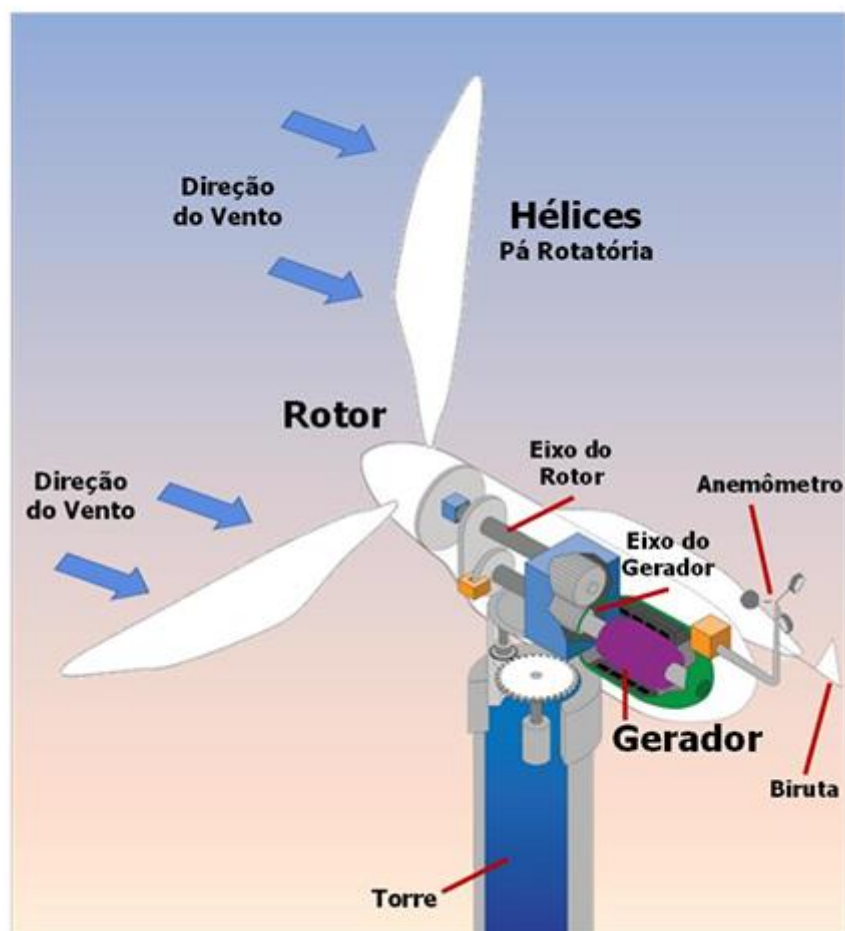
Os sistemas de segurança possuem a função de controlar o modo como a turbina irá girar e garantir que a mesma não opere em situações inadequadas. De acordo com a Figura 5, os principais componentes de um aerogerador são:

- Torre: É o maior componente do aerogerador e possui a função de sustentar os outros dispositivos;
- Rotor: As pás e o cubo (também chamado de *hub*, é a peça que faz a união das pás) formam o rotor, cuja função é converter a energia mecânica das correntes de ar em movimento e transmiti-las a um eixo;
- Pás: Possuem materiais leves em sua composição e apresentam formatos aerodinâmicos que melhoram a performance da obtenção do vento;
- Nacele: Compreende a parte mais densa do aerogerador pois nela estão presentes componentes como caixa de transmissão e gerador, por exemplo;
- Caixa de transmissão: Possui engrenagens que aumentam a velocidade de rotação vinda do eixo do rotor para a velocidade que faz o gerador entrar em funcionamento. Esse componente é importante porque o rotor tem uma velocidade baixa (de 20 a 150 rpm) e o gerador precisa de uma alta velocidade de rotação (de

1200 a 1800 rpm) para que funcione conforme desejado;

- Gerador: Tem a função de converter a energia mecânica em energia elétrica;
- Anemômetro: Situado na nacela, esse componente é um sensor responsável por medir a velocidade média do vento local;
- Biruta: É um sensor que opera juntamente com o anemômetro e é responsável por monitorar a direção do vento. A partir desse monitoramento, a nacela é posicionada na direção com melhor eficiência do vento.

Figura 5: Principais componentes de um aerogerador

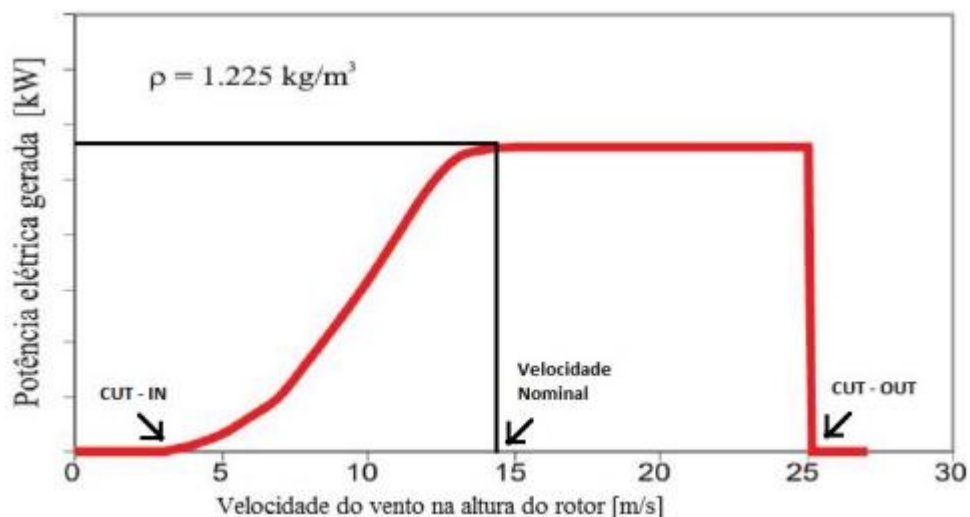


Fonte: CBIE (2020)

Conforme é apresentado na Figura 6, a velocidade do vento influencia diretamente na construção da curva característica que mostra a potência de uma turbina eólica e o quanto esse componente será capaz de gerar. Segundo Ribeiro (2017), três principais velocidades estão presentes na curva de potência das turbinas eólicas. São elas:

- Velocidade mínima: Também chamada de velocidade de *cut-in*, representa a menor velocidade necessária para iniciar a geração de energia. De modo geral, a faixa de valores dessa velocidade está entre 2,5 e 3 m/s;
- Velocidade máxima: Também chamada de velocidade de *cut-out*, é a máxima velocidade que a turbina consegue funcionar sem que lhe seja causado danos. De acordo com Ribeiro (2017), quando a velocidade do vento excede 25 m/s, o sistema de proteção é acionado e a geração de energia é interrompida;
- Velocidade nominal: É a velocidade que está dentro dos intervalos citados anteriormente e representa a velocidade necessária para obter a máxima geração de energia e a máxima potência da turbina.

Figura 6: Curva da potência das turbinas eólicas



Fonte: Ribeiro (2017)

Sendo o vento o principal recurso dentro da geração eólica *onshore*, a potência deste será dada pela Equação 1:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

Em que  $P$  representa a potência disponível do vento ( $W$ ),  $\rho$  é a densidade do ar ( $kg/m^3$ ),  $A$  é a área do rotor da turbina ( $m^2$ ) e  $V$  é a velocidade do vento ( $m/s$ ).

### 3.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA GERAÇÃO EÓLICA ONSHORE

A geração eólica permite que não só a energia elétrica seja gerada de forma

renovável, como também propicia inúmeros benefícios socioeconômicos. Quanto ao aspecto econômico, o setor eólico tem desempenhado papel fundamental na geração de novos empregos que abragem desde a construção até o funcionamento e manutenção dos empreendimentos eólicos. Já tratando-se de aspectos sociais, esse tipo de geração permite que as comunidades locais recebam qualificação profissional para que posteriormente estejam aptas a trabalhar nos parques eólicos que serão instalados.

Como desvantagem a geração eólica *onshore* causa vários impactos ambientais e estudos devem ser previamente realizados para verificar a viabilidade de instalação do parque. Dentre esses impactos, pode-se destacar:

- Etapa de construção: Nessa primeira fase de um empreendimento eólico, a possível criação de vias que levam até a obra pode gerar modificações na fauna e na flora local, transtornos nas rodovias devido ao fluxo de caminhões extensos, ruídos, entre outros pontos;
- Etapa de funcionamento: Nessa segunda fase destacam-se os ruídos, os impactos nas rotas de pássaros e as modificações da paisagem.

O som emitido pelas turbinas eólicas é gerado devido a aerodinâmica, provocada pelo movimento dos ventos nas pás, e a mecânica, gerada pelo funcionamento das engrenagens dos sistemas de transmissão e geração. Dessa forma, quanto maior o tamanho da turbina e a velocidade com que as pás rotacionam, maior será o ruído. No entanto, vários estudos tem sido realizados e atualmente já é possível diminuir os ruídos mecânicos por meio de sistemas mecânicos que melhor absorvem as vibrações geradas pelos componentes do aerogerador e também já é possível reduzir os ruídos aerodinâmicos por meio da melhoria no *design* das pás eólicas, otimizando seu formato e ângulo de inclinação.

A instalação dos parques eólicos geralmente é feita em áreas de montanhas ou costas, de modo que a visualização dos aerogeradores provoca modificações consideráveis na paisagem. Para contornar esse problema, busca se fazer um planejamento adequado para implantação do parque, análise detalhada da paisagem local e escolha correta das turbinas que melhor irão se adequar à paisagem.

O chamado *Disco Effect*, ou o reflexo que o sol emite sobre as pás, é um outro ponto negativo na geração eólica, mas tem sido resolvido exigindo-se pinturas com antirreflexo nos dispositivos que compõem o aerogerador.

### 3.4 POTENCIAL EÓLICO *ONSHORE* BRASILEIRO *VERSUS* POTENCIAL EÓLICO *ONSHORE* MUNDIAL

A China é o país com maior capacidade instalada (184,7 GW), seguida dos Estados Unidos (94,3 GW), Alemanha (59,4 GW), Índia (35,3 GW), Espanha (23,4 GW), Reino Unido (21,7 GW), França (15,1 GW) e Brasil (14,4 GW) (GUIMARÃES, 2020).

Pinto e Santos (2019) relatam que entre 1976 e 1977, o Instituto de Atividades Especiais realizou o processamento de informações anemométricas (obtidas em aeroportos brasileiros) para verificação da viabilidade técnica de equipamentos eólicos de pequeno porte que viriam a ser instalados na região Nordeste e em Fernando de Noronha.

No ano de 1992, o Brasil realizou a instalação de um pequeno centro de teste no arquipélago de Fernando de Noronha, com potência instalada de 1 MW. Os resultados obtidos serviram para aprofundar o conhecimento sobre o potencial eólico brasileiro para a implementação de empreendimentos eólicos cada vez maiores.

No ano de 2001, foi registrado o primeiro Atlas Eólico Brasileiro. De acordo com o Atlas, as principais regiões para o aproveitamento do recurso eólico são: o Nordeste, Sudeste e Sul, que juntos correspondem a cerca de 90% de todo o potencial eólico brasileiro (NASCIMENTO *et al.* 2020).

Segundo Duarte (2018), na região nordeste, a geração eólica atua como uma complementação para geração hidrelétrica sobretudo nos meses secos (que compreendem os meses de maio até novembro) quando o volume de água dos reservatórios das hidrelétricas estão baixos.

O Brasil atualmente detém um potencial eólico *onshore* estimado em 500 GW, valor que supera o triplo de sua atual demanda energética, e segundo a Empresa de Pesquisa Energética, o potencial do recurso eólico marinho brasileiro é superior a esse valor. Nesse sentido, o Brasil têm investido em formas de inserir a geração eólica *offshore* em seu território e conforme Duarte (2018) isso ficou ainda mais notório em setembro de 2018, quando a Petrobrás e a empresa norueguesa Equinor firmaram parceria com o intuito de explorar a viabilidade do potencial *offshore* brasileiro.

## 4 A GERAÇÃO EÓLICA OFFSHORE

Neste capítulo serão abordadas as principais temáticas acerca da geração eólica *offshore*. Os modos de medição do recurso eólico em um local, as características do recurso eólico *offshore* brasileiro e o potencial eólico *offshore* brasileiro mundial serão os principais tópicos a serem discutidos.

### 4.1 O RECURSO EÓLICO OFFSHORE

Segundo EPE (2020), o conhecimento da disponibilidade do recurso eólico é imprescindível para avaliar a viabilidade técnica e econômica da geração eólica *offshore* de um determinado local. Ter clareza desse parâmetro proporcionará uma maior precisão na definição dos custos e das eventuais tecnologias que deverão ser utilizadas na implementação do parque.

Semelhante ao que ocorre com as eólicas *onshore*, o recurso eólico nos oceanos pode ser avaliado por meio de medições diretas, ou seja medições no local desejado, por meio da instalação de torres de medição (com anemômetros, *wind vanes* e outros instrumentos meteorológicos) e equipamentos em boias, ou de forma indireta, por meio de sensoriamento remoto, informações de satélite ou equipamentos do tipo SODAR (do inglês, *Sonic Detection and Ranging*) ou LIDAR (do inglês, *Light Detection and Ranging*) (EPE, 2020).

#### 4.1.1 Formas de medição do recurso eólico

##### A) Medições diretas

##### I) Torres anemométricas

As torres anemométricas ou de medição, representam o modo mais comum e preciso de verificação do recurso eólico. Em contraste com as medições *onshore*, a *offshore* ainda é limitada devido à complexidade da instalação das torres em alto mar. Ao optar por esse tipo de forma de medição, é importante conhecer as suas vantagens e desvantagens. Quanto às vantagens:

- Possibilitam a instalação de sensores de temperatura, ondas, GPS (do inglês, *Global Positioning System*), entre outros;
- Quando as torres são instaladas em plataformas de petróleo e gás, o acesso ao local de medição torna-se fácil devido a presença dos heliportos;
- Após a implementação do empreendimento eólico, podem ser utilizadas como plataforma de observação.

Em relação às desvantagens:

- Apresentam um alto custo;
- A estrutura do local em que será realizada a instalação deverá ser firme;
- A estrutura da torre não pode utilizar cabos para estabilizá-la e com isso a estrutura do mastro deverá ser mais resistente, acarretando não só a diminuição da altura da torre, como a perda da produtividade devido ao forte efeito esteira. O efeito esteira é uma das principais causas de perda de produção de energia dentro da geração eólica *offshore* e por isso será discorrido de forma mais aprofundada no capítulo 5 deste trabalho.

Conforme EPE (2020), atualmente vem sendo explorada pela Petrobrás a possibilidade de se instalar as torres anemométricas em plataformas de petróleo e gás que apresentam baixa produtividade ou que estão em processo de descomissionamento. Dessa forma, os custos de instalação da torre diminuem e também impede que a estrutura antiga da plataforma seja sucateada.

## II) Boias oceanográficas

É possível realizar a medição direta do recurso eólico por meio de equipamentos meteorológicos postos sobre boias oceanográficas. Vale destacar que por estas estarem em baixas altitudes, a medida da velocidade do vento apresenta um elevado grau de incerteza. No entanto, esse artifício de medição ainda pode ser utilizado quando deseja-se verificar o desempenho do recurso eólico à longo prazo.

Atualmente, o Brasil apresenta dois programas de monitoramento por boias oceanográficas, sendo:

- a) PIRATA (do inglês, *Prediction and research Moored Array in the Tropical Atlantic*)



O programa PIRATA faz parte do acordo cooperativo entre Brasil, França e Estados Unidos, em que estes países são responsáveis pela implantação e manutenção de uma rede de monitoramento formada por 21 boias flutuantes, instaladas no oceano atlântico tropical, cujo o objetivo é observar a interação entre o oceano e a atmosfera.

GOOS-Brasil é a integrante GOOS (do inglês, *Global Ocean Observation System*) brasileira da Oceaflan, sendo esta a Aliança Regional para Oceanografia no Atlântico Sudoeste Superior e Tropical. A GOOS-Brasil faz parte do sistema nacional de monitoramento do oceano Atlântico Sul e Tropical, com o objetivo de coletar informações do território oceânico e efetuar o controle da qualidade do mesmo.

A exata localização das boias oceanográficas pode ser consultada no próprio *site* do programa PIRATA e as informações coletadas podem ser vistas de modo gratuito no site do GOOS-Brasil. Dentre os dados adquiridos, pode-se citar a temperatura da água (que varia de 1 até 500 m de profundidade), a temperatura do ar, a velocidade do vento, umidade relativa, radiação solar e salinidade (cuja profundidade varia de 1 até 120 m).

b) Programa Nacional de Boias (PNBOIA):

O PNBOIA possui o intuito de colher as informações oceanográficas e meteorológicas do oceano Atlântico Sul e Tropical. As redes de boias monitoradas via satélite coletam dados de umidade, correntes marinhas, velocidade do vento, pressão atmosférica e densidade do ar.

O programa foi realizado por meio de dois subprogramas:

- Boia de deriva: Formado por uma rede de boias derivadoras observadas por satélites que abrangem a maior parte do oceano Atlântico Sul e Tropical. A temperatura e a corrente da superfície do mar, bem como a pressão atmosférica e o vento superficial são os principais dados coletados por esse tipo de boia;
- Boias de fundeio: Formado por uma rede de boias de fundeio fixadas e monitoradas via satélite, também abrangem a maior parte do oceano Atlântico Sul e Tropical com a finalidade de acompanhar os fenômenos atmosféricos (ciclones tropicais, as linhas de instabilidade, ondas de leste, zonas frontais) e informações oceanográficas tais como corrente, salinidade, temperatura, entre outros.

Hoje em dia, encontram-se em funcionamento onze boias de deriva e apesar da existência de 21 boias de fundeio, sendo estas distribuídas por todo litoral brasileiro indo desde o Rio Grande do Sul até Fortaleza, apenas três boias estão em funcionamento e podem ser encontradas em Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Rio de Janeiro.

## **B) Medições indiretas**

### **I) SODAR e LIDAR**

As tecnologias de monitoramento conhecidas como SODAR e LIDAR são relativamente recentes, podem ser acompanhadas de forma remota e possibilitam a instalação de estruturas flutuantes cujo intuito é recolher informações meteorológicas e anemométricas no oceano.

#### **a) SODAR:**

Este sistema realiza as medições utilizando ondas sonoras e efeito Doppler para medição remota da estrutura de turbulência vertical e perfil do vento na troposfera (EPE, 2020). Dentre as vantagens da utilização do SODAR pode-se destacar o fato de que eles não alteram o fluxo do vento e também são portáteis, em virtude de serem instalados em estruturas flutuantes. No entanto, são instáveis em cenários chuvosos ou com ventos mais velozes e por esse motivo não são frequentemente utilizados.

#### **b) LIDAR:**

O sistema LIDAR mede o efeito da reflexão da luz na atmosfera. Um sistema típico capta os sinais refletidos pelos aerossóis transportados pelo vento e, através da diferença entre os sinais emitidos e de retorno, determina a direção e velocidade dos ventos, podendo obter perfis tridimensionais de velocidade (EPE,2020). Similarmente ao sistema SODAR, o sistema LIDAR também pode ser implementado em estruturas flutuantes, mas apresenta um custo elevado.

## II) Sensores instalados em satélite

Uma alternativa para medição de dados anemométricos é obter informações por meio de sensores instalados em satélites, tais como sensores remotos do tipo escaterômetro, que medem a velocidade e a direção do vento na superfície do mar (EPE, 2020).

Segundo EPE (2020), para mapear o recurso eólico brasileiro utilizou-se os dados via satélite contidos no GWA (do inglês, *Global Wind Atlas*), um aplicativo *web* com acesso gratuito e que oferece as ferramentas necessárias para realização de cálculos e determinação das áreas com maior potencial eólico ao redor do mundo. Por meio do GWA é possível fazer consultas de forma *online*, adquirir os dados gratuitamente e posteriormente fazer o *download* do mapa do potencial eólico global, regional e nacional em alta resolução.

### 4.1.2 O recurso eólico *offshore* brasileiro

O BRAMS (do inglês, *Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System*) tem como base o RAMS (do inglês, *Regional Atmospheric Modeling System*), sendo este um modelo criado pela Universidade do Estado da Califórnia/EUA e aquele mantido/desenvolvido pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) em conjunto com a Universidade de São Paulo (USP) e várias outras universidades nacionais e internacionais. Tanto o BRAMS quanto o RAMS são modelos numéricos utilizados para prever o tempo e realizar simulações do fluxo atmosférico que abrangem desde escalas hemisféricas até os redemoinhos situados na camada planetária limite, sendo esta definida por Marques (2017) como a camada atmosférica adjacente à superfície terrestre, que apresenta turbulências e que responde à forças superficiais de aquecimento e resfriamento solar e também cisalhamento do vento.

O Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) apresentou, no ano de 2013, os dados que possibilitaram a criação do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro oficialmente lançado no ano de 2017. O modelo do BRAMS, com resolução espacial de 5 quilômetros, simulou parâmetros de direção e velocidade do vento em todo Brasil ao longo do ano de 2013, tornando assim possível a obtenção de dados do recurso

eólico.

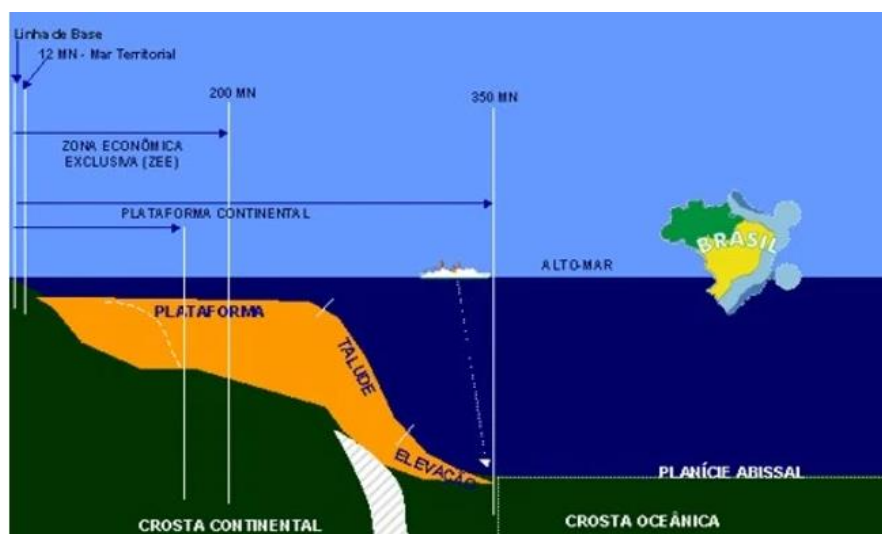
Atualmente, são utilizados três bases de dados para estimar a velocidade do vento em todo território marinho brasileiro:

- Base 1: Envolve os dados encontrados no Atlas Eólico Brasileiro, disponibilizados pelo CEPEL;
- Base 2: Envolve os dados apresentados pela Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) e que estão presentes no GWA. Tomando como referência o ano de 2015, encontrou-se a velocidade média anual de vento com até 30 quilômetros de distância da costa;
- Base 3: Envolve os dados apresentados pelo ECMWF (do inglês, *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) e que podem ser vistos no chamado ERA5, uma base de dados que fornece estimativas horárias de variáveis climáticas atmosféricas, terrestres e oceânicas. Tratando-se do Brasil, tomou-se os anos de 2000 até 2017 como ponto de estudo para verificar a velocidade média anual do vento e obteve-se os dados de até 30 quilômetros da Zona Econômica Exclusiva (ZEE) brasileira.

O termo ZEE, juntamente com a definição de Plataforma Continental e Mar Territorial, foi estabelecido no dia 10 de dezembro de 1982 na Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CNUDM). Conforme ilustrado na Figura 7, a ZEE é a distância que vai da costa até 370 quilômetros (200 milhas náuticas) e dentro desta faixa o país costeiro possui prioridade para utilizar, proteger, explorar e gerir os recursos naturais além de responsabilizar-se por estabelecer as leis para uso de ilhas artificiais, instalações e estudos científicos marinhos. Com uma vasta riqueza natural e altíssimo valor estratégico, a ZEE brasileira ou “Amazônia Azul” apresenta uma área marítima de aproximadamente 3,6 milhões de quilômetros quadrados, correspondendo a quase 40% de todo território brasileiro.

Na Figura 7 é ilustrada a faixa que engloba a ZEE brasileira e os limites da Plataforma Continental e do Mar territorial. A CNUDM estabeleceu que Mar Territorial (águas territoriais) é a faixa oceânica que vai desde a costa até 22 quilômetros (12 milhas náuticas) e a plataforma continental é a faixa que inicia na costa e desce com um declive em direção ao talude continental ou até chegar nas 200 milhas náuticas, quando a margem continental não é tão íngreme.

Figura 7: Zona Econômica Exclusiva brasileira, Mar Territorial e Plataforma



Fonte: CBIE (2020)

## 4.2 POTENCIAL EÓLICO *OFFSHORE* BRASILEIRO

### 4.2.1 Aspecto teórico, técnico e ambiental do potencial eólico *offshore*

De acordo com Silva (2019), para avaliar o potencial eólico *offshore* brasileiro, de uma forma geral, é preciso conhecer três aspectos importantes:

- **Potencial teórico:** Considera o recurso eólico *offshore* dentro de toda área oceânica que está sob as leis do país, desprezando critérios de viabilidade ambiental, tecnológica, social e comercial. Desse modo, o potencial *offshore* teórico indica o valor máximo teórico de vento que poderá ser utilizado no Brasil, dentro de toda ZEE, e que servirá de suporte para estruturação de um Atlas eólico *offshore* brasileiro;
- **Potencial técnico:** Para verificar o potencial técnico é preciso analisar, primeiramente, as limitações de profundidade em que as turbinas eólicas serão instaladas no mar. Após isso, é necessário avaliar as restrições de velocidade mínima que o vento deverá apresentar para que a instalação das turbinas seja considerada viável. Atualmente, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) considera que os ventos atrativos deverão ter no mínimo uma velocidade de 7,0 m/s.
- **Potencial social e ambiental:** Para verificação desses potenciais, são estudados os diferentes usos do ambiente marinho e quais serão as formas que deverão ser adotadas para minimizar os danos causados a natureza e a sociedade. Portanto, a

área com o melhor potencial social e ambiental será aquela com maior viabilidade técnica, disponibilidade de recurso eólico e menores impactos de implantação dos parques eólicos *offshore*.

#### **4.2.2 Áreas brasileiras com maior potencial eólico *offshore***

A identificação das áreas com os melhores potenciais energéticos *offshore* tem servido de ferramenta para que o setor eólico *offshore* brasileiro consiga desenvolver-se. Os estudos dessas áreas possibilitam que os empreendedores desenvolvam propostas que se adequem a determinado local e assim explorem a área da melhor forma possível. No Brasil, esses estudos utilizam o critério da exclusão socioambiental, ou seja, verificam se os aspectos sociais e ambientais são ou não relevantes na investigação da capacidade eólica marinha.

Na tabela 1 é proposto um resumo dos estudos que avaliam a estimativa do potencial energético *offshore* brasileiro, considerando o critério da exclusão socioambiental. Por meio desta é possível ter uma melhor visualização das áreas que apresentam um recurso eólico mais intenso e quais apresentam maior quantidade de restrições ambientais e sociais.

Tabela 1: Estudos estimativos do potencial energético offshore brasileiro e as respectivas exclusões adotadas

Abrangência do Estudo	Capacidade Offshore Estimada (GW)	Área Marítima Estimada (Km <sup>2</sup> )	Densidade Estimada (W/m <sup>2</sup> )	Critérios de Exclusão adotados nos Estudos	
				Técnico	Socioambiental
Nacional	126*	41.962,1*	Sem Informação	Velocidade do Vento (100 m): =>7,0 m/s; Profundidade <100 0m.	Áreas com Presença de Grupos Biológicos Importantes (Recifes, Aves, Mamíferos, Bentos); Unidades de Conservação; Áreas Prioritárias para Conservação; <b>Áreas de Atividade de Pesca</b> e Distância de 8 km da Costa visando Redução do Impacto Visual.
	606	Sem Informação	215 a 986	Velocidade do Vento (80 m): =>7,0 e <=12 m/s; Profundidade <100 m.	Nenhuma Exclusão
	697	201.947	Sem Informação	Profundidade <50 m; Velocidade de vento > 7,0 m/s; Taxa de ocupação: 3,75 MW/km <sup>2</sup> (Nordeste) e 2,6 MW/km <sup>2</sup> (Sudeste e Sul).	Nenhuma Exclusão
	1.300	Sem Informação	Sem Informação	Profundidade <100 m.	Nenhuma Exclusão
	1.228	Sem Informação	Sem Informação	Profundidade < 50 m (Fundação Fixa) e 50 < 1.000 m (Fundação Flutuante); Velocidade de vento: > 7,0 m/s	Nenhuma Exclusão
	1.342,78	405.287	349 a 877	Profundidade <50 m.	Nenhuma Exclusão
	2.758	940.303	Sem Informação	Profundidade <60 m	Unidades de Conservação
Regional (Norte e Nordeste)	Sem Informação	Sem Informação	<900	Nenhuma Exclusão	Nenhuma Exclusão
Regional (Sul e Sudeste)	216	77.848	300 a 600	Profundidade <100 m;	Nenhuma Exclusão
	344	271.512	400 a 550	Velocidade de Vento (100 m): >7,0m/s e Profundidade <1000 m	Unidade de Conservação e Distância de 18 km da Costa visando redução do impacto visual.
	Sem Informação	Sem Informação	720 a 1800	Nenhuma Exclusão	Nenhuma Exclusão
Local (Ceará)	117,2	19.540	Sem Informação	Velocidade de vento (100m): =>7,0 m/s; Profundidade 5 m a 50m; Distância máxima de 24 mn; Taxa de ocupação de 6MW/km <sup>2</sup> , considerando curva de potência característica de aerogeradores offshore; Premissas para fins da estimativa global de energia: indisponibilidade de rede, turbinas e manutenção (5,0%); perdas elétricas até o ponto de conexão (variando entre 3,0% e 4,5%, calculadas a partir da batimetria e linha de costa); degradação depás e desempenho (1,3%) e perdas aerodinâmicas (8,0%).	Áreas de Proteção Integral; <b>Áreas de Pesca</b> ; Distância Mínima de 2km para representar efeitos da maré visando processos erosivos próximos à praia
Local (Bahia)	106,2 (100 m)	28,60 (100 m)	Sem Informação	Velocidade do Vento (100 e 150 m de altura): => 6,0 m/s	Nenhuma Exclusão
	107,5 (150 m)	28,964 (150 m)	Sem Informação		
Local (Rio Grande do Sul)	80,3	30.898	Sem Informação	Profundidade < 50 m; Velocidade do Vento (100 m): => 7,0 m/s	Nenhuma Exclusão

Fonte: Adaptado de Xavier (2022)

Dutton *et al.* (2019) realizou um estudo com a estimativa do potencial eólico *offshore* brasileiro utilizando os dados divulgados no ESMAP (do inglês, *Energy Sector Management Assistance Program*), um programa de iniciativa do Grupo Banco Mundial que tem o objetivo de auxiliar os países em questões que envolvam gestão do setor energético e desenvolvimento sustentável.

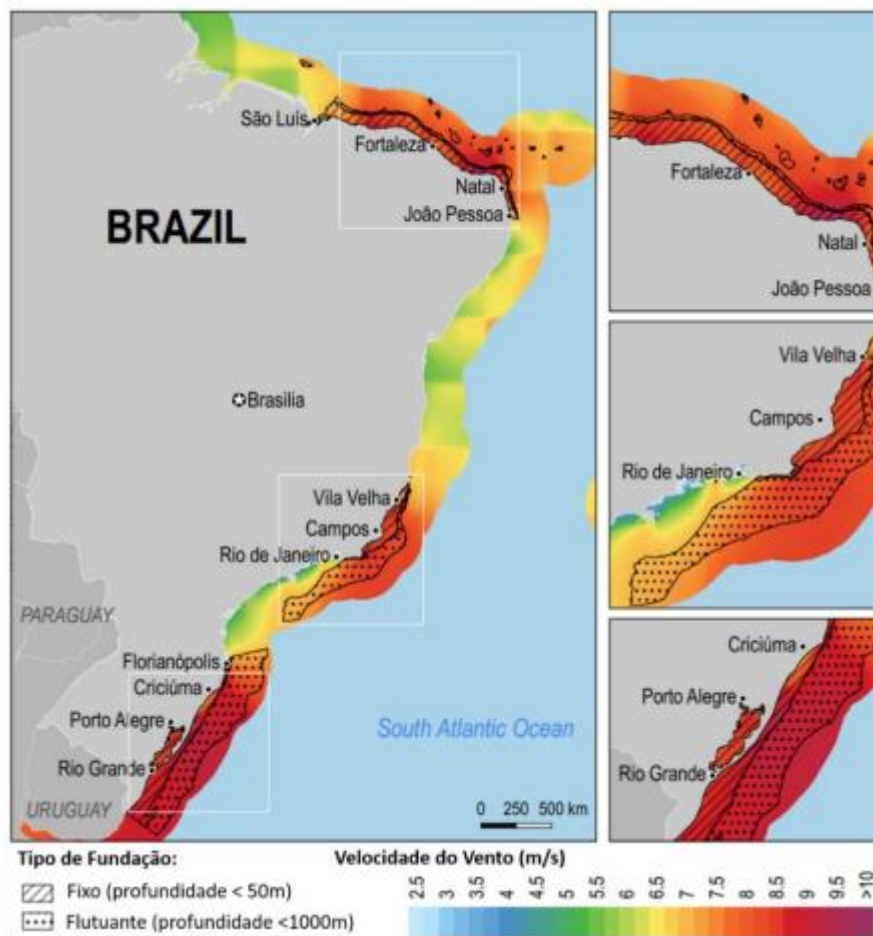
O estudo realizado por Dutton *et al.* (2019) mostrou uma potência instalada de 1.228 GW, na qual 480 GW pertencem aos aerogeradores de fundações fixas e 748 GW aos aerogeradores com fundações flutuantes. O modelo de estimativa considerou, para fins técnicos, as regiões com ventos superiores a 7 m/s e profundidade de até 50 m e até 1000 m para fundações fixas e flutuantes, respectivamente. Vale lembrar que esse estudo não considerou áreas com restrições e destacou ainda a importância de fazer-se um levantamento do potencial eólico *offshore* considerando questões socioambientais, rotas comerciais, rotas migratórias de aves e questões logísticas.

Na Figura 8 é apresentado o mapa do potencial eólico *offshore* brasileiro, em diversas áreas e para diferentes tipos de fundações. De acordo com Dutton *et al.* (2019), as áreas destacadas possuem as seguintes características:

- O litoral nordestino, entre São Luís e Natal, possuem ventos de 9 m/s e potencial de 237 GW para os empreendimentos eólicos com fundações fixas e que, devido à acentuada profundidade da plataforma continental nessa região, torna-se pouco provável a instalação de turbinas com fundações flutuantes pois estas teriam um custo ainda mais elevado;
- O litoral sudeste possui ventos com velocidade de 8,5 m/s e potencial avaliado em 67 GW para fundações fixas e 227 GW para fundações flutuantes;
- O litoral sul apresenta ventos que alcançam 9 m/s e detém um potencial estimado em 173 GW para fundações fixas e 430 GW para as flutuantes.



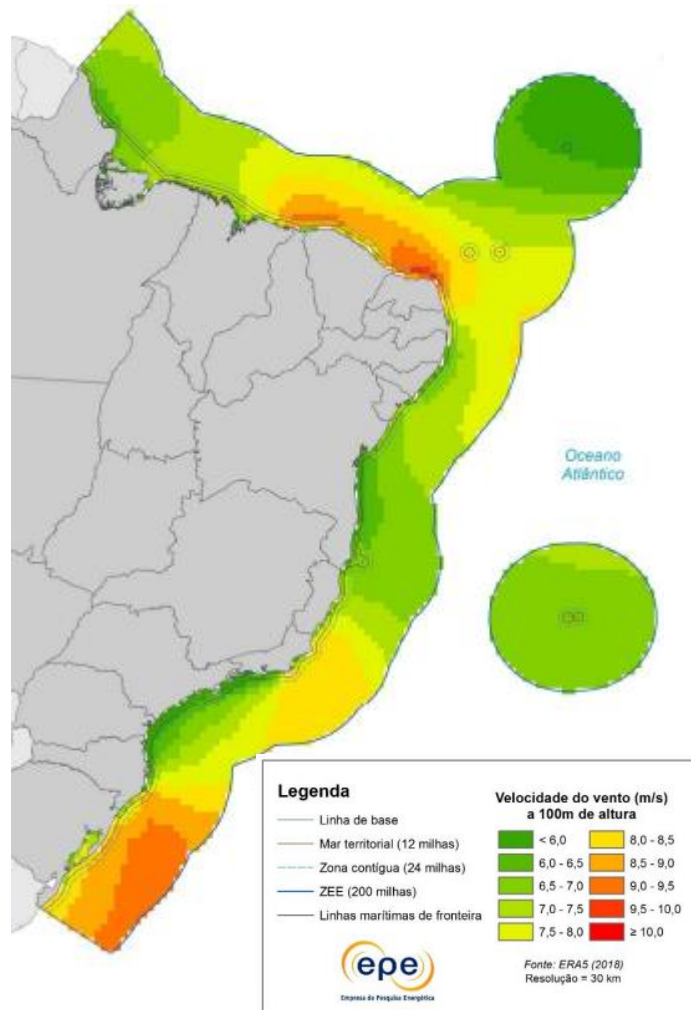
Figura 8: Mapa do potencial eólico *offshore* brasileiro



Fonte: Adaptado de Dutton *et al* (2019)

Na Figura 9 é apresentada a velocidade do vento a 100 m de altura, segundo a base de dados ERA5. Essa base de dados é pertencente ao ECMWF e é a única, dentre as bases citadas, que abrange toda ZEE brasileira. De acordo com EPE (2020), em uma profundidade de 50 m e para ventos com velocidades maiores que 7 m/s, o potencial eólico *offshore* brasileiro pode ser estimado em 697 GW. Esse valor é aproximadamente 30% superior ao mostrado no ESMAP e isso, provavelmente, deve-se ao fato do modelo ERA5 abranger toda ZEE brasileira.

Figura 9: Velocidade do vento a 100 m de altura



Fonte: EPE (2020)

#### 4.3 POTENCIAL EÓLICO OFFSHORE MUNDIAL

O recurso eólico *offshore* é muito mais constante, forte e menos turbulento do que o *onshore*. Como a geração eólica *offshore* depara-se com menos restrições de níveis de ruído e limitações de espaço, os projetos são gigantes e por conseguinte conseguem gerar muito mais energia do que o *onshore* (PAZ, 2020).

No cenário global, a Europa foi a primeira a aproveitar a energia eólica *offshore* e atualmente lidera o *ranking* mundial em potência instalada. Com relação aos aerogeradores da tecnologia *offshore*, a Europa, especificamente Espanha e Alemanha, também é pioneira na fabricação desses componentes.

Em 1991, a Dinamarca instalou o primeiro parque eólico *offshore* do mundo. O

*Vindeby Offshore Wind Farm* estava a cerca de 3 km da costa e possuía 11 aerogeradores de 450 kW cada, instalados a uma profundidade de aproximadamente 5 m (BARBOSA, 2018). O parque foi inicialmente construído para comprovar a viabilidade da geração eólica no oceano e no ano de 2017, após 26 anos da sua instalação, veio a ser descomissionado. Na Figura 10 é ilustrado o parque *Vindeby Offshore Wind Farm* na Dinamarca.

Figura 10: Parque *Vindeby Offshore Wind Farm*, localizado na Dinamarca



Fonte: Maia (2009)

Inicialmente, os projetos eólicos *offshore* localizavam-se em águas mais próximas à costa, mas atualmente já se tem registro de projetos mais distantes, instalados em profundidades elevadas e que possuem altas capacidades de potência da turbina. Na Tabela 2 é apresentado um sumário com as principais características pertencentes aos 10 primeiros parques eólicos *offshore* no mundo.

Tabela 2: Características dos 10 primeiros parques eólicos offshore no mundo

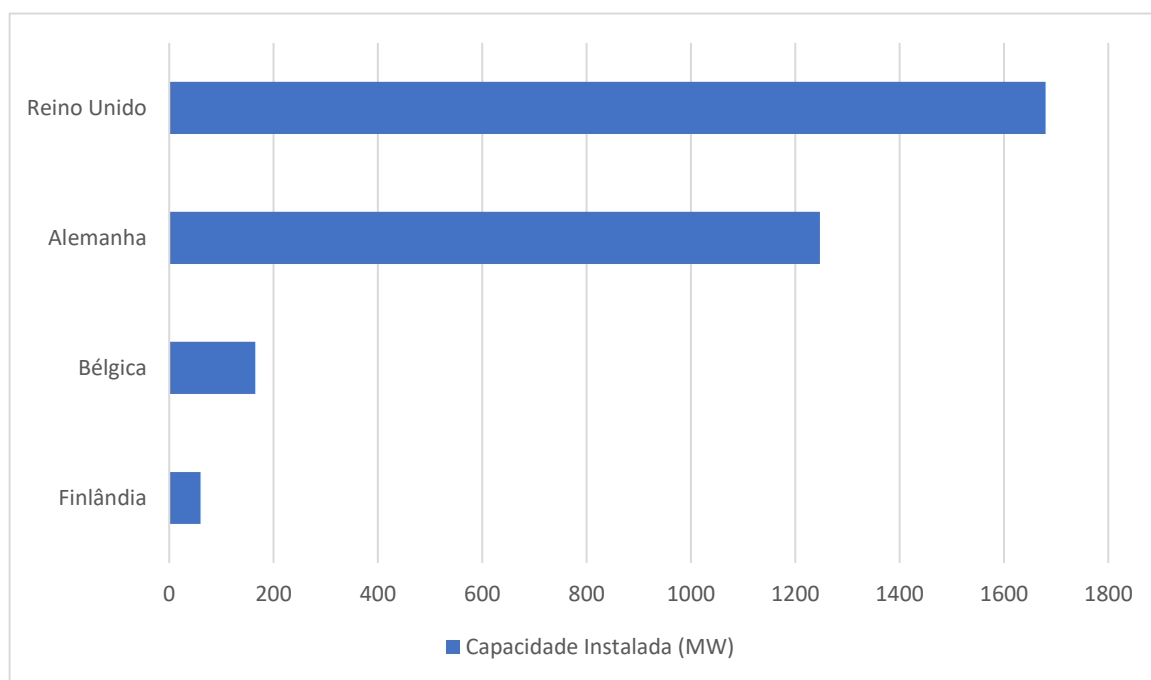
País	Projeto	Capacidade Nominal (MW)	Profundidade Média (m)	Distância Média da Costa (km)	Número de Turbinas	Capacidade da Turbina (MW)	Ano
Dinamarca	Vinderby	5	4	3	11	0,45	1991
Holanda	Lely	2	7,5	0,8	4	0,5	1994
Dinamarca	Tuno Knob	5	3	6	10	0,5	1995
Holanda	Irene Vorrink	16,8	2	0,1	28	0,6	1996
Suécia	Bockstigen	2,8	7	3	6	0,3	1998
Dinamarca	Middelgrunden	40	8	3	20	2	2000
Suécia	Utgrunden	10,5	7	7	7	1,425	2000
Reino Unido	Blyth	4	6	1	2	2	2000
Suécia	Yttre Stengrund	10	10	4	10	2	2001
Dinamarca	Horns Rev	160	10	16	80	2	2002

Fonte: Adaptado de Bilgili, Yasar e Simsek (2011)

Com o passar dos anos a tecnologia da geração eólica *offshore* vem sendo aprimorada, sendo implementada com menores custos e alta eficiência. Os países mais populosos encontraram nesse tipo de tecnologia uma forma de produzir energia limpa sem comprometer áreas terrestres úteis para subsistência da população, de modo que atualmente, por meio de políticas energéticas encorajadoras, a Alemanha, o Reino Unido e a China são detentores do maior potencial eólico *offshore* instalado do mundo.

Na Figura 11 é ilustrado o potencial eólico *offshore* instalado nos países europeus no ano de 2017. Baseado na Figura 11, nota-se que o Reino Unido, a Alemanha e a Bélgica atingiram o marco de países europeus com maior capacidade instalada, tornando-se assim referências em geração eólica *offshore*. Além desses países, a costa leste dos Estados Unidos e a China têm fortemente investido em seu potencial eólico *offshore* para expandir a sua matriz energética e diminuir a emissão de gases causadores do efeito estufa.

Figura 11: Potência eólica *offshore* instalada nos países europeus em 2017



Fonte: GWEC (2017)

Para o ano de 2020, Lupinacci (2022) confirmou a existência de 112 fazendas de aerogeradores em funcionamento no mundo e também o desenvolvimento de vários projetos, principalmente no Reino Unido e na Alemanha. A EPE (2018) relata

que o Instituto de Economia Agrícola (IEA) prevê uma redução dos custos para implantação dos parques eólicos *offshore* até o ano de 2040, incentivando assim cada vez mais a adesão desse tipo de tecnologia.

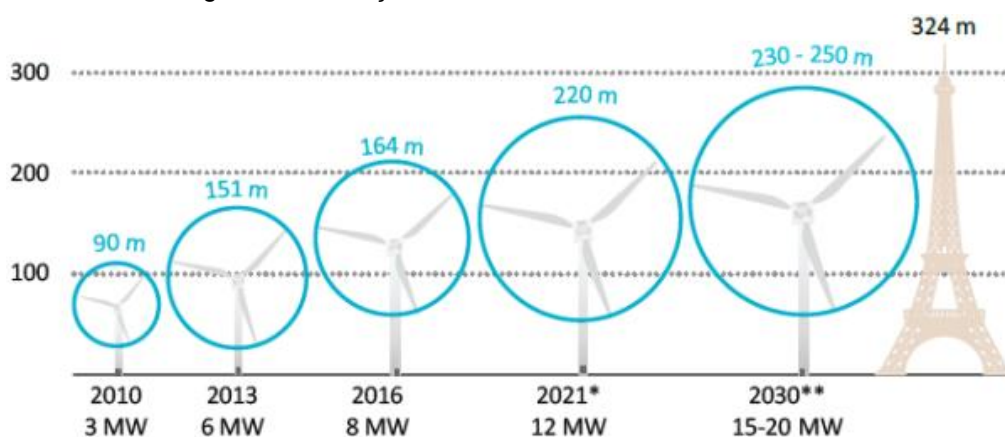
## 5 ASPECTOS TECNOLÓGICOS DA GERAÇÃO EÓLICA *OFFSHORE*

Neste capítulo serão abordadas as características das turbinas eólicas *offshore*, o efeito esteira, os tipos de fundações e a formas de conectar a geração eólica *offshore* ao sistema elétrico. Juntos, esses tópicos formam os principais aspectos tecnológicos que devem ser considerados antes da implementação de um empreendimento eólico *offshore*.

### 5.1 A TURBINA EÓLICA *OFFSHORE*

As turbinas eólicas do tipo *offshore* foram desenvolvidas baseadas nas turbinas eólicas *onshore*. No entanto, devido as peculiaridades do recurso eólico marinho, tem-se desenvolvido projetos com equipamentos específicos. As turbinas *offshore* estão sendo aperfeiçoadas regularmente, alcançando diâmetros impressionáveis com o intuito de reduzir os custos por cada MW instalado, conforme ilustrado na Figura 12. Baseado na Figura 12, constata-se que com o passar dos anos, as turbinas tiveram consideráveis aumentos em sua altura, área de varredura e tamanho físico, fatores estes diretamente proporcionais a capacidade de produção de energia. Outro ponto importante a ser mencionado, quanto às turbinas, é que pelo fato dos ventos do mar serem menos turbulentos, as pás conseguem girar mais próximas a linha base, ou seja, próxima a água. Com isso, todos os equipamentos devem ser projetados para resistir aos efeitos de corrosão, ondas e marés.

Figura 12: Evolução dos diâmetros das turbinas *offshore*



Fonte: Torres (2020)

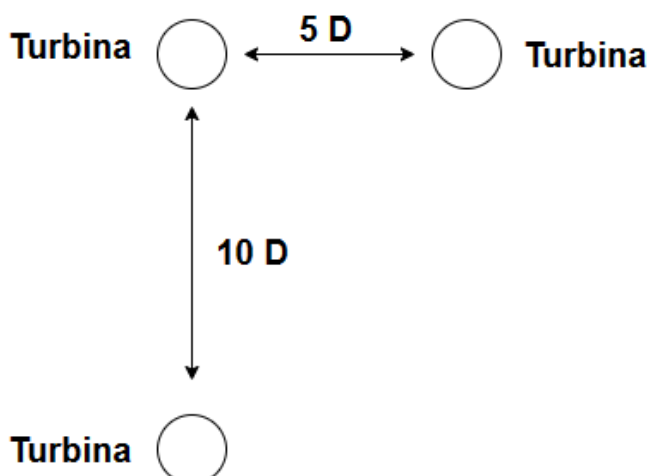
Segundo Oliveira (2019) o maior custo de investimento das turbinas eólicas *offshore* são provenientes das caixas de engrenagens, grandes causadoras de falhas em um aerogerador. Vale destacar que os sistemas elétricos e os geradores também apresentam elevadas taxas de falhas e demandam cerca de 170 h de manutenção durante o ano em que o aerogerador esteja em funcionamento.

### 5.1.1 O Efeito Esteira

Conforme passa pelas primeiras turbinas que compõem uma fileira de aerogeradores, o vento perde velocidade e prejudica a produção de energia das turbinas posteriores. Essa influência de uma turbina sobre a outra é chamado de efeito esteira.

O mal alinhamento entre as turbinas reduz em até cerca de 50% a geração de energia. Nesse sentido, é necessário que o *layout* do parque apresente uma distância mínima entre as turbinas, de modo a evitar as perdas pelo efeito esteira. Segundo Oliveira (2019), a distância entre as turbinas laterais será de 5 diâmetros e a distância entre as turbinas longitudinais, deverá ser equivalente a 10 diâmetros. Na Figura 13 é exemplificado o espaçamento entre as turbinas.

Figura 13: Espaçamento entre as turbinas



Fonte: Oliveira (2019)

## 5.2 FUNDAÇÕES

As fundações, também chamadas de estruturas de suporte, das turbinas eólicas *offshore* são diferentes das *onshore* visto que são implantadas no oceano e devem-se adaptar tanto as condições geológicas quanto aos diferentes níveis de profundidade. Essas estruturas encontradas logo abaixo do nível da água, devem ser dimensionadas de modo a garantir que a turbina esteja firme e consiga resistir aos constantes impactos oriundos das correntes marinhas e do vento.

Os critérios de escolha do tipo de fundação depende de parâmetros que envolvem a localização de instalação do parque eólico, velocidade máxima do vento, profundidade, situação do solo marinho, altura das ondas, dimensão e peso tanto da turbina eólica quanto da torre. De modo geral, as fundações eólicas *offshore* são classificadas de acordo com o modo de fixação no oceano – fixos ou flutuantes – e quanto à profundidade em que são instaladas.

### 5.2.1 Fundações fixas

As fundações fixas podem ser:

#### a) Monopilar:

Devido ao baixo custo e simplicidade, a fundação monopilar é o tipo mais empregado atualmente. Conforme pode ser visto na Figura 14 a), a fundação monopilar possui um único tubo metálico, com diâmetro que varia entre 3,5 e 4,5 m, cravado no fundo do mar e que não exige uma prévia preparação do solo marinho para ser fixada. Inicialmente esse tipo de fundação foi projetada para águas rasas com até 20 m de profundidade, mas a tecnologia evoluiu e, atualmente já é seguro utilizar a fundação monopilar em projetos de até 40 m.

#### b) *Tripod*:

Na Figura 14 b) é ilustrada a fundação *Tripod*. O *tripod* é um tipo de fundação que apresenta estruturas tubulares cravadas no fundo do mar, assim como os



monopilares, e que tem um tripé conectado ao tubo central, que por sua vez se conecta a torre eólica. Embora semelhantes às monopilares, são pouco utilizadas por terem um alto custo devido à quantidade de aço utilizada em sua estrutura e dificuldade logística.

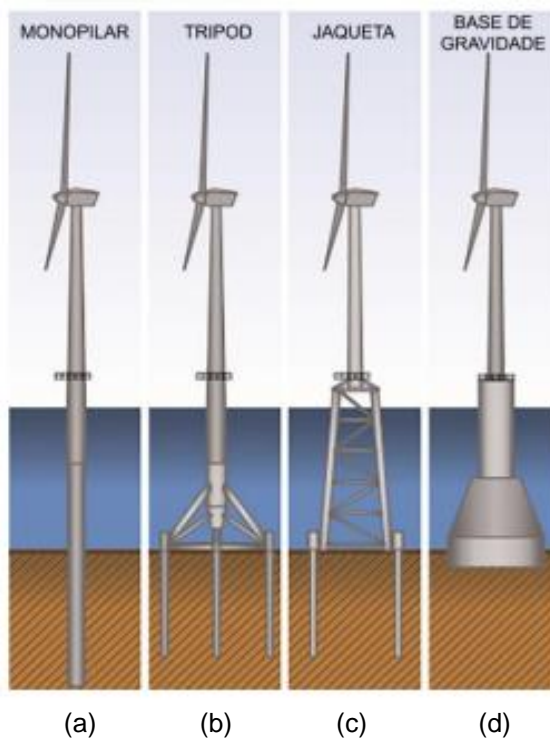
c) Jaqueta:

Conforme ilustrado na Figura 14 c), a fundação jaqueta possui uma estrutura com treliças quadriculares, fixadas no fundo do mar por meio de perfuração. A seção transversal dessa estrutura é mais robusta do que a monopilar, possuindo cerca de 600 toneladas e assim, suportando melhor as cargas provocadas pela ação dos ventos e das correntes marinhas. Embora seja estável para sustentação de turbinas e recomendada para águas profundas, esse tipo de fundação possui um elevado custo para ser construída.

d) Base de gravidade:

Na Figura 14 d) é representada a fundação base de gravidade, sendo esta constituída por uma estrutura de concreto e como o próprio nome já induz, utiliza a força da gravidade para acomodar o seu peso e fixar-se no fundo do mar de modo a resistir à ação do vento e das ondas. Seu uso é mais indicado em solos rochosos, duros e águas rasas com profundidade variando entre 15 e 30 m. Embora os custos de fabricação das fundações baseadas na gravidade sejam bem menores do que as monopilares, os custos de instalação podem ser elevados a depender da situação geológica do solo e conseqüentemente exigência de preparação (nivelamento, proteção para evitar corrosão e dragagem) do mesmo.

Figura 14: Fundações Fixas: (a) Monopilar, (b) Tripod, (c) Jaqueta, (d) Base de Gravidade



Fonte: Oliveira (2019)

e) *Tripile*:

Na Figura 15 é ilustrada a fundação *tripile*. Esta é composta por três tubos de aço em formato tubular, que vão até o fundo do mar, e uma peça de transição sob a qual é conectada a turbina eólica. Assim como a fundação Tripod, a fundação *tripile* possui alto custo e por esse motivo não é muito utilizada nos parques eólicos *offshore*.

Figura 15: Fundação tripile



Fonte: EPE (2020)

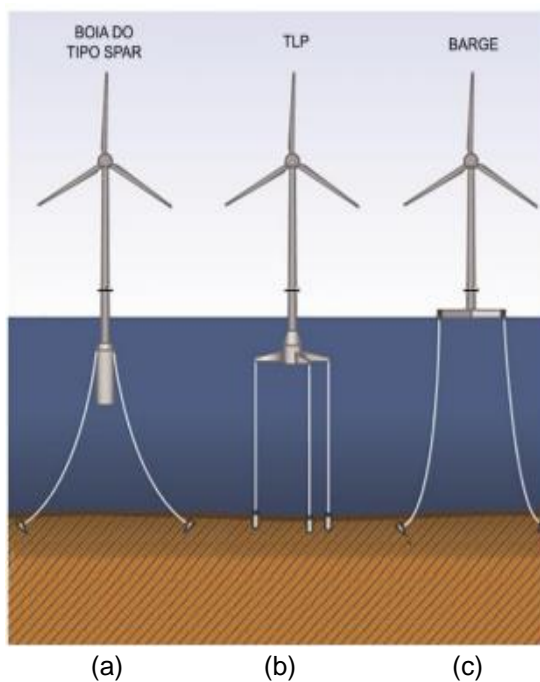
### 5.2.2 Fundações flutuantes

As fundações *offshore* flutuantes são empregadas em águas profundas, superiores a 50 m (BARBOSA, 2018). Diante disso, os tipos mais comuns dessas fundações são:

- a) Boia do tipo *Spar*: De acordo com a Figura 16 a), esse tipo de fundação flutuante é composta por um cilindro metálico, com interior oco, completamente preenchido por água e estabilizadas no mar por meio de âncoras ou linhas de base fixa;
- b) Plataforma TLP (do inglês, *Tension Leg Platform*) ou “perna de tensão”: Conforme pode ser visto na Figura 16 b), nesse tipo de fundação a estrutura flutuante é ancorada no leito marinho por meio de cabos tensionados, podendo ser montada na terra e depois transportada até o mar. Porém, devido à baixa estabilidade, a logística desse tipo de estrutura torna-se difícil;
- c) *Barge*: Esse tipo de estrutura é fixada no fundo do mar por meio de âncoras ou linhas de base fixas, conforme representado na Figura 16 c). Suas colunas realizam a estabilização hidrostática e também a fazem flutuar. Assim como a estrutura TLP, também podem ser montadas em terra e depois transportadas até o mar no entanto apresentam baixa resistência contra fortes ondas.

Em geral, pode-se classificar as plataformas flutuantes de acordo com o princípio que elas utilizam para manterem-se estabilizadas: flutuação (utilizado na estrutura *Barge*), linhas de amarração (utilizada na estrutura TLP) ou lastro (utilizado na estrutura Boia do tipo *Spar*).

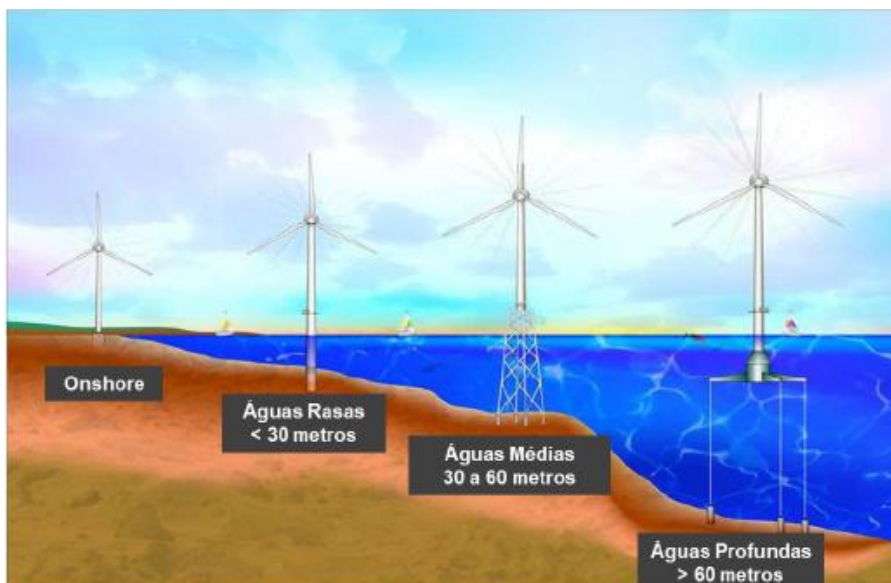
Figura 16: Fundações Flutuantes: (a) Boia do tipo Spar , (b) TLP, (c) Barge



Fonte: Oliveira (2019)

Na Figura 17 é representado os tipos de fundações de acordo com a profundidade. As fundações monopilares são predominantes em águas rasas, enquanto para águas médias e profundas predominam as do tipo jaqueta e TLP, respectivamente.

Figura 17: Estrutura *offshore* de acordo com a profundidade



Fonte: Silva (2019)

### 5.3 CONEXÃO DA GERAÇÃO EÓLICA *OFFSHORE* AO SISTEMA ELÉTRICO

O modo de transmissão da energia gerada nos parques eólicos *offshore* é um fator determinante para viabilidade do empreendimento e por isso a definição do tipo de transmissão a ser utilizado deve ser feito ainda na fase de elaboração do projeto. Os sistemas de transmissão mais comuns são Sistema de Transmissão em Alta Tensão em Corrente Alternada (do inglês, *High Voltage Alternating Current Transmission*) e Sistema de Transmissão em Alta Tensão em Corrente Contínua (do inglês, *High Voltage Direct Current Transmission*), sendo estes chamados de Sistemas HVAC e HVDC, respectivamente.

#### 5.3.1 Sistema de Transmissão em Alta Tensão em Corrente Alternada

O Sistema HVAC é o mais indicado para os parques eólicos *offshore* que estão a uma distância de até 80 km da costa (EPE, 2020). Sistemas de transmissão com comprimentos superiores a esse tornam-se pouco vantajosos pois são submetidos aos efeitos capacitivos dos cabos submarinos e como consequência disso, necessitam de compensação da potência reativa. De acordo com a Figura 18, o sistema de transmissão em CA é composto por cabos submarinos, subestação (SE) *onshore*, SE *offshore* e conexão ao sistema elétrico. Com relações aos cabos submarinos e às subestações *onshore* e *offshore*, pode-se destacar as seguintes características:

- Cabos submarinos:

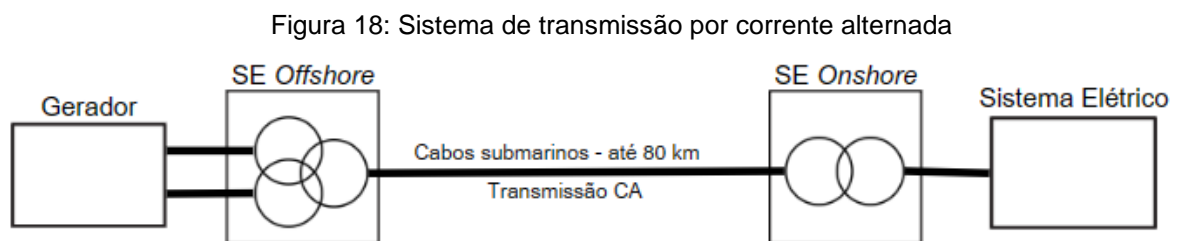
Em sistemas de transmissão em CA, as três fases devem-se unir compondo um único cabo trifásico. Esses cabos apresentam isolamento XLPE (Polietileno Reticulado) e toleram uma temperatura de até 90° para condições normais de funcionamento e 250° para situações de curto-circuito;

- Subestação *onshore* e *offshore*:

Uma central eólica *offshore* opera com nível de tensão entre 30 e 36 KV, porém

se a distância até a costa for grande, a transmissão tem que ser feita em um nível de tensão maior, o que implica na necessidade de uma subestação *offshore* com um transformador elevador para que a tensão seja de 100 a 220 KV. Além do transformador, a subestação também terá equipamentos para compensação de potência reativa, equipamentos de proteção e instrumentação (FERREIRA, 2019). Em contrapartida, caso a distância entre o parque e a costa seja menor do que 15 km e o empreendimento tenha uma potência inferior à 100 MW, o uso de equipamentos para compensação reativa não é necessário.

Quanto à subestação *onshore*, a mesma é utilizada para diminuir o nível de tensão da transmissão e igualá-lo à tensão da rede elétrica *onshore*.



Fonte: EPE (2020)

### 5.3.2 Sistema de Transmissão em Alta Tensão em Corrente Contínua

O Sistema HVDC é mais indicado para situações em que os parques eólicos encontram-se muito distantes da costa. Esse modo de transmissão tem perdas elétricas reduzidas e necessita de uma menor quantidade de cabos isolados. No entanto, necessitam de subestações conversoras e isso acarreta em um maior custo de infraestrutura quando comparado com o sistema de transmissão HVAC. De acordo com a tecnologia utilizada pelas SE conversoras, os sistemas de transmissão HVDC podem ser classificados como Sistema de Transmissão em Alta Tensão em Corrente Contínua com Comutação Convencional de Linha e Sistema de Transmissão em Alta Tensão em Corrente Contínua usando Conversores com Comutação Forçada.

a) Sistema de Transmissão em Alta Tensão em Corrente Contínua com Comutação Convencional de Linha

O Sistema de Transmissão HVDC-LCC (do inglês, *High Voltage Direct Current*

*Transmission with Line Conventional Commuted*) é também chamado de HVDC convencional e de acordo com Ferreira (2019), seus principais componentes são

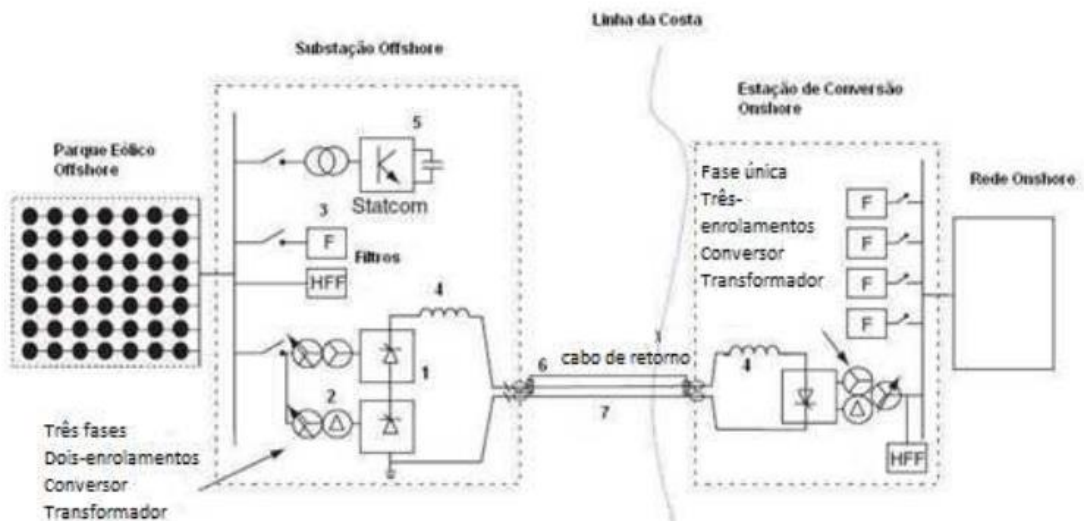
- Transformadores: Fazem com que o nível de tensão se adeque ao sistema e fornecem o isolamento galvânico entre o gerador e os tiristores;
- Filtro de corrente alternada: Juntamente com o banco de capacitores, esses filtros absorvem/fornecem potência reativa e também eliminam os harmônicos de tensão e corrente produzidos pelos conversores;
- Filtro de corrente contínua: Impedem que os harmônicos da corrente alternada cheguem até os cabos CC;
- Válvulas Tiristores: Garantem que a corrente alternada será convertida em corrente contínua e vice-versa;
- Bobinas de Alisamento: Possuem a função de um filtro de corrente contínua. As bobinas podem estar isoladas por ar ou óleo e dentro de um sistema de transmissão HVDC-LCC desempenham a função de reduzir as harmônicas de tensão, prevenir falhas ocasionadas pela comutação dos inversores e em caso de curto-circuito, reduzir a corrente de pico no cabo CC;
- Cabos de corrente contínua: Esses cabos podem ser revestidos por óleo ou com massa impregnada. Os cabos de massa impregnada são compostos por condutores de cobre, isolados por papéis encharcados em resina e óleo altamente viscoso. As camadas mais internas possuem papéis com carbono e as mais externas possuem uma espécie de tela entrelaçada com o cobre. Esses cabos possuem ainda proteção de polietileno extrudido para atuar contra a corrosão presente no ambiente. Já os cabos revestidos por óleo tem seu isolamento por meio de papéis encharcados em óleo com baixa viscosidade e suporta tensões de até 600 kV;
- Sistema para auxiliar compensação da potência reativa: Quando os parques eólicos *offshore* não conseguem entregar um nível de tensão estável para a central

conversora, faz-se necessário um sistema que auxilie a compensação da potência reativa. O sistema auxiliar mais conhecido é o compensador síncrono estático chamado STATCOM (do inglês, *Static Synchronous Compensator*), que não só produz energia reativa como também a consome e garante uma melhor estabilidade da conversão de tensão na estação conversora;

- Caminho de retorno: No sistema de transmissão HVDC é necessário que exista um caminho para a corrente de retorno. Esse caminho pode ser com a configuração monopolar, que utiliza um único cabo para transmitir energia e o retorno da corrente é feito por terra mediante a instalação de eletrodos nos extremos da linha de transmissão, ou com a configuração bipolar, que utiliza um condutor positivo e outro negativo e o ponto neutro na junção da unidade conversora é ligado à terra em ambos os lados.

O esquema de um empreendimento eólico *offshore* utilizando o sistema de transmissão HVDC-LCC pode ser visualizado na Figura 19.

Figura 19: Empreendimento eólico *offshore* utilizando Sistema de Transmissão HVDC - LCC



Fonte: Ferreira (2019)

Legenda da figura:

- 1- Válvula tiristores
- 2- Transformador/ Conversor



- 3- Filtro de Corrente Alternada
- 4- Bobinas de alisamento;
- 5- Sistemas auxiliares de compensação de potência reativa;
- 6- Filtro DC;
- 7- Cabo de corrente contínua com caminho de retorno integrado.

b) Sistema de Transmissão em Alta Tensão em Corrente Contínua com Conversor de Fonte de Tensão

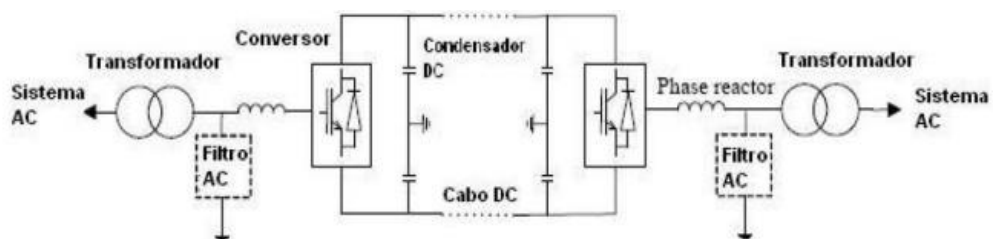
O Sistema de Transmissão HVDC-VSC (do inglês, *High Voltage Direct Current Transmission with Voltage Source Converter*) é também conhecido como sistema HVDC com conversão forçada e é a forma de transmissão mais recente, na qual os IGBTs (do inglês, *Insulated Gate Bipolar Transistor*) substituem os tiristores e, conseqüentemente, melhoram o controle da potência ativa e reativa da transmissão. De acordo com Ferreira (2019), esse tipo de transmissão é composto pelos seguintes equipamentos:

- Conversores utilizando IGBTs: A central conversora HVDC-VSC faz uso das válvulas IGBTs que são comutadas com frequências que atingem cerca de 2 kHz. Por esse motivo, a quantidade de harmônicos é reduzida e o tamanho dos filtros também. No entanto, o aumento de frequência provoca perda da eficiência do sistema, diminuindo a eficiência e aumentando perdas por efeito *joule*. Com isso, a escolha da frequência dos sistemas HVDC-VSC é um dos pontos mais importantes do projeto. Sobre questões de controle, esses conversores utilizam modulação PWM (do inglês, *Pulse Width Modulation*) que os possibilita eliminar os harmônicos e controlar de forma mais rápida a potência ativa e reativa em casos de oscilações na rede elétrica;
- Transformadores: São responsáveis por ligar os conversores à rede elétrica, adequar o nível de tensão e fornecer isolamento galvânico;
- Filtros de corrente alternada: Esses componentes são responsáveis por fornecer uma forma de onda senoidal, visto que o uso do PWM faz com que a tensão não tenha esse formato desejado. Sendo assim, esse processo contribui para que os harmônicos sejam reduzidos;

- Capacitores de corrente contínua: Têm a função de acumular a energia para equilibrar o fator de potência, facilitar o caminho para a corrente de retorno e restringir as oscilações de tensão, já que as falhas na rede em CA gera variações na tensão contínua;
- Indutância de acoplamento dos conversores: Fornece um filtro passa baixa ao PWM para bloquear as correntes harmônicas da frequência de comutação, as correntes de curto-circuito e também realizar um melhor controle das potências ativas e reativas;
- Cabo para transmissão HVDC-VSC: Os sistemas HVDC-VSC apresentam tecnologia com potência de até 1200 MW, configuração bipolar, tensão de aproximadamente 320 kV, cabos com proteção XLPE e que toleram uma temperatura de até 90°C. Esses cabos podem ser de alumínio ou cobre, possuem formato arredondado e são compostos por muitas fileiras de condutores. Comparados com os cabos HVDC LCC, os cabos HVDC-VSC possuem melhor qualidade térmica.

O esquema de um empreendimento eólico *offshore* utilizando o sistema de transmissão HVDC-VSC pode ser visualizado na Figura 20.

Figura 20: Empreendimento eólico *offshore* utilizando Sistema de Transmissão HVDC-VSC



Fonte: Ferreira (2019)

## 6 IMPACTOS DA GERAÇÃO EÓLICA OFFSHORE

Embora a geração de energia eólica *offshore* seja limpa, o seu uso gera impactos ambientais, sociais e econômicos. A seguir serão expostos os principais impactos atrelados a essa fonte de energia.

### 6.1 IMPACTO AMBIENTAL

Dentro de um empreendimento eólico *offshore* estão as fases de implantação, funcionamento, manutenção e descomissionamento. Todas essas fases trazem consigo impactos ambientais relevantes e que precisam ser previamente estudados. Relativo à fase de implantação, pode-se citar os impactos devido ao ruído gerado com a perfuração do solo marinho, a dragagem, posicionamento dos cabos e instalação dos aerogeradores. Já na fase de funcionamento e manutenção, o ecossistema marinho pode ser afetado pelo efeito do campo magnético, ruído aerodinâmico provocado pelo movimento das pás e constantes colisões contra as embarcações. Por fim, quando um parque eólico *offshore* necessita ser descomissionado, os impactos ambientais estão relacionados à retirada da estrutura pois conforme o tempo de vida útil do parque for passando, vida marinha vai se agregando às estruturas e novos ecossistemas são criados. Com isso, ao remover essas estruturas novos danos e impactos serão provocados aos organismos ali presentes.

#### 6.1.1 Ruídos

A geração eólica *offshore* emite, de forma geral, dois tipos de ruídos: o aerodinâmico, proveniente do movimento das pás, e o mecânico, provocado pelas partes mecânicas da nacela. Dentre os fatores que influenciam diretamente na formação do ruído estão a velocidade de rotação das pás, o formato das pás, a velocidade do vento e as características dos elementos mecânicos que constituem o aerogerador. Como forma de mitigar os impactos provocados pelo ruído, as turbinas mais atuais utilizam métodos antivibração e *design* cada vez mais sofisticados.

Caorsi (2018) diz que os ruídos antropogênicos são aqueles originados de modo abiótico, resultado das atividades humanas, como operação de máquinas e

transportes, por exemplo. Esse tipo de ruído influencia negativamente em processos vitais que vão desde a integridade do DNA (Ácido Desoxirribonucleico), até aspectos fisiológicos e comportamentais. Segundo Guimarães (2020), para uma mesma quantidade de energia o ruído subaquático é maior do que o atmosférico e com isso esse tipo de ruído tem causado transtornos para as espécies marinhas que dependem inteiramente da comunicação acústica. Na Tabela 3 é listada a percepção sonora de cada espécie em uma dada faixa de frequência. Como os ruídos antropogênicos geralmente estão abaixo da faixa de 1 kHz, muito influenciam na vida marinha e os efeitos resultantes dependerá da capacidade de adaptação e da sensibilidade auditiva de cada espécie.

Tabela 3: Faixa de frequência de percepção sonora para diferentes tipos de espécies

Espécies	Faixa de frequência de percepção sonora
<b>Humanos</b>	<b>20 Hz a 20 kHz</b>
<b>Aves</b>	<b>40 Hz a 9 kHz</b>
<b>Peixes (maioria)</b>	<b>30 Hz a 2 kHz</b>
Halobatrachus didactylus	50 Hz a 200 Hz
Pimephales promelas	800 Hz a 2 k Hz
<b>Mamíferos marinhos (maioria)</b>	<b>20 Hz a 200 kHz</b>
Baleias	10 Hz a 10 kHz
Baleias assassinas	< 100 kHz
Leões marinhos	1 kHz a 10 kHz
Focas	200 Hz a 3,5 kHz
Toninhas	10 kHz a 160 kHz
Golfinhos	2 kHz a 20 kHz
Estalar dos camarões ( <i>Snapping shrimp</i> )	2 kHz a 24 kHz
<b>Ruídos antropogênicos (maioria)</b>	<b>20 Hz a 1 kHz</b>

Fonte: Guimarães (2020)

### 6.1.2 Campo eletromagnético

Os cabos de transmissão, utilizados tanto para interligar os aerogeradores quanto para levar a energia produzida até a costa, produzem campos eletromagnéticos que impactam diretamente a vida marinha. Animais marinhos tais como as tartarugas e lagostas, conseguem se localizar e orientar em seus processos migratórios por meio do campo geomagnético. Desse modo, as espécies que são sensíveis a esses campos podem ficar desorientadas ou distraídas pela ação do

campo eletromagnético produzido nos cabos de transmissão.

### **6.1.3 Impacto na fauna e na flora marinha**

A comunidade bentônica é formada por várias espécies de animais, plantas e bactérias que habitam o fundo dos oceanos, rios e lagos. A compactação, a dragagem e a elevação da turbidez da água são processos típicos da fase de instalação dos aerogeradores e dos cabos submarinos de um parque eólico *offshore*, afetando negativamente a população de bentos, uma vez que esses organismos são extremamente sensíveis à situações abióticas que provoquem mudança na luz, temperatura e turbidez do seu *habitat*. No entanto, a formação de recifes artificiais em torno da estrutura dos aerogeradores tem criado um novo *habitat* para os bentos e contribuído para o aumento da biodiversidade marinha. Como forma de diminuir os impactos causado a fauna marinha, seria ideal optar por instalar os parques em áreas menos frágeis e que tivessem o substrato marinho mais pobre em biodiversidade.

Os mamíferos marinhos utilizam a audição para estabelecer comunicação, localização, orientação e busca por alimentos. Uma vez expostos aos ruídos, esses animais podem ficar desorientados e afastar-se daquela região prejudicando assim o equilíbrio do bioma. Como medida mitigadora dessa problemática tem-se evitado construir os parques em épocas do ano com maior índice de acasalamento e amamentação, utilizado cortina de bolhas para atenuar os efeitos sonoros e a fixação das estruturas tem sido realizada de forma gradual para que os animais entendam a interferência no local.

Com relação aos impactos que os parques eólicos *offshore* oferecem à avifauna, ainda não é possível mensurar com exatidão devido a dificuldade em identificar as colisões e resgatar os corpos mortos no mar. Perante o exposto, os impactos na avifauna precisam ser melhor estudados, visto que há um planejamento para o aumento da instalação de turbinas nos próximos anos e isso poderá causar impactos principalmente naquelas espécies com menor população e, conseqüentemente, maior risco de extinção.

## **6.2 IMPACTO SOCIAL**

A alteração da paisagem, a possível deterioração de patrimônio cultural e a restrição de atividades marinhas são os impactos sociais mais comuns ao instalar um parque eólico *offshore*. É difícil mensurar o tamanho do impacto visual provocado por um empreendimento *offshore*, pois esse é um fator pessoal, depende da percepção de cada indivíduo. Comparado com os critérios visuais dos parques eólicos *onshore*, os parques *offshore* costumam ser mais aceitos por serem instalados distantes da costa e essa já é uma forma de mitigar o problema. Sob essa perspectiva, para favorecer a diminuição dos impactos visuais, a escolha da área de instalação do parque deve considerar a distância da costa, a alteração da paisagem e os efeitos gerados na população local.

Quanto à degradação do patrimônio cultural ou impacto arqueológico, este ocorre principalmente na fase de instalação do parque eólico *offshore* quando a movimentação do solo marinho pode recobrir artefatos antigos impedindo-os de serem descobertos ou até mesmo destruí-los. No que diz respeito a outras atividades do mar, os parques eólicos *offshore* podem causar impactos na atividade pesqueira, telecomunicações e transporte. Os sistemas de telecomunicação utilizados na navegação e aviação podem sofrer interferência, bem como a atividade pesqueira talvez precisem ser deslocada devido a instalação das turbinas e as atividades de iatismo e mergulho podem tornar-se inadequadas para aquele local.

### 6.3 IMPACTO ECONÔMICO

Os empreendimentos eólicos *offshore* apresentam inúmeros benefícios econômicos. Dentre eles pode-se citar o aumento na geração de empregos nas fases de instalação e manutenção dos parques durante todo o período em que estes estiverem funcionando.

De acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (2018), a geração eólica *onshore* brasileira produz impactos positivos às comunidades locais devido aos investimentos em projetos sociais, culturais, que promovem a saúde e também conscientização ambiental. Vale lembrar que quando os empreendimentos eólicos possuem financiamento pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), torna-se obrigatório que um percentual do investimento seja direcionado às causas sociais. Essas causas sociais abrangem qualificação da mão de obra da

comunidade local, aumento da oportunidade de empregos, inclusão digital, entre outros. Dessa forma, os parques eólicos *offshore* contribuem para o desenvolvimento da população.

## 7 NORMAS E REGULAMENTAÇÕES DO SETOR EÓLICO *OFFSHORE*

Neste capítulo serão apresentados os principais aspectos regulatórios da geração eólica *offshore*. Sendo assim, será possível conhecer a forma como os países europeus consolidaram essa tecnologia em suas matrizes energéticas e como esse conhecimento servirá de apoio para definir a regulamentação eólica *offshore* brasileira.

### 7.1 PAÍSES EUROPEUS

A geração eólica *offshore* recebeu os primeiros incentivos em 1992, por meio da Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas e na adesão ao Protocolo de *Kyoto*. A fim de cumprir os objetivos definidos no protocolo, a União Europeia decidiu investir fortemente em fontes de energia limpa, tanto marinhas quanto terrestres. Devido à limitação de espaço, os países europeus criaram as legislações nacionais para implantação e utilização da energia eólica *offshore*.

O Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia elaboram as Diretivas, definindo o objetivo geral que os países da união europeia devem atingir. Segundo Vasconcelos (2019), as diretivas sugeridas pela União Europeia para serem consideradas dentro da legislação de cada país membro são:

- Diretiva 92/43/CEE – relativa à conservação dos *habitats* naturais, da fauna e flora selvagens;
- Diretiva 2001/42/CE – relativa à avaliação dos efeitos de determinados planos e programas ambientais;
- Diretiva 2004/35/CE – relativa à responsabilidade ambiental em termos de prevenção e reparação de danos ambientais;
- Diretiva 2006/21/CE – relativa à gestão de resíduos de indústrias extrativas;
- Diretiva 2009/28/CE – relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis;
- Diretiva 2009/147/CE – relativa à conservação das aves selvagens;
- Diretiva 2014/24/UE – relativa a contratos públicos;
- Diretiva 2014/52/UE – relativa à avaliação dos efeitos de determinados projetos públicos e privados no ambiente;



Baseando-se nas Diretivas estabelecidas pela União Europeia, cada país é livre para instituir sua própria legislação e traçar as formas para cumprir as metas estabelecidas.

A seguir serão abordadas as legislações de três países europeus: Dinamarca, Reino Unido e Alemanha. Optou-se por analisar os aspectos regulatórios desses países pois o primeiro foi pioneiro na instalação de aerogeradores no mar, o segundo possui a maior capacidade instalada e o terceiro apresentou o maior crescimento nos últimos cinco anos (CORREIA, 2021). Juntos, somam a maior capacidade eólica *offshore* instalada no continente europeu.

### 7.1.1 Dinamarca

A carência de áreas para instalação de parques eólicos *onshore*, a demasiada quantidade de águas rasas no oceano dinamarquês e o potencial eólico *offshore*, fizeram com que a Dinamarca, em 1991, construísse o primeiro parque eólico *offshore* no mundo. O primeiro parque foi o *Vindeby Offshore Wind Farm*, composto por 11 turbinas de 450 kW cada. Em seguida, vieram *Horns Rev I* com 160 MW de capacidade instalada e *Nysted* com capacidade de 165 MW.

Em 1995, um comitê liderado pela DEA (do inglês, *Danish Energy Agency*) foi criado pelo governo dinamarquês com o propósito de planejar o desenvolvimento de empreendimentos eólicos *offshore*. Em 1997, criou-se o Plano de Ação para Parques Eólicos *Offshore*, com o intuito de sugerir que os empreendimentos fossem desenvolvidos em áreas específicas e que fosse realizado um programa que demonstrasse a investigação dos efeitos ambientais dos parques eólicos *offshore* em grande escala.

No começo, o programa selecionou cinco áreas distintas. No entanto, três delas foram eliminadas devido às restrições de rota de navegação e por oferecer impactos ambientais graves. Nas outras duas áreas restantes, foram colocados em prática o programa de monitoramento.

Segundo Vasconcelos (2019), no ano de 2007 o Comitê publicou o relatório *Future Offshore Turbine Wind Locations – 2005*, no qual 23 locais específicos e com área de 44 km<sup>2</sup> foram examinados para instalação de empreendimento eólico *offshore*. No entanto, em 2011, um novo relatório precisou ser publicado devido à aparição de

novos interesses e alterações estruturais ocasionada pela construção de pontes e eletrodutos. Desse modo, viu-se que o mapeamento das áreas de instalação dos parques eólicos *offshore* é algo dinâmico e que está em constante mudança.

Em 2012, foi iniciado um processo de planejamento com o objetivo de identificar as áreas mais apropriadas para instalação dos parques eólicos *offshore* próximos à costa. Além desses locais *offshore*, por meio de um mapeamento realizado em 2011, constatou-se que 15 locais próximos à costa apresentavam a capacidade instalada de até 200 MW cada. Para evitar conflitos ambientais em um futuro próximo, os 15 locais foram submetidos a uma Avaliação Ambiental Estratégica (AAE). A avaliação ajudou a determinar se esses locais eram adequados para instalação dos parques eólicos e quais as medidas mitigadoras deveriam ser implementadas para minimizar os efeitos negativos causados à vida marinha.

De acordo com Correia (2021), a partir de 2016, a organização do espaço para empreendimentos *offshore*, incluindo parques eólicos, está sob a regulamentação da Lei do Ordenamento do Território Marítimo (Lei nº 615 de 8 de junho de 2016), responsável por estabelecer o planejamento de atividades marítimas e instalações *offshore*. Essa lei é responsável por garantir uma gestão sustentável das atividades *offshore*, considerando aspectos ambientais, econômicos e sociais.

Na Dinamarca, existem dois procedimentos adotados para conceder áreas destinadas à construção de parques eólicos *offshore* dentro da ZEE do país. Esses procedimentos são conhecidos como *open door* e leilão.

O *open door* é um tipo de concurso, no qual o governo dinamarquês faz o lançamento de um edital designando a área e a capacidade instalada que o parque eólico *offshore* deverá ter. Esse método consiste em um empreendedor apresentar seu projeto voluntariamente a um regulador, para que o mesmo avalie e conceda a permissão dos estudos preliminares por tempo determinado. Nesse processo, não são especificados os locais particulares para instalação dos empreendimentos eólicos *offshore* e assim que a DEA recebe uma solicitação de estudo prévio, realiza a análise da área para qual a permissão foi solicitada para comprovar se a mesma é adequada à produção de energia. É importante destacar que não são permitidas as solicitações de pesquisas em áreas já pertencentes ao planejamento do governo e além de serem responsáveis por identificar áreas com novos potenciais eólicos, os empreendedores devem arcar com os gastos inerentes aos estudos ambientais. Dessa forma, conclui-

se que o *open door* se trata de um processo que não envolve concorrência.

No caso do leilão, a autoridade reguladora efetua os estudos preliminares na área que deseja-se instalar o parque eólico e posteriormente, o licitante vencedor reembolsa o governo com a quantia que foi gasta para realização das investigações. Para serem considerados qualificados, os concorrentes do leilão devem possuir qualificações técnicas, financeiras e econômicas e no final, o vencedor recebe a autorização para ser o responsável pela instalação e pelo funcionamento o parque eólico.

A DEA é a autoridade responsável por emitir a outorga de autorização nas fases de planejamento, construção, integração à rede elétrica e operação dos parques eólicos *offshore* dinamarqueses. De acordo com as informações apresentadas pela DEA (2017) para o desenvolvimento de um empreendimento eólico *offshore* na Dinamarca, tanto com o método *open door* quanto por meio de concurso, são exigidas quatro permissões que são concedidas progressivamente para um local específico, dependendo da conclusão de cada fase do empreendimento:

- a) Licença para conduzir estudos preliminares;
- b) Licença para instalação dos aerogeradores *offshores*, com exigência de elaboração do Relatório de Impacto Ambiental (RIA) do empreendimento;
- c) Licença para explorar e produzir energia elétrica por meio de fonte eólica *offshore* por vinte e cinco anos, com possibilidade de prorrogação;
- d) Licença para geração de energia elétrica.

Segundo Vasconcelos (2019), as três primeiras licenças seguem a Lei de Promoção das Energias Renováveis e a última licença é regida pela Lei sobre Fornecimento de Energia Elétrica da Dinamarca.

Conforme estabelecido pela Lei de Promoção das Energias Renováveis, é obrigatória a realização do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) para os projetos de instalação de parques eólicos *offshore*. É imprescindível que o EIA esteja acessível previamente à autorização dos projetos *offshore* que possuem um impacto ambiental expressivo. A análise do impacto ambiental, conforme a situação específica, busca reconhecer, explicar e julgar de forma adequada os efeitos da implantação de um projeto, segundo os fatores:

- Impactos causados à fauna, à flora e à sociedade;
- Impactos causados ao solo, fundo do oceano, paisagem e clima;

- Impactos causados ao patrimônio cultural;
- Interação entre todos os impactos citados anteriormente.

A legislação BEK no 68 de 26/01/2012 é a responsável por reger os estudos ambientais exigidos na Dinamarca e a partir disso os relatórios ambientais devem conter os seguintes tópicos:

- Descrição do projeto, incluindo, em particular: Descrição das características físicas de todo o projeto e as necessidades de uso da terra durante as fases de construção e operação, a descrição das características essenciais dos processos de produção, tipo e quantidade de materiais utilizados e também a estimativa do tipo e quantidade de resíduos e emissões esperados na operação do projeto proposto;
- Visão geral das principais alternativas examinadas pelo empreendedor e informações sobre os principais motivos da escolha, levando em consideração o impacto ambiental;
- Descrição das consequências do possível cancelamento do projeto em questão;
- Descrição do ambiente que poderia ser significativamente afetado pelo projeto proposto, em particular: população, fauna, flora, solo e fundo do mar, água, ar, condições climáticas, bens materiais incluindo o patrimônio arquitetônico e arqueológico, segurança da paisagem e costa, e a inter-relação dos fatores citados anteriormente;
- Descrição do impacto no meio ambiente que o projeto pode causar: Essa descrição deve indicar os efeitos diretos e, se for o caso, seus efeitos indiretos, secundários, cumulativos, em curto e longo prazo, definitivos ou temporários, bem como positivos ou negativos. A descrição deve incluir como pode-se coexistir com outras partes interessadas no mar;
- Descrição das medidas previstas para evitar, reduzir e, sempre que possível, neutralizar os efeitos prejudiciais significativos no ambiente;
- Descrição das consequências socioeconômicas dos impactos ambientais do projeto;
- Descrição das partes envolvidas na preparação do relatório de Análise de Impacto Ambiental (AIA) e no planejamento do projeto;
- Resumo não técnico das informações apresentadas, com base nos pontos referidos anteriormente;
- Visão geral de quaisquer dificuldades (deficiências técnicas ou falta de conhecimento) encontradas pelo empreendedor na coleta das informações necessárias (GUIMARÃES, 2020).

### 7.1.2 Reino Unido

Fruto de um projeto experimental, em dezembro de 2002, o *Blyth Offshore Wind* foi o primeiro parque eólico *offshore* a ser instalado no Reino Unido. Ele foi instalado na costa de Blyth, era constituído por duas turbinas de 2 MW cada e foi descomissionado no ano de 2019. Em 2003, entrou em funcionamento o primeiro parque eólico *offshore* comercial. O mesmo chamava-se *North Hoyle* e continha 30 aerogeradores de potência semelhante à do projeto experimental.

A tática para impulsionar a geração eólica *offshore* no Reino Unido está diretamente ligada às obrigações assumidas pelo governo em relação às metas definidas pela União Europeia em reduzir os impactos que provocam as transformações climáticas e, conseqüentemente, um maior investimento em fontes de energia limpa. Em contrapartida, vale salientar que atualmente os compromissos estabelecidos entre União Europeia e Reino Unido não possuem mais validade legal pois este não pertence mais ao bloco.

A Lei de Acesso Marinho e Costeiro (do inglês, *Marine and Coastal Access Act*) é a atual responsável por estruturar o planejamento do território marinho britânico e fundar a MMO (do inglês, *Marine Management Organisation*). A MMO tem como objetivo proteger e melhorar o ambiente marinho britânico, além de apoiar o crescimento econômico do Reino Unido através do desenvolvimento de atividades marinhas sustentáveis (CORREIA, 2021).

Todos os países integrantes do Reino Unido (País de Gales, Inglaterra, Escócia e Irlanda do Norte) adotaram a MPS (do inglês, *Marine Policy Statement*) com o propósito de guiar na criação de projetos marinhos e na escolha de soluções aos impactos à zona marinha do Reino Unido. A MPS fornece diversas formas de utilização do ambiente marinho do Reino Unido, apontando os principais impactos a serem considerados no planejamento dos projetos nesse ambiente.

O procedimento para implementação da geração eólica *offshore* no Reino Unido tem sido feito por meio de processos licitatórios que funcionam por rodadas (do inglês, *rounds*) e concedem a licença permitindo a implantação dos parques eólicos no mar.

Na Inglaterra, Irlanda do Norte e País de Gales, o TCE (do inglês, *The Crown Estate*) é o órgão responsável por cuidar dos direitos de gerar energia limpa na Zona de Energia Renovável (ZER) e por gerenciar todo o solo marinho até o limite de 12 milhas náuticas. Já na Escócia, esse gerenciamento é realizado pela entidade *The Crown Estate Scotland*. Sendo assim, o empresário que desejar alugar uma área para instalar um parque eólico *offshore* deverá fazer isso por meio de *rounds* juntamente com o *The Crown Estate* ou com o *The Crown Estate Scotland*.

A entidade reguladora que concede a construção de parques eólicos *offshore* depende da potência que pretende-se instalar. Para os parques que tenham até 100 MW, o MMO é a entidade reguladora responsável. Uma vez ultrapassada essa

potência instalada, cada país do Reino Unido terá órgãos regulamentadores específicos.

Para os parques eólicos *offshore* superiores a 100 MW de potência instalada, localizados no País de Gales e na Inglaterra, a Lei de Planejamento de 2008 classifica-os como Projetos de Infraestrutura Nacionalmente Significativos e por isso são investigados por meio da Inspeção de Planejamento. Posteriormente são encaminhados à Secretaria de Estado do Departamento de Negócios, Energia e Estratégia Industrial para que a permissão de instalação do parque eólico possa ser aceita ou recusada.

Já para os parques eólicos *offshore* superiores a 100 MW de potência instalada localizados na Escócia, a Marinha escocesa avalia as solicitações para construção dos parques e depois encaminha os pedidos para que os ministros possam aprovar ou reprová-los, baseados na Lei Marítima Escocesa de 2010 (para os parques instalados em até 12 milhas náuticas de distância da costa) ou na Lei de Acesso Marítimo e Costeiro de 2009 (para os parques instalados de 12 até 200 milhas náuticas de distância da costa).

Quanto à Irlanda do Norte, a obtenção de permissão para construir os parques eólicos *offshore* acima de 100 MW é gerenciado pelo grupo de Estratégia Marinha e Licenciamento, pertencente ao Ministério da Agricultura, Ambiente e Assuntos Rurais.

Segundo Guimarães (2020), as etapas preliminares à construção dos parques eólicos *offshore* no Reino Unido exigem o EIA. A coleta de dados necessária para realizar os estudos podem levar até 2 anos e as principais investigações dizem respeito à comunidade bentônica, mamíferos marinhos, processos de erosão, processos de sedimentação, meteorológicos e questões sociais.

### **7.1.3 Alemanha**

O *Alpha Ventus Offshore Wind Farm* foi o primeiro parque eólico *offshore* alemão a ser instalado e iniciou o seu funcionamento em abril de 2010. O parque possuía 12 aerogeradores de 5 MW e foi instalado à uma distância de 60 km da costa. Atualmente, o setor *offshore* da Alemanha tem-se desenvolvido rapidamente e isso levou o país a tornar-se um dos maiores em potência instalada no mundo.

Devido aos avanços tecnológicos que têm acompanhado o setor *offshore*, as

particularidades dos parques eólicos *offshore* alemães são muito distintas. O país possui desde parques instalados a 20 km de distância da costa até parques situados a mais de 100 km de distância. Mas de um modo geral, os parques são implantados em distâncias de até 62 km da costa e profundidade de 29 m. Com relação ao tipo de estrutura, predominam as monopilares, as jaquetas e as tripé.

Considerando o cenário de transição energética, no ano de 2005, a Agência Federal Marítima e Hidrográfica da Alemanha (AFMHA) começou o planejamento do espaço marinho de toda ZEE alemã. Com isso, ainda no ano de 2009, foi lançado o planejamento marinho da ZEE do mar Báltico e do Mar do Norte com o propósito de impulsionar o crescimento da energia eólica *offshore*, identificar as áreas com maior potencial e assegurar que a transmissão da energia até a costa seria eficiente. Os principais pontos do planejamento inclui questões de transporte, utilização dos recursos oceânicos, pesquisas, geração eólica *offshore* e proteção ao ecossistema marinho.

À princípio, a Alemanha aderiu ao modelo FCFS (do inglês, *First Come, First Served*) para conceder a permissão de construção dos parques eólicos *offshore* aos interessados. Nesse primeiro momento os empresários eram livres para escolher o local de instalação mas em 2009, o país decidiu reunir os dados do potencial eólico de toda ZEE para que fosse feita a demarcação das melhores áreas para implementação da tecnologia *offshore*.

O processo de concessão para implantação dos parques eólicos *offshore* varia conforme a localização de instalação dos empreendimentos. As autoridades estaduais avaliam os projetos que estão a uma distância de até 12 milhas náuticas da costa e a AFMHA é responsável por analisar os parques que estão em distâncias superiores a 12 milhas náuticas da costa.

Para participar do processo que permite a instalação de parques eólicos *offshore* na Alemanha, as seguintes etapas deverão ser realizadas:

- Submissão das documentações à AFMHA;
- A AFMHA avalia as documentações que foram submetidas para verificar se são suficientes ou se precisam ser revisadas pelo requerente;
- A AFMHA realiza uma conferência para consultar grupos e órgãos ligados à geração eólica, transporte marítimo, pesca e preservação ambiental;
- O comentário dos grupos e órgãos são analisados para que sejam definidos os

estudos a serem feitos para dar prosseguimento ao processo;

- É realizado uma segunda rodada com os órgãos da marinha, preservação ambiental, setor eólico e de pesca;
- Ocorre uma conferência com o empreendedor interessado para que o mesmo possa apresentar o projeto e a estrutura dos estudos que deverão ser realizados;
- O empreendedor interessado em construir o parque eólico *offshore* deve apresentar um EIA, caso os parques tenham mais do que 20 aerogeradores superiores a 50 metros, e um estudo de impactos no transporte marítimo (risco de colisões com as embarcações, por exemplo);
- Os estudos realizados anteriormente são enviados para AFMHA;
- A AFMHA faz a divulgação desses estudos e realiza consulta pública;
- A AFMHA faz a revisão das questões relativas ao EIA, enquanto a Diretoria de Hidrovias e Navegação faz a análise do Estudo de Impacto ao Transporte Marítimo, a fim de verificar se tudo está em conformidade;
- Por fim, a licença de construção do parque eólico *offshore* é emitida.

Sabendo-se que o Estudo de Impacto Ambiental é indispensável para permissão de construção do parque eólico *offshore*, a AFMHA orienta que os estudos ambientais abordem questões de ruído subaquático, comunidades bentônicas, mamíferos marinhos, paisagem e peixes. Além disso, a Alemanha apresenta normas que devem ser seguidas com o objetivo de conduzir as pesquisas, estudos e até *design* do empreendimento. São elas:

- *Standard Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt*. Essa norma trata da análise dos impactos ambientais que os aerogeradores oferecem ao ecossistema marinho;
- *Standard Baugrunderkundung für Offshore-Windenergieparks*: Essa norma inclui as exigências mínimas para investigações geotécnicas e análises das plataformas *offshore* e cabos elétricos;
- *Standard Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen*: Essa norma apresenta as exigências mínimas para implantar os parques eólicos *offshores* dentro da ZEE alemã.



## 7.2 BRASIL

Os parques eólicos *offshore* ainda não são uma realidade no Brasil. No entanto, a geração eólica *offshore* já encontra-se em pleno desenvolvimento e o Brasil é atualmente o país latino americano com a maior potência eólica *onshore* instalada GWEC (2021). Segundo Pereira (2017), o Brasil possui profissionais altamente qualificados no setor eólico, tornando-o referência na instalação de aerogeradores e fazendo com que o mesmo esteja apto a investir na geração eólica *offshore*.

O atual potencial técnico eólico *offshore* brasileiro é calculado em 1.064,2 GW. Já o potencial ambiental e social, o mais restrito e que acumula todas as limitações, atingiu 330,5 GW. Somente este último nível de potencial representa, atualmente, o dobro da potência total instalada no Brasil e mais de 20 vezes a capacidade instalada de energia eólica *onshore* (SILVA, 2019). Essas informações comprovam quão rico é o recurso eólico *offshore* do Brasil e apontam mais ainda para a necessidade de identificar os fatores que impedem a instalação das primeiras turbinas no mar.

A ausência de uma estrutura regulamentatória para desenvolver a geração eólica *offshore* em território brasileiro é um fator limitante a esse tipo de tecnologia, pois ocasiona insegurança jurídica aos investidores nacionais e internacionais. No entanto, embora os parques eólicos *offshore* ainda não tenham sido realmente instalados no Brasil, segundo IBAMA (2022) um total de 70 empreendimentos abriram processo de licenciamento ambiental federal.

De acordo com a Federação das Indústrias do Rio Grande do Norte (2022), o Brasil possui atualmente 196 GW de potência total instalada, considerando todas as fontes de energia que compõem a matriz energética do país. Essa potência total instalada, aproxima-se dos 176,58 GW de potência total que os 70 empreendimentos *offshore* cadastrados podem gerar. Com isso, pode-se ver com maior clareza o potencial eólico *offshore* apresentado pela “Amazônia Azul” brasileira.

Vale ressaltar que já foram iniciados projetos de lei com o objetivo de ampliar o desenvolvimento energético brasileiro. Especificamente o Projeto de Lei nº 11.247/18, que já obteve aprovação junto ao Senado, tem o intuito de ampliar os deveres associados à Política Nacional de Energia, sendo esta um conjunto de diretrizes que guiam o setor energético brasileiro, a fim de propiciar o amadurecimento da geração eólica *offshore* tanto em mar territorial quanto nas áreas da ZEE brasileira.

## 8 DESAFIOS E IMPASSES PARA IMPLANTAÇÃO DA GERAÇÃO EÓLICA OFFSHORE NO BRASIL

Esse capítulo irá abordar as questões atreladas ao licenciamento ambiental e aos custos, sendo estes os principais desafios e impasses encontrados para implantação da geração eólica *offshore* no Brasil.

### 8.1 LICENCIAMENTO AMBIENTAL DO SETOR EÓLICO OFFSHORE BRASILEIRO

O licenciamento ambiental é o procedimento administrativo por meio do qual o órgão ambiental competente autoriza a localização, a instalação, a ampliação e a operação de empreendimentos e atividades que utilizem recursos naturais, que sejam efetiva ou potencialmente poluidoras ou que possam causar degradação ambiental (EPE, 2020).

No Brasil, o processo de licenciamento ambiental é regido pelo Decreto nº 99.274/1990 e possui uma abordagem em três fases: Licença Prévia (LP), Licença de Instalação (LI) e Licença de Operação (LO), conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21: Etapas do licenciamento ambiental no Brasil



Fonte: EPE (2020)

Atualmente, não existe leis exclusivas para os empreendimentos eólicos *offshore* no Brasil. Entretanto, conforme o Decreto nº 8.437/15, que define os regulamentos da Lei Complementar nº 140/11, o IBAMA é o órgão responsável por conceder o licenciamento ambiental aos empreendimentos.

A análise dos impactos ambientais, para concessão de licenciamento

ambiental, dos empreendimentos eólicos *offshore* no Brasil, deve ser realizada mediante um EIA e complementado com seu respectivo RIMA, segundo a Resolução Conama nº 01/1986. Já para os empreendimentos que oferecem baixos potenciais de poluição, a avaliação ambiental exige que seja apresentado apenas um Relatório Ambiental Simplificado (RAS), para obtenção da LP.

A Ficha de Caracterização de Atividade (FCA) contém as características técnicas do empreendimento eólico *offshore* e a partir dela o órgão ambiental define o tipo de estudo a ser realizado. Além disso, tanto os dados descritos na FCA quanto outros adquiridos por meio de visita técnica, são utilizadas para construir o Termo de Referência (TR). O TR é um documento expedido pelo órgão ambiental e serve como um guia para elaboração do EIA/RIMA ou do RAS.

Outros órgãos federais também devem estar envolvidos na etapa de licenciamento ambiental do empreendimento eólico *offshore*, segundo a Portaria Interministerial nº 60/2015, sendo eles a Fundação Nacional do Índio (FUNAI), o Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), a Fundação Cultural Palmares (FCP) e a Secretaria de Vigilância em Saúde do Ministério da Saúde (SVS/MS). Eles são coordenados pelo IBAMA e devem orientar os empreendedores a realizar investigações específicas sobretudo em áreas de proteção indígena e quilombola, áreas de proteção de bens culturais e locais propícios à aparição de malária.

O licenciamento ambiental ainda deve abordar questões pertinentes à conexão do parque eólico *offshore* até a subestação *onshore*, para que seja emitido uma certidão de permissão de uso do solo, juntamente aos municípios, para os casos em que as linhas de transmissão estejam no continente. Essa certidão deverá ser apresentada ao órgão responsável pelo licenciamento, para que seja obtida a LP.

Vale lembrar que para obtenção da LP, deverão ainda ser feitas audiências públicas respeitando a Resolução Conama nº 09/1987, e para os casos com licenciamento ambiental simplificado, as consultas públicas devem ocorrer segundo a Resolução Conama nº 279/2001. Ainda sobre licenciamento, o IBAMA deverá solicitar parecer técnico à Marinha do Brasil e ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio).

O envolvimento do ICMBio no licenciamento de empreendimentos eólicos *offshore* faz-se necessário pois os projetos podem impactar os locais que abrigam

espécies ameaçadas de extinção, recifes de corais e comunidades bentônicas. Além disso, a depender do projeto, no ato de construção das linhas de transmissão pode haver necessidade de retirar a vegetação local ou capturar os animais.

A Marinha do Brasil é a autoridade encarregada de regulamentar toda ZEE. Sendo assim, a sua presença é fundamental na etapa de licenciamento de um empreendimento eólico *offshore*, de modo a garantir que a área na qual o parque será instalado estará adequada ao seu desenvolvimento e não causará conflito de interesse.

## 8.2 CUSTOS ATRELADOS À GERAÇÃO EÓLICA OFFSHORE

Durante a elaboração deste estudo, foi possível constatar que os empreendimentos eólicos *offshore* possuem inúmeras vantagens quando comparados aos *onshore*. Os parques eólicos *offshore* oferecem menor impacto visual, possuem grande disponibilidade de área no mar e encontram o local propício para geração de energia devido a grande disponibilidade de recurso eólico mais veloz e estável.

Todavia, a complexidade atrelada à implantação dos parques eólicos no mar corrobora com os altos custos de instalação, manutenção e dos próprios componentes utilizados para confeccionar os aerogeradores pois estes precisam ser mais resistentes à corrosão, impacto do vento e das marés.

Além do fator custo, os empreendimentos eólicos *offshore* oferecem altos riscos à comunidade bentônica, mamíferos marinhos, avifauna, dentre tantas outras espécies que fazem parte desse ecossistema. Desse modo, faz-se necessário um melhor estudo e análise da área a qual será instalada o empreendimento.

Os custos referentes à implantação dos parques eólicos *offshore* estão diretamente ligados à distância até a costa e a profundidade em que são instalados. Embora tenha-se benefícios em instalar as turbinas em locais profundos, pois os ventos possuem maior velocidade e estabilidade, os custos são diretamente proporcionais a essa questão e sendo assim, esse ponto ainda é um obstáculo para implementação da geração eólica *offshore* nessa localização.

Segundo EPE (2020), os atuais custos para investimento em empreendimentos eólicos *offshore* podem ser estimados entre \$ 3.000/kW e \$ 6.000/kW. Esses valores

são superiores aos projetos *onshore*, devido principalmente à complexidade das fundações, instalações e transporte da estrutura. A necessidade de embarcações e profissionais com ampla experiência em transporte e instalação dos componentes eólicos no mar, gera um adicional de custo na fase de construção da usina eólica. De modo geral, essas tarefas são executadas por empresas do setor de óleo e gás por serem especializadas nesse tipo de serviço e na realização de operações no ambiente marinho.

Embora os custos dos empreendimentos eólicos *offshore* sejam maior que os *onshore*, a capacidade de obter uma maior potência instalada devido à força dos ventos é uma maneira de incentivar as pesquisas para implementação dessa forma de geração de energia.

Os custos da geração eólica *offshore* podem ser divididos em duas categorias:

a) CAPEX (do inglês, *Capital Expendure*)

Também chamado de Despesa de Capital, refere-se ao custo total de investimento atribuído às fundações, instalação dos aerogeradores, conexão à rede elétrica, entre outros. Embora a questão da conexão à rede elétrica seja um fator que aumenta o CAPEX, sobretudo em projetos que estão muito distantes da costa, o uso da transmissão de energia com tecnologia HVDC já é uma forma de mitigar essa problemática.

Quanto à infraestrutura de transmissão, comparando-se as instalações *onshore* e *offshore*, no caso de parques eólicos *onshore*, os custos representam entre 9 e 14% da estrutura de custos totais, já para projetos *offshore*, esse valor pode variar de 15 a 30% dos custos totais. Uma estimativa geral da infraestrutura de transmissão e sua instalação é de aproximadamente 21% dos custos totais do projeto eólico *offshore*. Do total dessa última parcela, 41% refere-se à subestação e seus equipamentos, 30% refere-se aos cabos de conexão à rede em terra, 18% da instalação da conexão ao sistema e 11% com cabeamento interno da planta eólica offshore (EPE, 2020).

Assim como parques eólicos localizados muito distantes da costa contribuem para aumentar o CAPEX, os empreendimentos situados em águas profundas também exigem um maior capital de investimento. Desse modo, ainda na fase de projeto, deve-se considerar que embora locais mais profundos tenham ventos mais estáveis e

gerem mais energia, a necessidade de fundações mais específicas e tecnologias avançadas poderão inviabilizar os projetos em locais como esses. Além disso, os parques eólicos *offshore* possuem maiores prazos de entrega dos projetos e aspectos construtivos mais complexos, se comparados com os *onshore*, e todos esses fatores agregam valor a esse tipo de empreendimento tornando-os mais custosos.

b) OPEX (do inglês, *Operating Expenditure*)

Segundo Herdy (2022), o OPEX é o termo utilizado para se referir às despesas operacionais, ou seja, os custos ligados à operação e manutenção da usina eólica por cada kW instalado. Nele está inserido os custos com os funcionários e também com os equipamentos e demais recursos necessários para realizar inspeções e manutenções em ambiente marinho, tais como helicópteros, embarcações, entre outros.

De acordo com Carvalho (2017), a Agência Internacional de Energia Renovável afirmou que a competitividade no setor de energias renováveis servirá de mola propulsora para a constante inovação das tecnologias, e a redução dos custos da geração eólica *offshore* até 2025 acontecerão mediante a adoção de políticas que favoreçam o uso de fontes de energia renovável como uma forma de combater as mudanças climáticas.

## 9 CONCLUSÃO

As energias renováveis têm ganhado popularidade no mundo, motivadas pelo objetivo de se reduzir as emissões dos gases causadores do efeito estufa, controlar as mudanças climáticas e desenvolver países economicamente sustentáveis. Além disso, o uso dessas fontes de energia contribui para segurança energética e diminui a dependência de combustíveis fósseis.

Dentre as fontes de energia alternativa, a eólica tem ocupado lugar de destaque no território brasileiro devido aos resultados satisfatórios obtidos sobretudo nos períodos secos, quando a geração eólica atua complementando a geração hidrelétrica devido aos baixos níveis dos reservatórios.

Sendo assim, a geração eólica *onshore* já está consolidada no território brasileiro, apresentando um potencial considerável principalmente nas regiões nordeste, sul e sudeste, onde os ventos são mais fortes e estáveis. Pelo fato da legislação ambiental, normas e regulamentações estarem bem definidas, a implantação dos parques eólicos *onshore* tem apresentado significativo crescimento nos últimos anos. Uma vez que o potencial eólico *onshore* mostrou-se viável, o compromisso com o desenvolvimento sustentável tem levado os órgãos do setor energético a explorar o potencial eólico marinho.

A geração eólica *offshore* tem se mostrado uma alternativa para alcançar as metas estabelecidas para transição energética e redução do uso das fontes fósseis no Brasil. Desse modo, os 70 projetos que já se encontram em fase de licenciamento juntamente ao IBAMA contribuirão não só para diversificação da matriz energética do país, como também para geração de empregos, incentivo à inovação tecnológica e desenvolvimento socioeconômico do país.

Ainda tratando dos desafios que a geração eólica *offshore* deverá enfrentar até que seja de fato implantada no Brasil, estima-se que os custos para investimentos tenderão a reduzir com o passar do tempo principalmente com o avanço tecnológico, à experiência da instalação de parques eólicos anteriores e às políticas governamentais de incentivo ao desenvolvimento desse tipo de tecnologia. Já com relação aos impactos, principalmente os ambientais, o Brasil já possui órgãos e entidades definidas para garantir que os riscos atrelados à implementação dos parques eólicos *offshores* sejam minimizados. Desse modo, pode-se inferir que o

Brasil já possui conhecimento do seu potencial de geração eólica *offshore*, dos desafios a serem enfrentados e com isso tem definido planos que o possibilitará implementar seus primeiros parques eólicos em ambiente marinho.



## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **Boletim Anual de Geração Eólica 2018**. Disponível em: [http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2019/05/Boletim-Anual\\_2018.pdf](http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2019/05/Boletim-Anual_2018.pdf). Acesso em: 26 nov. 2022.

BARBOSA, Robson. **Inserção da energia eólica offshore no Brasil: análise de princípios e experiências regulatórias**. 2018. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde-10042019-150844/publico/Tese\\_Robson\\_Barbosa.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde-10042019-150844/publico/Tese_Robson_Barbosa.pdf). Acesso em: 26 nov. 2022.

CAORSI, Valentina Zaffaroni. **Efeito do ruído antropogênico no comportamento animal**. 2018. Tese (Doutorado em Biologia Animal) – Instituto de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/193632/001083305.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 14 jan. 2023.

CARVALHO, Itaiara Felix et al. **Energia eólica offshore: potencial e desafios de implantação**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2017. Disponível em: <dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/riufcg/18771/ITAIARA%20FELIX%20CARVALHO%20-%20TCC%20ENG.%20ELÉTRICA%202017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 21 nov. 2022.

CORREIA, Bruno César da Silva. **Geração eólica offshore no Brasil: um panorama das principais experiências regulatórias nacionais e internacionais aplicáveis**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Direito) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021. Disponível em: [https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/68238/1/2021\\_tcc\\_bcscorreia.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/68238/1/2021_tcc_bcscorreia.pdf). Acesso em: 06 mai. 2023.

DANISH ENERGY AGENCY. **Danish Experiences from Offshore Wind Development**. Dinamarca: DEA, 2017. Disponível em: [https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Globalcooperation/offshore\\_wind\\_development\\_0.pdf](https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Globalcooperation/offshore_wind_development_0.pdf). Acesso em: 03 mar. 2023.

DUARTE, Victória Regina. **Avaliação de risco na implantação de geração eólica utilizando análise de sensibilidade**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Sistemas de Energia) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. Disponível em: [https://repositorio.ifsc.edu.br/bitstream/handle/123456789/432/TCC%20CSTSE\\_VICTORIA\\_DUARTE.pdf?sequence=1](https://repositorio.ifsc.edu.br/bitstream/handle/123456789/432/TCC%20CSTSE_VICTORIA_DUARTE.pdf?sequence=1). Acesso em: 15 dez. 2022.

DUTTON, Alastair Simon Piers *et al.* Going Global: Expanding Offshore Wind to Emerging Markets. **ESMAP**, Washington D.C, v.1, p. 1-44, 2019. Disponível em: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/716891572457609829/pdf/Going->

Global-Expanding-Offshore-Wind-To-Emerging-Markets.pdf. Acesso em: 24 fev. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2018.186p. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-416/NT04%20PR\\_RecursosEnergeticos%202050.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-416/NT04%20PR_RecursosEnergeticos%202050.pdf). Acesso em: 16 jan. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Roadmap Eólica Offshore Brasil: perspectivas e caminhos para energia eólica marítima**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2020. 140p. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-456/Roadmap\\_Eolica\\_Offshore\\_EPE\\_versao\\_R2.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-456/Roadmap_Eolica_Offshore_EPE_versao_R2.pdf). Acesso em: 16 jan. 2023.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO RIO GRANDE DO NORTE. **Mapa do Ibama comprova atratividade do Nordeste para implantação de eólicas offshore, diz ISI-ER**. Rio Grande do Norte: FIERN, 2022. Disponível em: <https://www.fiern.org.br/mapa-ibama-comprova-atratividade-nordeste-para-implantacao-de-eolicas-offshore-diz-isi-er/>. Acesso em: 02 mar. 2023.

FERREIRA, Lorena Martins. **Perspectiva da geração de energia eólica offshore no Brasil**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/26840/1/PerspectivaGeraçãoEnergia.pdf>. Acesso em: 07 mai. 2023.

GEJIMA JUNIOR, Michel Yasuyuki. **Avaliação do potencial eólico no Pico dos Dias em Brazópolis/MG**. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2021. Disponível em: [https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/2489/1/Dissertação\\_2021158.pdf](https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/2489/1/Dissertação_2021158.pdf). Acesso em: 10 dez. 2022.

GUIMARÃES, Bruna Silveira. **O licenciamento ambiental de empreendimentos eólicos offshore: histórico mundial e diretrizes para o Brasil**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: [www.ppe.ufrj.br/images/BrunaGuimarães-Mestrado.pdf](http://www.ppe.ufrj.br/images/BrunaGuimarães-Mestrado.pdf). Acesso em: 07 fev. 2023.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind Report 2021**. Bruxelas: GWEC, 2021. Disponível em: <https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/03/GWEC-Global-Wind-Report-2021.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2023.

HERDY, Pedro Sanches. **Estudo de oportunidade da implantação de um parque eólico offshore no Brasil**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2022. Disponível em: [https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/25890/Pedro\\_Sanches\\_TCC\\_UFF.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/25890/Pedro_Sanches_TCC_UFF.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 09 mai. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Complexos eólicos offshore**: projetos com processos de licenciamento ambiental abertos no IBAMA. Rio Grande do Sul: IBAMA, 2022. 1p. Disponível em: [https://www.ibama.gov.br/phocadownload/licenciamento/2022-12-07\\_Usinas\\_eolicas\\_offshore\\_ibama.pdf](https://www.ibama.gov.br/phocadownload/licenciamento/2022-12-07_Usinas_eolicas_offshore_ibama.pdf). Acesso em: 09 jan. 2023.

LUPINACCI, Gustavo Cardoso. **Análise do potencial eólico offshore da costa brasileira em plataformas fixas de petróleo e gás**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/240228/TCC.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. Acesso em: 14 fev. 2023.

MARINHO, Chrislaine do Bomfim. **Estudo do potencial eólico offshore no estado da Bahia utilizando o modelo WRF**. 2020. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial) – Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2020. Disponível em: [repositoriosenaiba.fieb.org.br/bitstream/fieb/1100/1/TCCP\\_MCTI\\_Chyslaine%20do%20Bomfim%20Marinho.pdf](repositoriosenaiba.fieb.org.br/bitstream/fieb/1100/1/TCCP_MCTI_Chyslaine%20do%20Bomfim%20Marinho.pdf). Acesso em: 08 dez. 2022.

MARQUES, Márcia Talita Amorim. **Obtenção da altura da camada limite planetária através da análise espectral do campo de vento do lidar Doppler**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear-Materiais) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em: [www.lalinet.org/uploads/Main/Publications/Marques2017.pdf](http://www.lalinet.org/uploads/Main/Publications/Marques2017.pdf). Acesso em: 06 mai. 2023.

NASCIMENTO, A. D. S. *et al.* Análise do potencial eólico brasileiro: estudo de caso in loco da construção do parque eólico em Santa Luzia–PB. **Revista Gestão Industrial**, v. 16, n. 2, 2020. Disponível em: <https://revistas.utfpr.edu.br/revistagi/article/view/9442/7934>. Acesso em: 18 fev. 2023.

NUNES, Luciana Angélica da Silva; SILVA, Marina Costa Rodrigues da. **Geração de energia eólica offshore e sua relação frente à geração onshore**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2021. Disponível em: [https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/7009/1/MarinaCRS\\_ART.pdf](https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/7009/1/MarinaCRS_ART.pdf). Acesso em: 17 fev. 2023.

OLIVEIRA, Thamires de Almeida. **Viabilidade técnico-econômica da turbina eólica offshore**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: [https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufripeno\\_upl/THESIS/6000309/thamires\\_de\\_almeida\\_oliveira\\_\\_msc\\_2019\\_vf\\_20200403220312827.pdf](https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufripeno_upl/THESIS/6000309/thamires_de_almeida_oliveira__msc_2019_vf_20200403220312827.pdf). Acesso em: 17 mar. 2023.

PAZ, Lucas Héris da. **Análise da competitividade de usinas eólicas offshore no mercado de energia do Setor Elétrico Brasileiro**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa

Catarina, Florianópolis, 2020. Disponível em:  
<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/213927/TCC%20Lucas%20H%20%20%20Paz.Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 26 dez. 2022.

PEREIRA, Felipe. **Análise do arcabouço legal associado ao desenvolvimento de parques eólicos offshore no Brasil**. 2017. Dissertação (Mestrado em Políticas Públicas) – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília. 2017. Disponível em: [www.mestradoprofissional.gov.br/sites/images/mestrado/turma2/felipe\\_pereira.pdf](http://www.mestradoprofissional.gov.br/sites/images/mestrado/turma2/felipe_pereira.pdf). Acesso em: 13 fev. 2023.

PINTO, Rodrigo Jambeiro; SANTOS, Vivianni Marques Leite dos. Energia eólica no Brasil: Evolução, desafios e perspectivas. **RISUS - Journal on Innovation and Sustainability**, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 124-142, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.24212/2179-3565.2019v10i1p124-142>. Disponível em: <https://revistas.pucsp.br/index.php/risus/article/view/41807/27981>. Acesso em: 14 fev. 2023.

RIBEIRO, Luiza Bastos. **Um estudo sobre energia eólica no Brasil**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2017. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/85873587/monografia-estudo-energia-eolica>. Acesso em: 15 fev. 2023.

SILVA, Amanda Jorge Vinhoza de Carvalho. **Potencial eólico offshore no Brasil: localização de áreas nobres através de análise multicritério**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/13710/1/AmandaJorgeVinhozaDeCarvalhoSilva.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2023.

VASCONCELOS, Rafael Monteiro de. **Mapeamento de Modelos Decisórios Ambientais Aplicados na Europa para Empreendimentos Eólicos Offshore**. Brasília: IBAMA, 2019. Disponível em: [www.ibama.gov.br/phocadownload/licenciamento/publicacoes/2019-Ibama-UE-Estudo-Eolicas-Offshore.pdf](http://www.ibama.gov.br/phocadownload/licenciamento/publicacoes/2019-Ibama-UE-Estudo-Eolicas-Offshore.pdf). Acesso em: 01 mar. 2023.

XAVIER, Thomaz Willian de Figueiredo. **Análise participativa dos potenciais impactos socioambientais de parques eólicos marinhos (offshore) na pesca artesanal no estado do Ceará, Brasil**. 2022. Tese (Doutorado em Geografia) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022. Disponível em: [https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/64683/3/2022\\_tese\\_twfxavier.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/64683/3/2022_tese_twfxavier.pdf). Acesso em: 09 mar. 2023.