



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

VICTOR HUGO PINHEL GONÇALVES DE SOUZA

ANÁLISE DE IMPACTO DA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA

Ilha Solteira
2023

VICTOR HUGO PINHEL GONÇALVES DE SOUZA

ANÁLISE DE IMPACTO DA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA

Trabalho de Graduação apresentado à
Faculdade de Engenharia de Ilha
Solteira — Unesp como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Eletricista

Prof. Dr. Carlos Antônio Alves
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S769a Souza, Victor Hugo Pinhel Gonçalves de.
Análise de impacto da geração de energia eólica / Victor Hugo Pinhel
Gonçalves de Souza. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
92 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

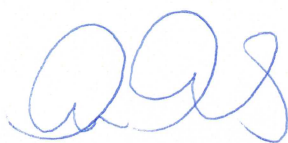
Orientador: Carlos Antônio Alves

Inclui bibliografia

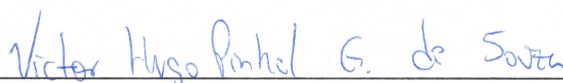
1. Parques eólicos. 2. Inovação. 3. Energias alternativas. 4. Projetos. 5.
Energia sustentável.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos dez dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte e três, o discente Victor Hugo Pinhel Gonçalves de Souza, matriculado sob o nº 181052156, tendo como banca examinadora o seu orientador, o *Prof. Dr. Carlos Antonio Alves*, o Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro e o Doutorando Rodrigo Serra Daltin, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado **"ANÁLISE DE IMPACTO DA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA"**, obtendo a nota 8,5 (oito e meio) e conceito APROVADO.



Prof. Dr. Carlos Antonio Alves
- Orientador -



Victor Hugo Pinhel Gonçalves de Souza
- Discente -



Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro
- Membro da Banca -



Doutorando Rodrigo Serra Daltin
- Membro da Banca -

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre esteve comigo. Meus pais, Edivaldo e Gislaine, por sempre me incentivarem e me apoiarem em minhas escolhas e meus sonhos, sem medir esforços para que eu chegasse a essa etapa.

A toda minha família, minhas avós, Laiz e Maria Rosa, que infelizmente já não estão mais entre nós, mas tenho certeza de que estão orgulhosas de ver seu neto onde está; meus avôs, José e Nelson, todos meus tios e tias que sempre me apoiaram e estiveram por perto nessa etapa.

A minha namorada Taiane, que me inspirou para a elaboração desse trabalho e viveu a reta final desse trabalho, não me deixando desistir em momento algum.

Ao meu trio de amigos: Guilherme, Leandro e Vinícius, de graduação que compartilharam os seus bons e maus momentos ao longo do curso e da vida.

Aos meus companheiros de república que vivenciaram uma parte dos momentos da minha graduação e me auxiliaram sempre que possível.

Ao professor Carlos Antônio Alves, por se disponibilizar a me orientar neste trabalho e por toda tutoria fornecida durante minha participação no Programa de Ensino Tutorial (PET).

À UNESP, e todos discentes da instituição, por possibilitar todas as experiências, conhecimento e vivência durante todo período de curso.

A todos, meu muito obrigado.

RESUMO

O presente trabalho foi construído em torno de fundamentações bibliográficas e pesquisas científicas realizadas por órgãos e instituições legais, quem tem como foco a pesquisa e o desenvolvimento sobre a geração de energia. A partir das pesquisas realizadas, são apresentados a matriz energética brasileira, os modelos de usinas eólicas (*onshore* e *offshore*), ligações com a rede elétrica, projetos existentes no Brasil e no mundo, os desafios e impactos que a geração de energia eólica pode causar no país, benefícios e desafios.

Palavras-chave: Parques Eólicos. Inovação. Energias Alternativas. Projetos. Energia Sustentável.

ABSTRACT

This work was built around bibliographical foundations and scientific research carried out by legal organizations and institutions focused on energy generation research and development. Based on the conducted research, the Brazilian energy matrix, onshore and offshore wind farm models, grid connections, existing projects in Brazil and worldwide, as well as the challenges and impacts that wind power generation can cause in the country, were presented. Furthermore, the benefits and challenges resulting from this form of energy generation were addressed.

Keywords: Wind Farms. Innovation. Alternative Energies. Projects. Sustainable Energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação do consumo de energia, brasileiro e mundial	18
Figura 2 - Matriz energética brasileira 2021	19
Figura 3 - Desafios da transição energética.....	19
Figura 4 - Projeção da Matriz Elétrica em 2040	20
Figura 5 - Parque eólico Geribatu	25
Figura 6 - Composição de uma turbina eólica <i>onshore</i>	25
Figura 7 - Construção de uma fundação tipo “estaca”.....	27
Figura 8 - Exemplo de nacele em aerogerador	28
Figura 9 - Dimensão real de uma pá de uma turbina eólica	29
Figura 10 - Esquematização de uma turbina eólica simplificada	30
Figura 11 - Esquematização de uma turbina com gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo	31
Figura 12 - Esquematização de uma turbina com gerador de indução duplamente alimentado.....	32
Figura 13 - Esquematização de uma turbina com gerador síncrono.....	33
Figura 14 - Parque eólico <i>offshore Walney Extension</i>	34
Figura 15 - Casos das fundações <i>offshore</i> , conforme a profundidade	35
Figura 16 - Tipos de fundações <i>offshore</i>	36
Figura 17 - Parque eólico e linha de transmissão no estado da Bahia.....	40
Figura 18 - Diagrama de linha de uma conexão <i>offshore</i> a rede	41
Figura 19 - Cabos de conexões CA, tipo XLPE	42
Figura 20 - Cabos de conexões CC, tipo OF, MI, XLPE, respectivamente.....	43
Figura 21 - Faixas de suportabilidade a faltas no Brasil.....	47
Figura 22 - Taxas de crescimento da instalação de energia eólica até 2022 em GW	48

Figura 23 - Instalações totais <i>onshore</i> e <i>offshore</i> , de cada país, respectivamente ..	49
Figura 24 - Trecho do parque eólico de Gansu	50
Figura 25 - Trecho do parque eólico (AWECC).....	51
Figura 26 - Projeto do parque eólico <i>offshore</i> <i>East Anglia One</i>	53
Figura 27 - Matriz elétrica brasileira (GW)	54
Figura 28 - Geração e Fator de Capacidade Mensal – Brasil (MWmed).....	57
Figura 29 - Geração e Fator de Capacidade Mensal – Bahia (MWmed)	57
Figura 30 - Geração e Fator de Capacidade Mensal – Ceará (MWmed)	58
Figura 31 - Geração e Fator de Capacidade Mensal – Maranhão (MWmed).....	58
Figura 32 - Geração e Fator de Capacidade Mensal – Paraíba (MWmed).....	59
Figura 33 - Geração e Fator de Capacidade Mensal – Pernambuco (MWmed)	59
Figura 34 - Geração e Fator de Capacidade Mensal – Piauí (MWmed).....	60
Figura 35 - Geração e Fator de Capacidade Mensal – Rio Grande do Norte (MWmed)	60
Figura 36 - Geração e Fator de Capacidade Mensal – Rio Grande do Sul (MWmed)	61
Figura 37 - Geração e Fator de Capacidade Mensal – Santa Catarina (MWmed) ...	61
Figura 38 - Panorama eólico do Brasil	65
Figura 39 - Legenda dos símbolos da Figura 26	66
Figura 40 - Complementaridade entre energia eólica e hídrica	67
Figura 41 - Complementaridade das fontes de energia nas regiões Sul e Sudeste.	68
Figura 42 - Parque eólico Rio do Fogo (RN)	69
Figura 43 - Formato da composição do parque eólico Povo Novo.....	70
Figura 44 - Localização do projeto do complexo eólico Lagoa dos Barros (RS).....	71
Figura 45 - Viabilidade da Instalação eólica <i>offshore</i> na Costa Brasileira	73
Figura 46 - Esboço do projeto eólico Ventos do Sul (RS).....	76
Figura 47 - Esboço do projeto eólico Caucaia (CE)	77

Figura 48 - Esboço do projeto eólico Asa Branca I (CE).....	77
Figura 49 - Quantidade de ruído sonoro produzido em dB.....	82
Figura 50 - Percentagem dos custos da implantação de um parque.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos níveis de tensão em kV	39
Tabela 2 - Faixa de fator de capacidade conforme a velocidade e região	74
Tabela 3 - Emissão de dióxido de carbono nos processos de geração de energia de diferentes fontes.....	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipos de rede de transmissão e suas respectivas características	39
Quadro 2 - Potencial eólico <i>offshore</i> acumulado do Brasil	74

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ABEEÓLICA	Associação Brasileira de Energia Eólica
ABEMAR	Associação Brasileira de Energias Marítimas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AWEC	<i>Alta Wind Energy Center</i>
CAGR	<i>Compound Annual Growth Ratio</i>
CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica
CEPEL	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
CHESF	Companhia Hidroelétrica do São Francisco
DFIG	<i>Double-Fed Induction Generator</i>
DRO	Deferimento de Registro de Outorga
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FRT	<i>Fault Ride Through</i>
GEE	Gases do Efeito Estufa
GWEC	<i>Global Wind Energy Council</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro de Meio Ambiente
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
NDC	Contribuição Nacionalmente Determinada
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PROEÓLICA	Programa Emergencial de Energia Eólica
PROINFA	Programa de Incentivo a Fontes Alternativas
ZEE	Zona econômica exclusiva

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos	16
2. MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	17
2.1 Transição energética.....	19
3. ENERGIA EÓLICA.....	22
3.1 Energia eólica <i>onshore</i>.....	23
3.1.1 Parques eólicos <i>onshore</i>	23
3.1.2 Turbinas eólicas <i>onshore</i>	25
3.1.2.1 Fundação	26
3.1.2.2 Torre	27
3.1.2.3 Sistema de controle.....	27
3.1.2.4 Nacele.....	27
3.1.2.5 Eixo principal	28
3.1.2.6 Rotor	29
3.1.2.7 Gerador	29
<u>3.1.2.7.1 Gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo</u>	<u>30</u>
<u>3.1.2.7.2 Gerador de indução duplamente alimentado.....</u>	<u>31</u>
<u>3.1.2.7.3 Gerador síncrono.....</u>	<u>32</u>
3.2 Energia eólica <i>offshore</i>	33
3.2.1 Parques eólicos <i>offshore</i>	34
3.2.2 Turbinas eólicas <i>offshore</i>	35
3.2.2.1 Fundação	35
3.3 Conexão da energia eólica à rede elétrica	37
3.3.1 Uso das linhas de transmissão.....	38
3.3.1.1 Uso das linhas de transmissão em parques <i>offshore</i>	40

3.3.2 Custos de transmissão e nível de compartilhamento	43
3.3.3 Impactos das conexões na rede elétrica.....	44
3.3.3.1 <i>Impactos das conexões na rede elétrica local</i>	44
3.3.3.2 <i>Impactos das conexões na rede elétrica global</i>	45
3.3.4 Capacidade de "Ride Through Fault" (Suportabilidade à Faltas)	46
3.3.4.1 <i>Capacidade de "Ride Through Fault" (Suportabilidade à Faltas) no Brasil</i> ..	46
4. CENÁRIO ATUAL DA ENERGIA EÓLICA NO MUNDO	48
4.1 Cenário atual da energia eólica na China	50
4.2 Cenário atual da energia eólica nos Estados Unidos	51
4.3 Cenário atual da energia eólica no Reino Unido	52
5. CENÁRIO ATUAL DA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL	54
5.1 Políticas de incentivo e regulamentações	63
5.2 Energia eólica <i>onshore</i> no brasil	62
5.2.1 Potencial eólico do Brasil.....	66
5.2.2 Parques/usinas eólicos <i>onshore</i> no Brasil.....	68
5.2.2.1 <i>Parque eólico Rio do Fogo</i>	68
5.2.2.2 <i>Parque eólico Povo Novo</i>	69
5.2.2.3 <i>Parque eólico Lagoa dos Barros</i>	71
5.2.3 Futuro da energia eólica <i>onshore</i> no brasil	71
5.3 Energia eólica <i>offshore</i> no Brasil	72
5.3.1 Potencial eólico <i>offshore</i> do Brasil	72
5.3.2 Parques/usinas eólicos <i>offshore</i> no Brasil.....	75
5.3.2.1 <i>Parque eólico Ventos do Sul</i>	75
5.3.2.2 <i>Parques eólicos Caucaia e Asa Branca I</i>	76
5.3.3 Futuro da energia eólica <i>offshore</i> no Brasil.....	78
6. IMPACTOS AMBIENTAIS, SOCIAIS, ECONÔMICOS NO BRASIL.....	79

6.1 Impactos ambientais	79
6.1.1 Impactos ambientais positivos.....	79
6.1.2 Impactos ambientais negativos	81
6.2 Impactos sociais	82
6.2.1 Impactos sociais positivos	82
6.2.2 Impactos sociais negativos.....	83
6.3 Impactos econômicos	84
6.3.1 Impactos econômicos positivos.....	84
6.3.2 Impactos Econômicos negativos.....	85
7. CONCLUSÃO.....	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

1. INTRODUÇÃO

A matriz energética de um país é um fator determinante para seu desenvolvimento econômico, social e, também, ambiental. A diversificação da matriz energética é necessária para garantir a segurança energética, reduzir a dependência de fontes de energia fósseis, além de promover a transição para uma economia de baixo carbono, cumprir as metas de redução de emissões de gases de efeito estufa, como também ações para captura de carbono na atmosfera e a geração do hidrogênio verde.

Nesse contexto, a energia eólica tem se destacado como uma das fontes de energia renovável mais promissoras, tanto no Brasil, quanto no mundo. A geração de energia eólica *onshore* e *offshore* tem crescido significativamente nas últimas décadas, impulsionada por avanços tecnológicos, incentivos a pesquisas e por políticas públicas que impulsionam a produção de energia limpa.

A expansão do setor eólico é visível no mundo. No Brasil ao acompanhar essa evolução, nota-se que em 2011, início da implantação desse setor no país, a potência instalada no país girava em torno de 1 GW no atual levantamento divulgado esse valor atingia os 24,1 GW de potência instalada que representa em torno de 12,5% da matriz energética brasileira (ABEEólica, 2023).

Como dito, o potencial eólico do Brasil é de grande expressão, tanto no âmbito *onshore* quanto *offshore*. A primeira, já foi implantada no Brasil, e tem seu funcionamento distribuído em grandes parques pelo país. A outra geração mesmo sem possuir parques instalados no país, vem com uma popularidade crescente, sendo pauta em muitos encontros estratégicos a respeito de fontes renováveis. Muito disso graças aos inúmeros benefícios que traz para o país, a diversidade energética, redução de gases estufa e a geração de empregos.

Apesar das vantagens, é importante atentar que a expansão da energia eólica pode gerar impactos socioambientais e econômicos, que precisam ser levados em conta nos projetos, vão de visuais e sonoros, quanto na fauna e flora do ambiente, podendo afetar atividades de renda da população local.

É extremamente necessário avaliar de forma minuciosa todos os impactos da geração de energia eólica no Brasil, tanto *onshore*, como *offshore*, de forma a buscar o desenvolvimento sustentável desse setor, além de realizar um levantamento sobre a situação das políticas públicas e os investimentos privados em pesquisas e

desenvolvimento.

1.1 Objetivos

O trabalho possui como objetivo realizar uma análise do impacto da geração de energia eólica *onshore* e *offshore* na matriz energética brasileira, por meio de literaturas existentes, propostas de projetos, legislações atuais, entre outros documentos. Além disso, analisar as diferentes dimensões: sociais, econômicas e ambientais.

2. MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

A ANEEL define matriz energética como o conjunto de fontes e tipos de energia utilizados por um país ou região, representando uma medida de grau de diversificação e segurança de suprimento energético .

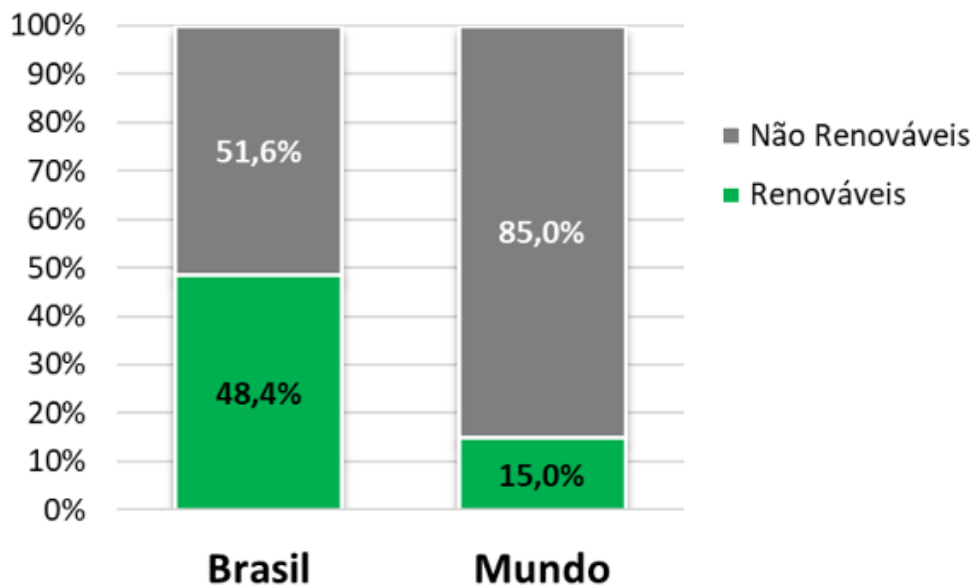
A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), define que a matriz energética é composta por fontes renováveis e não renováveis. Pode-se descrever como fontes renováveis, aquelas que se regeneram naturalmente, podendo citar: solar, hidrelétrica, biomassa e, a eólica. As fontes não renováveis não podem se regenerar naturalmente; alguns exemplos são: carvão, petróleo e também o gás natural (EPE, 2015).

Em uma análise global de referência, tem-se que, historicamente a matriz energética é formada por um percentual com grande superioridade de fontes não renováveis, ultrapassando os 80%, o que ocasiona altos índices de poluição e que podem futuramente se esgotar (EPE, 2015).

A matriz energética brasileira é uma representação da diversidade de fontes de energia utilizadas para suprir a demanda energética do país. Ela é composta por diferentes tipos de fontes, como hidroeletricidade, geração termelétrica, geração eólica, geração solar, geração nuclear e geração de biocombustíveis. A hidroeletricidade é a fonte de energia predominante no Brasil. A geração termelétrica, baseada em combustíveis fósseis, tem sua participação na matriz.

Ainda que no Brasil o cenário ambiental em relação às fontes energéticas seja muito favorável, as fontes não renováveis, ainda superam as renováveis, tal fato pode ser observado na Figura 1, onde tem um comparativo da matriz energética brasileira com a mundial.

Figura 1 – Comparação do consumo de energia, brasileiro e mundial.



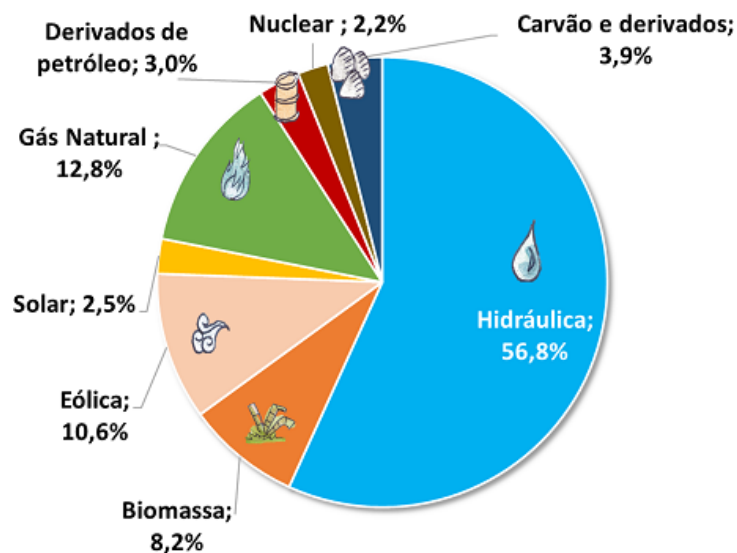
Fonte: EPE (2020).

O comparativo mostra que o Brasil possui uma matriz energética, com uso de fontes renováveis, consideravelmente superior à mundial, o que torna o país mais sustentável devido a menor emissão de gases poluentes, como os gases de efeito estufa (GEE).

Essa alta participação das fontes renováveis na matriz energética brasileira, ocorre muito pelo fato da matriz elétrica ser ainda mais renovável, graças às usinas hidrelétricas, solares, e em contínua expansão as eólicas.

O levantamento feito em 2021 mostra a distribuição dos responsáveis pela geração elétrica, o qual é dado na Figura 2.

Figura 2 – Matriz elétrica brasileira 2021.



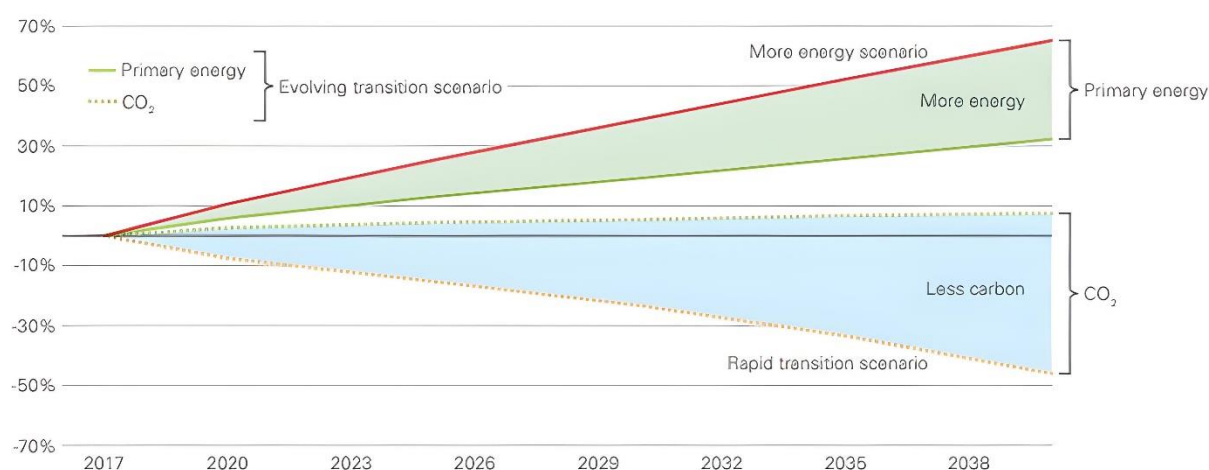
Fonte: BEN (2022).

Na Figura 2, é notável a predominância da fonte hidráulica na matriz energética brasileira, o que traz à tona uma necessidade em buscar novas fontes renováveis no país, diante do objetivo de estabelecer uma distribuição energética eficaz e sustentável.

2.1 Transição energética

As mudanças climáticas ao meio ambiente, alertam os governos e a população pela necessidade da urgente transição energética, conseqüentemente, a necessidade da distribuição energética. Existem muitos desafios que atrasam a necessária transição energética. A partir da Figura 3, é possível retratar um duplo desafio.

Figura 3 – Desafios da transição energética.



Fonte: BP Energy (2019).

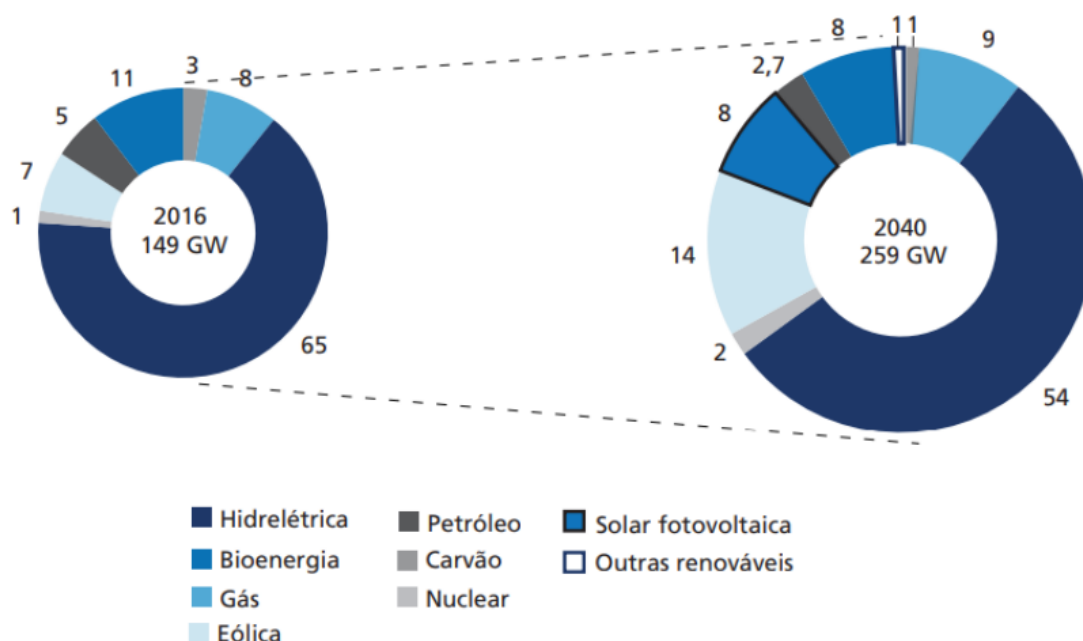
É possível notar que existem duas curvas que seguem caminhos diferentes, uma tem a necessidade de acelerar, que é o caso da curva "*More energy*", "mais energia", uma vez que existe o crescimento populacional, industrial, e conseqüentemente, o maior consumo da energia elétrica, o que demandam maior geração de energia. Do outro lado existe a desaceleração da emissão de carbono, que o Brasil e o mundo desejam diminuir os níveis de emissão, até chegarem ao mais próximo da emissão zero no futuro.

Não é uma tarefa fácil as curvas seguirem os fluxos, pois existem muitos empecilhos que as atrasam. Um demonstrativo da dificuldade desse processo são os principais objetivos associados às políticas energéticas, que são: segurança do abastecimento, o acesso à energia a preços módicos e a produção e o uso da energia

de forma ambientalmente adequada, que se colocados cada objetivo em prática, individualmente, percebe-se uma contraposição entre eles. Apesar de todos os percalços, as fontes renováveis podem auxiliar o alcance desses objetivos.

A partir de uma projeção realizada pela IEA (2018), é possível estabelecer uma base ao considerar a transição energética no cenário brasileiro, através da análise projetada da matriz elétrica do país até o ano de 2040. Na Figura 4 é possível visualizar essa projeção.

Figura 4 – Projeção da Matriz Elétrica em 2040.



Fonte: IEA (2018).

Somando as fontes não renováveis, é obtido um total de 9% da matriz elétrica brasileira, no ano de 2016, que ao transformada em GW, resulta em 13,41 GW. Isso no ano de 2040, estima-se que a participação seja de 5,7%, um total de 14,763 GW, uma expansão de pouco mais de apenas 1 GW.

O cenário atual, o Brasil está à frente em relação a transição energética, quando consideramos os parâmetros para este fenômeno, como a descarbonização e principalmente pela ampliação da participação de fontes renováveis, com o avanço visto na Figura 4. segundo o BEN, em 2018 a matriz elétrica brasileira poderia ser considerada 3 vezes mais renovável em relação à média mundial.

Abordando os âmbitos legislativos, o Brasil possui compromissos por meio dos acordos internacionais. Conforme a EPBR (2022), um exemplo, foi o acordo de Paris (2015), onde foram estipuladas metas para o país, como, a redução dos gases de

efeito estufa (37% até 2025, e 43% até 2030).

Entretanto, o cumprimento das metas não é uma tarefa simples, uma vez que depende de vários fatores, como: interesses políticos e econômicos, crises hídricas, pandemias. Em um levantamento realizado pelo Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), mostra que desde a assinatura do acordo o nível de emissões de gases de efeito estufa aumentaram. (SEEG, 2020).

Uma parcela desse aumento é devido ao acionamento das termelétricas durante a crise hídrica, que culminou em cerca de 12% de participação de combustíveis fósseis nesse período. O que ressalta novamente a dependência do Brasil da fonte hídrica e a necessidade de ampliação de outras fontes renováveis, para que a válvula de escape em momentos críticos não seja feita por meio de fontes não renováveis.

3. ENERGIA EÓLICA

A definição de energia eólica é dada segundo Pinto (2013, p. 79), como: "a energia que se obtém a partir do aproveitamento da força do vento, transformada em energia cinética pelas pás de um rotor, que por sua vez, é convertida em energia elétrica por um gerador elétrico acoplado ao rotor". A partir disso, é possível afirmar que a energia eólica é uma forma de energia renovável que utiliza o ar em movimento para sua geração. (PINTO, 2013)

A utilização desse ar em movimento é feita por aerogeradores, instalados em locais estratégicos, que serão detalhadamente definidos posteriormente. São equipamentos compostos basicamente por pás e um gerador elétrico, as pás são as responsáveis por captar a energia cinética dos ventos, converter em energia mecânica, que é responsável pela rotação do motor, e por sua vez gera energia elétrica.

É importante ressaltar a origem da energia eólica, a qual segundo Martins (2007) provem da ação da radiação solar combinada juntamente com a rotação da terra. O vento é responsável pela produção de energia, que pode ser calculada ao analisar uma amostra de área (A) exposta a um fluxo de ar com velocidade (V). A Equação 1 fornece a fórmula para calcular essa energia extraída do vento. (PINTO, 2013).

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Ao se derivar a energia cinética (E_c), obtém a potência, assim, por meio da Equação 2, tem-se:

$$P = \frac{\partial E_c}{\partial t} \quad (2)$$

Substituindo o fluxo de massa pela densidade do ar multiplicada pela área exposta ao vento, obtém-se uma expressão mais prática e aplicável para calcular a potência do vento, resultando na Equação 3:

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

sendo,

- E_c é a energia cinética do vento (joules/s)
- P é a potência disponível do vento (W)
- m é o fluxo de massa de ar (kg/s)
- ρ é a massa específica do ar (kg/m³) – também chamada de densidade absoluta
- A é a área da seção transversal (m²)
- V é a velocidade do vento (m/s)

A partir de 3, é possível interpretar e correlacionar alguns fatores, como por exemplo: a potência do vento é diretamente proporcional ao cubo da velocidade. Além disso, tal potência é diretamente proporcional à área da amostra utilizada, que na prática é a área que as pás abrangem.

3.1 Energia eólica *onshore*

Seguindo o conceito de energia eólica *onshore*, “energia eólica *onshore* é gerada pelo aproveitamento da força do vento – o movimento das massas de ar – através dos aerogeradores instalados em terra.” Ou seja, energia eólica *onshore* é uma fonte de energia renovável, que por meio da força do vento gera eletricidade em terra firme. (IBERDROLA, 2014).

3.1.1 Parques eólicos *onshore*

A geração da energia eólica *onshore* é feita por meio de parques eólicos, também conhecidos por usinas eólicas; são locais onde são instalados aerogeradores, para captar a energia do vento e convertê-la em energia elétrica. As instalações desses parques são realizadas em locais estratégicos, escolhidos seguindo alguns critérios:

- **Recurso eólico:** O recurso eólico é um dos fatores predominantes na escolha do local de um parque eólico. É preciso estudos detalhados para avaliar a velocidade,

direção e consistência dos ventos na área. O local ideal deve possuir ventos fortes e constantes, o suficiente para garantir uma produção de energia confiável e eficiente.

- **Acesso à rede elétrica:** É importante que o local do parque eólico esteja próximo a uma infraestrutura de transmissão de energia elétrica, de modo a facilitar a conexão à rede elétrica, pelo motivo de reduzir os custos e a complexidade.
- **Restrições ambientais:** As restrições ambientais e os impactos potenciais do parque eólico na flora, fauna e ecossistemas locais devem ser levados em conta na seleção do local. Áreas protegidas, habitats de espécies ameaçadas e rotas migratórias de aves são exemplos de considerações importantes. Para isso são realizados estudos a respeito do impacto ambiental, de modo a levantar os efeitos e também realizar planos para de mitigação.
- **Restrições terrestres:** Fatores como: topografia, uso do solo, acesso rodoviário e restrições legais e regulatórias, também são levados em conta. Dessa forma, o terreno deve ser adequado para a construção das fundações das turbinas eólicas e a instalação de outras infraestruturas necessárias. Outro fator é a disponibilidade do espaço, uma vez que os parques eólicos, usualmente, consomem uma grande porção de terra.
- **Condições geotécnicas:** A estabilidade do solo e a capacidade de suporte das fundações das turbinas eólicas, devem ser avaliadas previamente por estudos geotécnicos. As características do solo e da geologia local devem ser adequadas para garantir a segurança e a estabilidade das estruturas do parque eólico.
- **Aspectos econômicos e sociais:** Além dos fatores técnicos que afetam, mais a parte da construção, os fatores que impactam indiretamente também devem ser levados em conta, como por exemplo: Custos das áreas selecionadas, localização de áreas urbanas, aceitação da comunidade e os benefícios trazidos para a região como: empregos e desenvolvimento.

A partir da lista geral de critérios, é possível conter uma base de como é o processo de escolha de uma área para instalação de um parque eólico. Importante ressaltar que cada projeto tem suas particularidades e envolvem diversos outros critérios para obter o sucesso e assertividade na escolha. Na Figura 5, é possível observar um parque eólico localizado no Rio Grande do Sul, na cidade de Santa Vitória

do Palmar, a instalação foi feita em um terreno afastado das áreas urbanas, e com grande incidência de ventos.

Figura 5 – Parque eólico Geribatu.

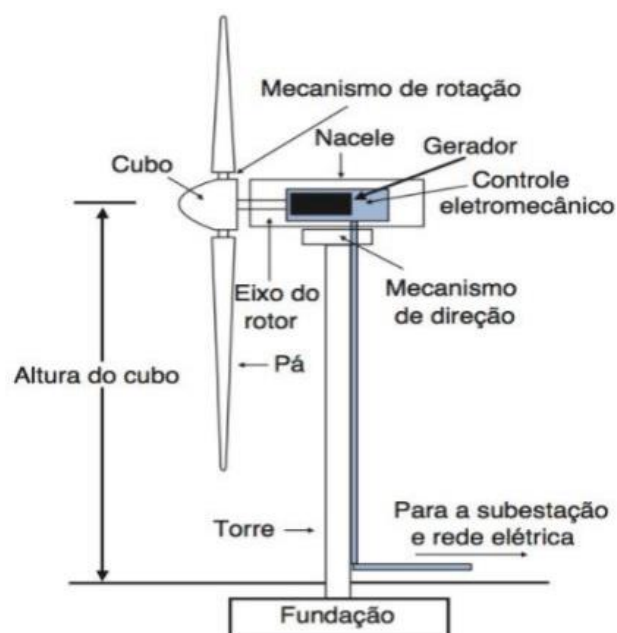


Fonte: Portal-Energia (2015).

3.1.2 Turbinas eólicas *onshore*

As turbinas eólicas *onshore*, são responsáveis pela captação da energia cinética gerada pelo vento e conversão em energia elétrica. Os principais componentes estão presentes na Figura 6 e são detalhados em seguida. (PINTO, 2013).

Figura 6 – Composição de uma turbina eólica onshore.



Fonte: Pinto (2013).

A partir da Figura 6 é possível descrever seus devidos componentes.

3.1.2.1 Fundação

A fundação é responsável pela sustentação da torre normalmente são construídas de concreto ou aço e projetadas para suportar o peso de todos outros componentes da turbina, torre, rotor, gerador, além de considerar a ação da força do vento incidindo nesses componentes.

Para os parques eólicos *onshore* existem algumas opções de fundações que são utilizadas de acordo com cada projeto.

- **Sapatas:** São fundações diretas utilizadas em terrenos com resistência significativa, suportando a torre e turbina. O formato circular é comum devido à distribuição uniforme das forças.
- **Pré-fabricada:** Considerada uma fundação superficial, muito utilizada em solos com alta resistência, é viável sua utilização em busca de economizar tempo na construção e os gastos financeiros.
- **Mono-estaca:** Possui dimensões menores, utilizada com menos frequência, pode ser pré-fabricada ou betonada *in situ*.
- **Estacas:** usadas como um tipo de fundação profunda quando as condições do solo não permitem que as cargas da torre sejam suportadas por meio de fundações rasas, devido à profundidade em que as camadas geotécnicas adequadas estão localizadas.

Com o surgimento de novas tecnologias, outros tipos de fundações também podem ser utilizados na construção de parques eólicos *onshore*, com menor frequência, porém os mais usuais foram apresentados, e para representação.

Na Figura 7 é possível visualizar uma fundação do tipo “estaca”.

Figura 7 – Construção de uma fundação tipo “estaca”.



Fonte: Silva (2017).

3.1.2.2 Torre

A torre é a estrutura que sustenta o rotor, a nacele e o gerador acima do solo, na altura adequada para o projeto. As construções dessas torres utilizam principalmente o aço, contudo, recentemente já é possível encontrar torres que utilizam o concreto como material.

3.1.2.3 Sistema de controle

A parte onde estão contidos o mecanismo de direção, o controle eletromecânico da turbina, responsável pelo ajuste, orientação do sentido das pás, controle de velocidade de rotação do rotor, de forma que essa velocidade garanta a eficácia de que a conversão da energia eólica em energia elétrica.

Além disso, o Sistema de controle e seus componentes possuem a função de monitorar o desempenho da turbina eólica, colher dados e resultados para a realização de manutenções corretivas e preventivas, buscando sempre corrigir e otimizar os processos de geração de energia.

3.1.2.4 Nacele

A estrutura que é sustentada pela torre é chamada de nacele, nela estão contidos o rotor, gerador elétrico e todo sistema de controle da turbina eólica. O

tamanho da nacele, pode variar, dependendo da composição da mesma, uma vez que o uso da caixa de engrenagens, componente responsável pela sincronização da baixa velocidade da turbina e a alta velocidade do gerador, pode ser dispensada em certos casos.

A nacele abriga todos os componentes vitais de um aerogerador, além dos já citados, o motor elétrico, redutor de velocidade e as pás, também estão contidas na mesma. A construção da nacele necessita de materiais duráveis e resistentes, assim, como por exemplo: aço, fibra de vidro e fibra de carbono, sendo projetada de modo a aguentar condições extremas de clima e temperatura, como chuvas, ventos intensos e grandes variações de temperatura.

Na Figura 8 é possível observar a imagem real de uma nacele.

Figura 8 – Exemplo de nacele em aerogerador.



Fonte: bfginternational (2015).

3.1.2.5 Eixo principal

O eixo principal é onde está contido o cubo, a estrutura na qual as pás estão fixadas, composto por aço ou ligas metálicas. Em torno do eixo que ocorre a rotação das pás, composto por materiais resistentes, como aço.

3.1.2.6 Rotor

O rotor é composto pelas pás da turbina eólica, normalmente essa composição é realizada por três unidades, as quais possuem um formato estrategicamente projetado para melhor aerodinâmica de forma a capturar a maior quantidade de vento possível.

A composição das pás é dada principalmente por fibra de vidro/carbono, ou seja, materiais leves e resistentes. Além disso, possuem um sistema de controle de passo, que busca que as pás rotacionem em seu próprio eixo, de modo a ajustarem a velocidade de rotação em diferentes forças e velocidades de vento.

Na Figura 9, é possível ver no detalhe uma pá eólica.

Figura 9 – Dimensão real de uma pá de uma turbina eólica.



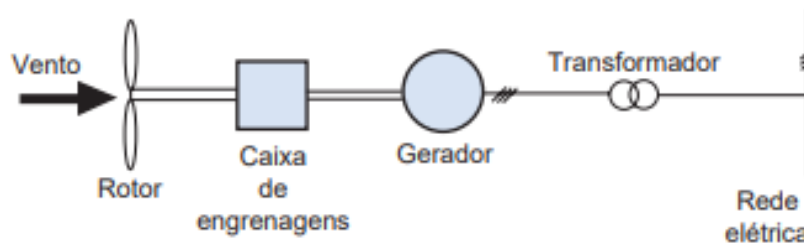
Fonte: ShareAmerica (2016).

3.1.2.7 Gerador

O gerador é uma máquina elétrica, que possui a função de utilizar o movimento da rotação das pás para conversão em energia elétrica. Os aerogeradores utilizam dois modelos de geradores, sendo máquinas síncronas e assíncronas. A ligação do rotor ao gerador é feita por alguns componentes que possuem a função de transmitir o movimento do rotor ao gerador. De uma forma simplificada, é possível assumir a caixa de engrenagem responsável por essa ligação. (PEREIRA, 2004).

O esquema dessa construção pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Esquematisação de uma turbina eólica simplificada.



Fonte: Pinto (2013).

O gerador representado na figura pode ser tanto uma máquina assíncrona quanto síncrona.

No caso das máquinas assíncronas, os geradores são os de indução, estes não necessitam de dispositivos para ativarem o sincronismo, uma vez que não operam na velocidade síncrona. Os geradores de indução mais utilizados são:

- Gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo;
- Gerador de indução Duplamente Alimentado;

Além das máquinas assíncronas, também existem as síncronas, que são representados pelos geradores síncronos

3.1.2.7.1 Gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo

Conhecido como motor de indução, não necessita de dispositivos para conexão à rede, ou seja, é ligado diretamente. O nome dado é devido ao formato do rotor, assemelhando-se a uma gaiola cilíndrica com barras condutoras de cobre ou de alumínio.

A energia elétrica gerada provém de forma eletromagnética, por meio do movimento do giro do rotor inserido no campo magnético do estator. Por meio do giro do rotor vai se criando o fenômeno da indução eletromagnética, de modo que as barras de cobre cessem as linhas de fluxo magnético do estator, induzindo uma corrente nelas.

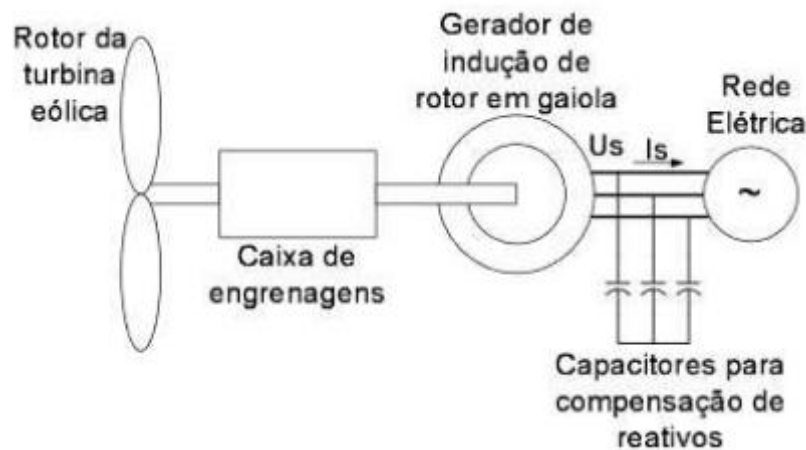
Por meio da corrente elétrica induzida é criado um campo magnético próprio que interage com o campo magnético do estator. Surgindo uma diferença de potencial, consequentemente produzindo uma corrente no estator, assim transferida para rede elétrica.

Os geradores com gaiola de esquilo são amplamente utilizados em projetos

de turbinas eólicas graças a sua robustez, simplicidade e adaptabilidade. Requerem baixa manutenção e suporta variações na velocidade de rotação das turbinas.

A utilização simplificada do gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo em uma turbina eólica pode ser vista na Figura 11.

Figura 11 – Esquemática de uma turbina com gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo.



Fonte: Pereira (2004).

3.1.2.7.2 Gerador de indução duplamente alimentado – DFIG

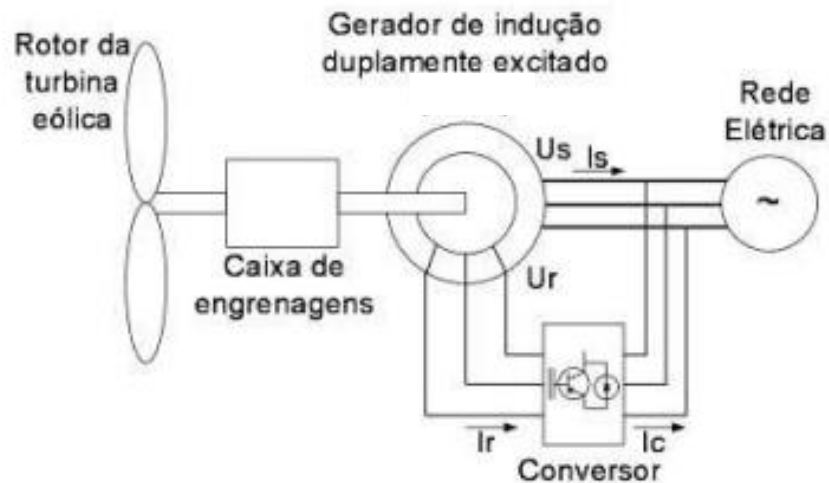
Este tipo de gerador se diferencia do gerador de indução apresentado por possuir dois circuitos de alimentação independentes, sendo um circuito de alimentação do estator, que normalmente está diretamente ligado à rede e um circuito de alimentação do rotor que utiliza de um conversor eletrônico de potência para sua ligação.

O conversor possibilita que a velocidade de rotação do rotor seja ajustada independentemente da velocidade do vento, possibilitando maior eficiência na geração de energia. Além disso, as vantagens estão na possibilidade de amplas faixas de velocidade do vento, uma vez que o conversor de potência no rotor permite a transferência de energia tanto para rede elétrica quanto para o estator.

O DFIG também possui a capacidade de disponibilizar o controle ativo de potência reativa, tornando-o preparado para trabalhar com oscilações de carga e fornecer segurança a instabilidade do sistema elétrico.

Na Figura 12 pode ser vista a representação simplificada do Gerador de indução duplamente alimentado.

Figura 12 – Esquematização de uma turbina com gerador de indução duplamente alimentado.



Fonte: Pereira (2004).

É importante ressaltar que as máquinas síncronas possuem sua velocidade fixa e sincronizada com a frequência da rede elétrica conectada.

3.1.2.7.3 Gerador síncrono

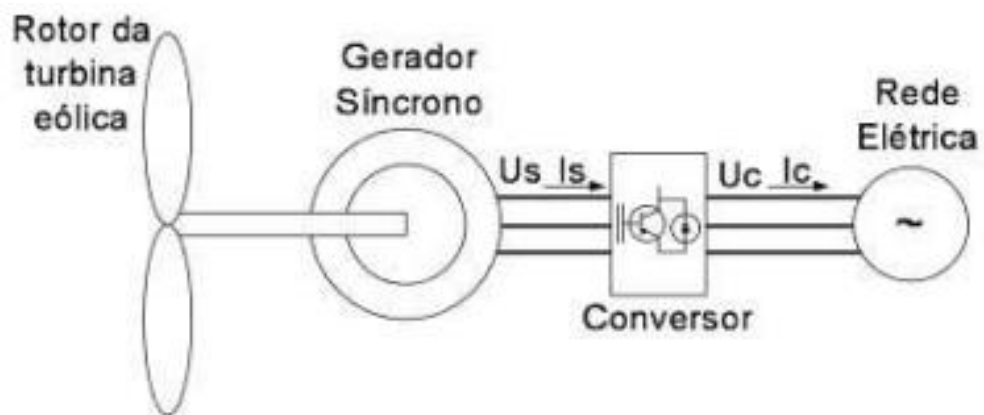
Este tipo de gerador consiste em um rotor e um estator, com o rotor constituído por um conjunto de bobinas enroladas em um núcleo de ferro. O estator consiste em bobinas fixas que também são enroladas em um núcleo. O diferencial de um gerador síncrono é a capacidade de manter uma frequência constante, sincronizada a rede elétrica.

O motivo desse sincronismo se dá pelo fato do campo magnético girante obtido pelo rotor, que se alinha com o campo magnético do estator, gerar uma corrente elétrica estável e síncrona.

A utilização desses tipos de geradores é ampla em usinas elétricas, que no caso possuem uma rotação constante, mas o uso em usinas eólicas é vasto. Devido a sua alta eficiência, utilização em altas potências e rápida resposta a flutuações de carga. (PINTO, 2013).

Na Figura 13 é feita sua apresentação.

Figura 13 – Esquemática de uma turbina com gerador síncrono.



Fonte: Pereira (2004).

Em casos de turbinas eólicas são utilizados dois tipos de geradores síncronos, sendo o gerador síncrono com rotor bobinado, que possui bobinas conectadas a um sistema de excitação externo. E o gerador síncrono, a ímã permanente, o qual gera o campo magnético de forma contínua.

3.2 Energia eólica *offshore*

Segundo PINTO (2013) “o termo eólico *offshore* se refere à produção de energia elétrica a partir de turbinas instaladas em uma superfície aquática (mar, oceano ou lagos). O propósito da energia eólica *offshore* e *onshore* são os mesmos: gerar energia elétrica a partir da força dos ventos; a grande diferença é que no caso da *onshore*, a construção ocorre em terra firme, já a *offshore* em superfícies aquáticas.

A energia eólica *offshore* tende a suportar parques com aerogeradores maiores e mais potentes, uma vez que no local de implantação existe mais espaços e ventos mais constantes e intensos, com isso os parques *offshore* tendem a serem mais constantes e confiáveis. (IBERDROLA, 2018).

Por outro lado, as turbinas *offshore* possuem grandes barreiras para serem construídas, que parte desde a legalização, fiscalização desses parques eólicos, passa pela construção, que necessita de uma construção capaz de suportar condições mais extremas, como a ação mais forte do vento e dos mares (água), além da mão de obra e manutenção dessas usinas.

3.2.1 Parques eólicos *offshore*

Os parques eólicos *offshore*, como já relatado anteriormente, são os parques onde o conjunto de turbinas fica localizado nas áreas marítimas. Logo, os aerogeradores são estruturas fixas no fundo do mar/lago ou são estruturas flutuantes que são ancoradas no leito aquático.

A ampliação e expansão dos parques eólicos *offshore* no mundo vêm crescendo de forma exponencial, isso graças a alguns fatores, como:

- Maior potencial eólico;
- Menor poluição sonora e visual;
- Espaço disponível mais amplo para instalação;
- Menor interferência na avifauna terrestre.

Apesar do grande número de benefícios, muitos empecilhos ainda barram a expansão desse modelo de usina em muitos países, como legislação, regulação ambiental e custos.

Um exemplo de parque eólico *offshore*, pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 – Parque eólico *offshore* Walney Extension.



Fonte: Portal Energia (2018).

A escolha do local ideal para instalação de um parque eólico *offshore* segue os padrões apresentados para o caso das usinas *onshore*, sempre adequando as leis terrestres às marítimas. E em alguns casos, não podendo considerar certos aspectos, como a distância de conexão com a rede elétrica, entre outros fatores, que a geração *offshore* demandará mais recursos e esforços.

Ressaltando sempre que cada projeto contém sua especificidade, tanto na quantidade de turbinas eólicas, dimensão e localização.

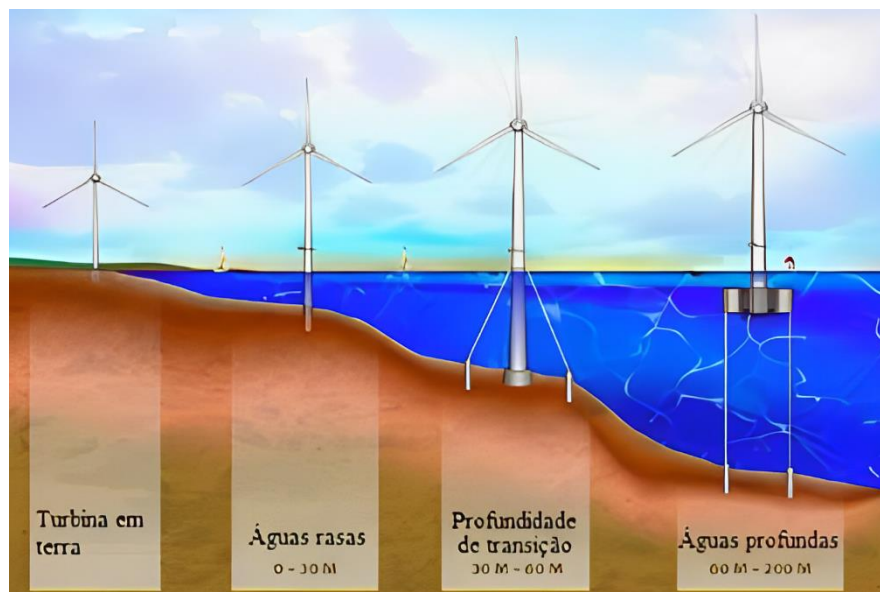
3.2.2 Turbinas eólicas *offshore*

A composição dos aerogeradores *offshore*, assemelham-se aos dos aerogeradores *onshore*, uma vez que o princípio de funcionamento é o mesmo. Contudo localizando-se em um ambiente mais abrasivo e corrosivo, os materiais da sua construção tendem a serem mais resistentes a certas condições, em muitos casos, conforme THICK (2004) expõe “utilizam-se revestimentos, como epóxi de zinco ou silicato de zinco”, e também usado proteções catódicas.

3.2.2.1 Fundação

Um dos componentes dos aerogeradores que mais se diferencia dos *onshore* é a fundação. Esta pode ser dividida em dois grupos, sendo eles: fundações de base fixa e fundações flutuantes, ancoradas por cabos. O tipo de fundações é baseado principalmente na profundidade e tipo do solo, como visto na Figura 15.

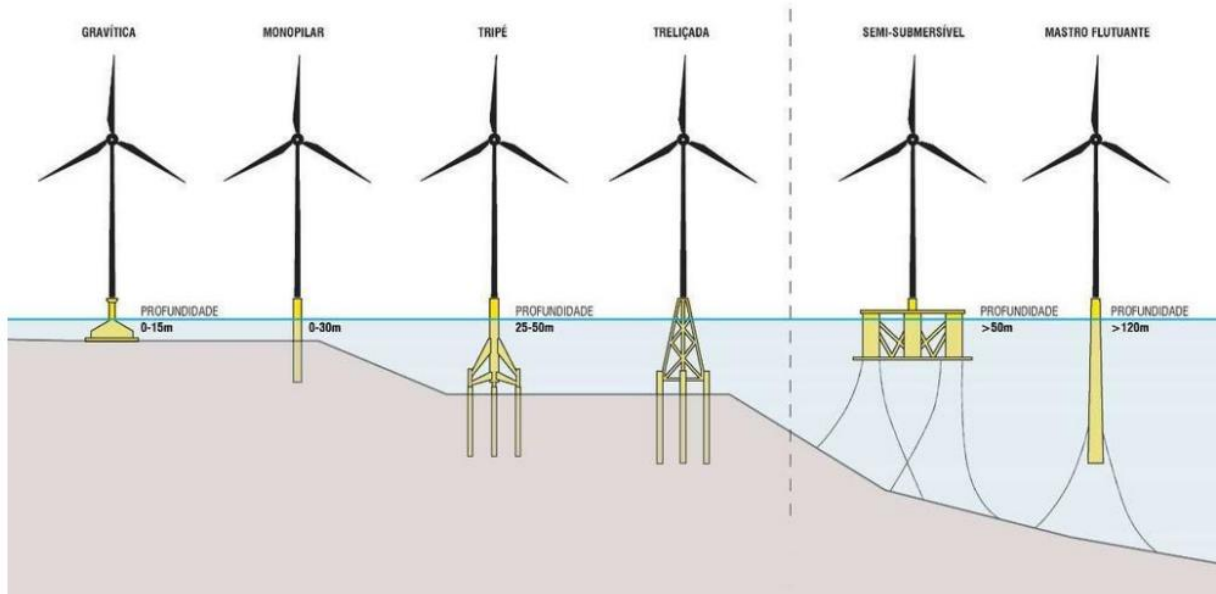
Figura 15 – Casos das fundações *offshore*, conforme a profundidade.



Fonte: Trapp (2009).

Com isso, os principais tipos de fundações, podem ser apresentadas pela Figura 16.

Figura 16 – Tipos de fundações *offshore*.



Fonte: Poli UFRJ (2017).

A partir da Figura 16, é possível explicar detalhadamente cada tipo de fundação:

- **Gravítica:** tipo de base utilizada em parques eólicos *offshore* que se apoia no próprio peso para ficar fixada no leito do mar. Essa fundação é constituída por um caixão de concreto ou aço, que é construído em terra firme e depois transportado e afundado no local de instalação. Durante o processo de construção, são realizadas etapas como a concretagem da base, montagem das paredes e finalização da estrutura. Antes da instalação é feita a preparação do local, incluindo drenagem e nivelamento do terreno. A colocação da fundação no solo marinho pode ser feita por meio de flutuação e afundamento controlado com o auxílio de embarcações especializadas. Após a instalação, o buraco de drenagem é fechado e são aplicadas medidas de proteção contra a erosão.
- **Monopilar:** Dependendo do tipo de solo, um tubo de aço é cravado no leito marinho até uma profundidade de 10 a 20 m com o auxílio de um macaco hidráulico numa plataforma flutuante”. Além desse modo apresentado, o modo de vibração ou percussão pode ser utilizado.
- **Tripé:** composta por um cilindro central que se conecta à torre da turbina e uma base de tripé apoiada em três estacas cravadas no solo, utilizando o mesmo

método de instalação das fundações de estacas individuais. Após a instalação, as estacas são conectadas à estrutura por meio de blocos de coroamento.

- **Treliçada:** amplamente utilizada por suportar grandes dimensões a fundação por treliça é composta por uma estrutura de tubos de aço interligados em forma de treliça, que é fixada no fundo do mar através da cravação de três ou quatro estacas. A conexão entre as estacas e a treliça é estabelecida por meio de soldagem, garantindo a integridade e estabilidade da estrutura.
- **Semi-Submersível:** conhecida como fundação de sucção é dependente do tipo de solo que será inserido o parque eólico. É constituída por uma estrutura cilíndrica de aço que é fechada na parte superior e aberta na inferior. É inserida no mar, ao atingir o solo, a água em seu interior é retirada por meio de bombas, permitindo que a fundação penetre completamente no solo. Nesse tipo de fundação, a carga é suportada principalmente pelo atrito entre a estaca e o solo, proporcionando estabilidade.
- **Mastro Flutuante:** As fundações flutuantes são utilizadas em áreas de mar profundo, onde não é possível fixar as fundações no leito marinho. Essas estruturas consistem em plataformas flutuantes que são ancoradas ao fundo do mar por cabos ou sistemas de posicionamento dinâmico. As fundações flutuantes oferecem flexibilidade na localização dos parques eólicos *offshore*, permitindo a instalação em áreas distantes da costa com ventos favoráveis.

Os aerogeradores *offshore* são equipamentos complexos e delicados, porém os demais componentes se assemelham na construção e caracterização dos já citados nos aerogeradores *onshore*, como a torre, nacelle, gerador, rotor. Sempre lembrando que são necessárias adequações para as condições adversas encontradas no ambiente *offshore*.

3.3 Conexão da energia eólica à rede elétrica

Nos projetos de parques eólicos, um aspecto crucial na sua elaboração é a etapa de conexão com a rede elétrica. Devido a essa grande importância é necessária toda uma documentação técnica e regulamentar. As exigências de conexão de parques eólicos são examinadas e validadas no ponto de conexão. O ponto de

conexão é, na maioria das vezes, definido como do lado de alta tensão do transformador elevador do parque eólico. A exigência principal é o limite do desvio de tensão causado pelo parque eólico no ponto de conexão. Dois por cento de tensão nominal é o limite comumente estabelecido. A potência de curto-circuito no ponto de conexão é o valor decisivo para a instalação ou não do sistema eólico. Os órgãos reguladores estabelecem limites de frequência e tensão para uma operação normal. (PINTO, 2013).

O tratamento da conexão de um parque eólico à rede elétrica deve ser manipulado de forma extremamente delicada, pois a partir dos parques eólicos potência ativa é injetada na rede, no ponto de conexão. Por muitos fatores, fica claro que a conexão afeta o fluxo de energia na rede, isso ocasiona o aumento de tensão no ponto de interface. Muitas regulamentações também devem ser cumpridas, como: respeitar valores máximos e mínimos de corrente de regime estacionário, analisar níveis de curto-circuito do sistema de proteção, e segundo PINTO (2013) estudo do fluxo de potência, de regime permanente e transitório eletromagnéticos.

No caso dos regimes estacionários, é possível obter o valor da variação de tensão, Δ (%), a partir do ponto de conexão do parque eólico, e é dada por PINTO (2013), por (4):

$$\Delta(\%) = 100 \left(\frac{S_n}{S_{cc}} \right) * \cos(\Psi_{cc} + \phi_i) = \left(\frac{100}{R} \right) * \cos(\Psi_{cc} + \phi_i) \quad (4)$$

Na equação apresentada é possível obter a variação de tensão, a partir de alguns dados coletados, no caso:

- S_n representa a potência aparente nominal do parque eólico, dada em (VA);
- S_{cc} é a potência aparente de curto-circuito no ponto de conexão, dada em (VA);
- Ψ_{cc} refere ao ângulo de impedância de curto-circuito no ponto de conexão, em (°);
- Φ_i o ângulo do fator de potência do parque eólico, em (°);
- R é referente a relação (S_n/S_{cc}).

3.3.1 Uso das linhas de transmissão

Usualmente os parques eólicos se instalam em locais estrategicamente

planejados, a proximidade às linhas de transmissões é um fator de peso nessa decisão, devido aos motivos financeiros e técnicos, como problemas elétricos e perdas. Cada país possui sua regulamentação a respeito das linhas de transmissão.

A caracterização dos principais tipos de redes de transmissão pode ser vista no Quadro 1.

Quadro 1 – Tipos de redes de transmissão e suas respectivas características.

Transmissão	Subtransmissão	Distribuição
Redes a partir de 230 kV. Transporte de energia elétrica a longas distâncias com capacidade de 200 MW ou acima.	Redes entre 34,5 kV e 138 kV. Transporte regional de energia. Capacidade de algumas dezenas de megawatts (cidades de médio porte ou regiões metropolitanas).	Redes inferiores a 34,5 kV. Transporte local de energia. Atendem diretamente os consumidores. Pequenas cidades.

Fonte: Adaptado de Pinto (2013).

Para a escolha correta do tipo de conexão, são levadas em conta algumas variáveis, principalmente a potência a ser instalada na rede e a tensão (PINTO,2013) classificada a partir da Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos níveis de tensão em Quilovolt (kV).

Classificação de Tensão	Tensão (kV)
BT – Baixa Tensão	Menor que 1
MT – Média Tensão	Entre 1 e 34,5
AT – Alta Tensão	Entre 34,5 e 230
EAT – Extra Alta Tensão	Entre 230 e 750
UAT – Ultra Alta Tensão	Maior que 750

Fonte: Adaptado de Custodio (2007).

Nos parques eólicos mais convencionais existentes, são ligados a redes de alta e média tensão. As redes de extra alta tensão são utilizadas em projetos ímpares que demandam um tratamento excepcional.

Um exemplo de parque eólico com linhas de transmissão próximas é mostrado na Figura 17.

Figura 17 – Parque eólico e rede de distribuição no estado da Bahia.



Fonte: Agência de Notícias da Indústria (2023).

Para ligação do parque eólico até a rede elétrica ser realizada, alguns processamentos na energia transmitida devem ser realizados. Assim que as turbinas ligadas em paralelo geram eletricidade, que gira em torno de 380 V a 690 V (PINTO, 2013), a partir daí, o tratamento de elevação da tensão é realizado por um transformador que dele parte para a subestação do parque. Nesse ponto, o caminho da energia pode tomar dois rumos.

O primeiro caminho, mais comum, é o que na própria subestação acontece uma segunda elevação até o resultado ideal de transmissão, na qual é utilizado um ou mais transformadores, até que a eletricidade seja entregue no ponto de conexão.

O segundo caminho acontece com menor frequência e dispensa a segunda elevação, que são nos casos de parques de menores potências, casos que a conexão é realizada diretamente na rede de distribuição.

3.3.1.1 Uso das linhas de transmissão em parques offshore

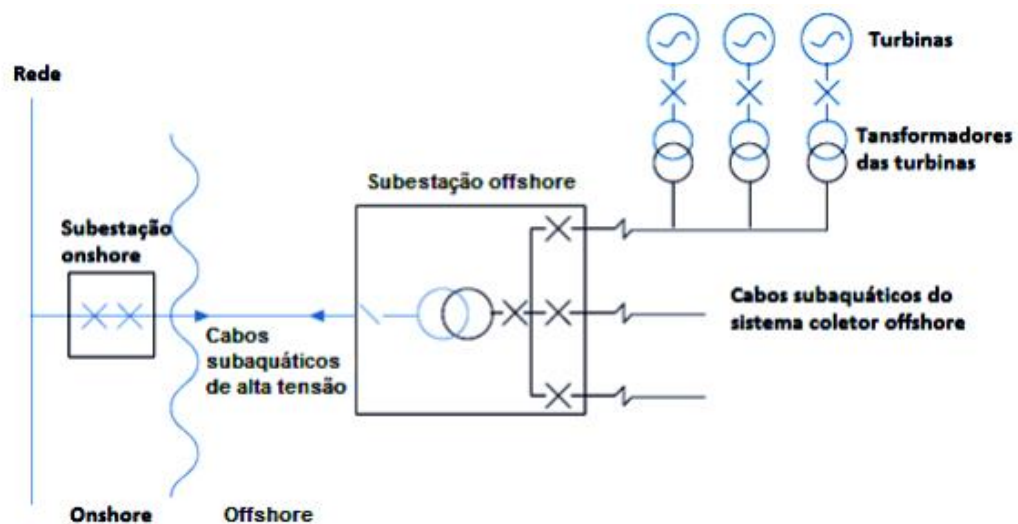
A ligação com a rede elétrica para parques eólicos tradicionais, mais conhecidos, já fora abordada anteriormente, porém alguns detalhes de atenção devem ser dados para a conexão com a rede elétrica para os casos *offshore*.

No caso dos parques eólicos instalados em regiões aquáticas, são realizados mais processos para elevar os níveis de tensão até a rede, normalmente utilizando subestações *offshore*, até o destino final. Para tal processo, são necessários alguns elementos, como: geradores, cabos entre as turbinas, subestações *offshore*, cabos de transmissão para costa e subestações *onshore*.

É importante ressaltar que cada projeto contém suas especificações e a partir delas que são dimensionados a quantidade de elementos e dimensões.

Um exemplo de representação de conexão de um parque *offshore* a uma rede elétrica pode ser vista através do diagrama da Figura 18.

Figura 18 – Diagrama de linha de uma conexão *offshore* a rede.



Fonte: EWEA (2009).

A transmissão *onshore* é feita por conexões de corrente alternada CA, porém nos casos *offshore*, a conexão CA pode gerar problemas devido a grandes distâncias até as redes. Um impacto desse tipo de conexão é na potência reativa, que resulta na diminuição do fator de potência uma vez que pode expressá-lo por (5):

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{kW}{kVA} = \cos\theta, \quad (5)$$

sendo:

- FP o fator de potência;
- P a potência ativa, medida em watts (W);
- S a potência aparente, medida em volt-ampères (VA);

- Θ o ângulo de fase entre a potência ativa (P) e a potência aparente (S).

A potência reativa (Q) está relacionada à potência aparente (S) e ao ângulo de fase (θ) através de (6):

$$Q = S * \text{sen}(\theta) \quad (6)$$

A conexão corrente contínua CC, que por não existir potência reativa e ter uma frequência dos geradores independente da frequência da rede terrestre, não tem queda no fator de potência. Porém, uma desvantagem desse tipo de conexão é que os conversores CC/CC tem uma eficiência menor que o caso dos CA, assim, resulta em perdas maiores nesse tipo de conexão.

Como são utilizados os tipos de cabos CC em conexões *offshore*, eles tendem a serem manufaturados com maior resistência para suportar as condições adversas, além da manufatura esses tipos de cabos diferem nas suas especificações técnicas. Um exemplo, é a distância de transmissão que podem ser utilizados, importante ressaltar que os cabos CA, também são utilizados em conexões *offshore*.

Nas Figuras 19 e 20, é possível comparar cabos CA E CC e suas diferenças.

Figura 19 – Cabos de conexões CA, tipo XLPE.



Fonte: Marques (2010).

Figura 20 – Cabos de conexões CC, tipo OF, MI, XLPE, respectivamente.



Fonte: Marques (2010).

3.3.2 Custos de transmissão e nível de compartilhamento

Para ser entregue uma unidade de energia, que é medida em MWh, dos parques eólicos até a rede, existe um custo envolvido, esse custo é denominado como custo de transmissão. A partir dessa energia é possível avaliar perdas e outros fatores, a partir de (7). (MURAYAMA, 2012).

$$EE = EP * (1 - P) * (1 - U), \quad (7)$$

sendo:

- EE representa a energia entregue, dada em MWh;
- EP representa a energia produzida, dada em MWh;
- P são as perdas, dada em (%);
- U é a não disponibilidade, em (%).

Em questões de níveis de compartilhamento, pode-se afirmar que a energia eólica desempenha um papel importante no sistema elétrico, surgem questões sobre a interação entre um grande número de turbinas e as estações de energia convencionais. A imprevisibilidade do vento pode causar problemas de controle ao se conectar com as estações convencionais. Em redes de alta capacidade, a interconexão se torna relevante quando a energia eólica representa uma parte significativa de participação do sistema. A integração em larga escala da energia eólica é concebível apenas como um componente integrado ao sistema convencional de energia, o que preocupa os produtores e concessionárias de energia a longo prazo.

(PINTO, 2013).

3.3.3 Impactos das conexões na rede elétrica

Alguns dos impactos causados pela conexão dos parques eólicos na rede elétrica já foram previamente citados, mas pode-se citar alguns fatores que podem gerar contratempos, como: necessidade do uso de conversores de potência; força motriz não controlável; grande número de componentes (aerogeradores) que fazem partes da usina eólica. Logo, os tratamentos para esses casos devem ser particularizados e analisados os possíveis impactos nas redes elétricas locais e globais.

3.3.3.1 Impactos das conexões na rede elétrica local

Algumas ações devem ser tomadas devido aos impactos causados na rede elétrica local, por conta da conexão aos parques eólicos. É possível citar alguns, conforme BICALHO (2013):

- **Controle de Tensão:** As turbinas eólicas têm diferentes impactos nas redes locais de energia, dependendo do tipo de funcionamento escolhido: velocidade fixa ou variável. No caso da velocidade fixa, utiliza-se um gerador de indução tipo gaiola de esquilo, já abordado anteriormente, que é econômico e de fácil manutenção, mas não possui controle de tensão da rede. Nesse caso, o controle de tensão é feito por meio da inserção de potência reativa com o uso de elementos externos, como bancos de capacitores. Já as turbinas de velocidade variável têm a capacidade de variar a potência reativa trocada com a rede, o que pode influenciar na estabilização da tensão na rede elétrica local, dependendo do tipo de conversor utilizado para cada turbina.
- **Coordenação da Proteção:** No caso das turbinas eólicas que operam à velocidade fixa, os geradores de indução contribuem apenas para as correntes subtransitórias em faltas equilibradas, enquanto em faltas desequilibradas contribuem integralmente para o valor da corrente de falta. Já para as turbinas em funcionamento à velocidade variável, os geradores do tipo DFIG também contribuem para as correntes de falta na rede. No entanto, devido à sensibilidade

dos conversores de potência a sobrecorrentes, é necessário que as turbinas tipo DFIG sejam desconectadas rapidamente da rede em caso de faltas, exceto em situações específicas estabelecidas pelos códigos de rede para a capacidade de *Ride Through Fault* (Suportabilidade à Faltas), que será tratado mais adiante.

- **Qualidade da Energia:** As turbinas que trabalham em velocidade variável são relacionadas às distorções harmônicas, pelo fato de serem usados conversores de potência, que são fontes de correntes harmônicas de alta frequência. Já em casos de turbinas que operam em velocidade fixa, as variações de tensões também são pequenas, uma vez que são recebidas devido a velocidade do vento, são diretamente à potência de saída do gerador.

3.3.3.2 Impactos das conexões na rede elétrica global

Os principais impactos na rede global são apresentados, conforme BICALHO (2013):

- **Estabilidade da rede:** No caso das turbinas operando à velocidade fixa com gerador de indução de rotor em gaiola de esquilo, um problema grave que pode ocorrer é sobre a velocidade do rotor. Isso acontece devido a faltas no sistema, resultando em uma queda de tensão que desequilibra a potência mecânica gerada pelo vento e a potência gerada para a rede. Após a falta, há outro problema em que o gerador absorve reativos da rede, retardando a recuperação da tensão. Turbinas de velocidade fixa com geradores de gaiola de esquilo não são capazes de contribuir para a estabilidade da rede, o que é fundamental para fornecer energia de qualidade aos consumidores. Para turbinas de velocidade variável, um risco para a estabilidade do sistema é a sensibilidade dos conversores de potência às variações de tensão e corrente. Se houver uma grande presença dessas turbinas e elas se desconectarem para pequenas e médias variações de tensão, uma grande queda de tensão afetará todo o sistema de energia. Para evitar esse problema, os códigos de rede estabelecem os níveis de afundamento de tensão que as turbinas eólicas devem suportar sem se desconectar, evitando grandes perdas de potência de geração.
- **Tensão, potência reativa e frequência:** Nos sistemas de potência, a tensão é grandemente influenciada pelo fluxo de potência reativa. Turbinas de velocidade

fixa dependem da absorção de potência da rede para sustentar o campo magnético do gerador e não têm a capacidade de fornecer potência reativa sem o uso de dispositivos externos, como capacitores para compensação do fator de potência. Por outro lado, turbinas de velocidade variável possuem sistemas de controle que, por meio de conversores de potência, permitem a absorção ou fornecimento de potência reativa. Esse controle é responsável por manter a tensão dentro dos limites estabelecidos pelas normas regionais. Vale ressaltar que tanto as turbinas de velocidade fixa quanto as de velocidade variável desempenham um papel na manutenção da estabilidade da frequência de operação da rede.

3.3.4 Capacidade de "*Fault Ride Through* - FRT" (Suportabilidade a Faltas)

Por volta dos anos 2000, as turbinas eólicas eram prontamente desconectadas da rede elétrica em caso de qualquer perturbação. Isso era feito para evitar riscos de ilhamento e perda de conexão com a rede, no entanto, essa prática resultava em disparos em bloco, causando instabilidade no controle de tensão e frequência. Com o aumento da integração de sistemas eólicos à rede elétrica e a imprevisibilidade do vento, surgiram novas exigências e requisitos para lidar com esses desafios.

Casos apresentados impactam em muitas instabilidades, em busca de evitar esse fato, requisitos de segurança e qualidade foram propostos e colocados em prática. Um exemplo desses requisitos citados é a capacidade de um sistema suportar afundamentos de tensão (FRT), (PINTO, 2013).

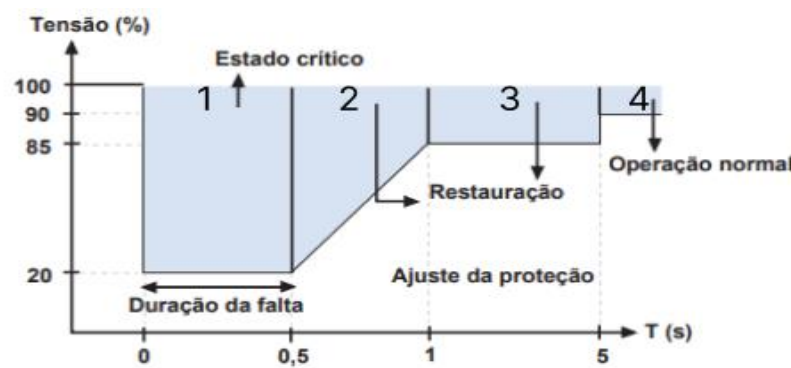
Os requisitos para projetos de energia eólica são altamente específicos e variam de acordo com as regulamentações e os tipos de projetos adotados em cada país. Em grande parte dos casos, esses requisitos visam garantir tempos mínimos de operação dos geradores eólicos, mesmo diante de possíveis falhas.

O caso específico do Brasil é mostrado a seguir.

3.3.4.1 Capacidade de "FRT" (Suportabilidade a Faltas) no Brasil

A partir da Figura 21, é possível avaliar a suportabilidade à faltas no cenário brasileiro.

Figura 21 – Faixas de suportabilidade a faltas no Brasil.



Fonte: Adaptado de PINTO (2013).

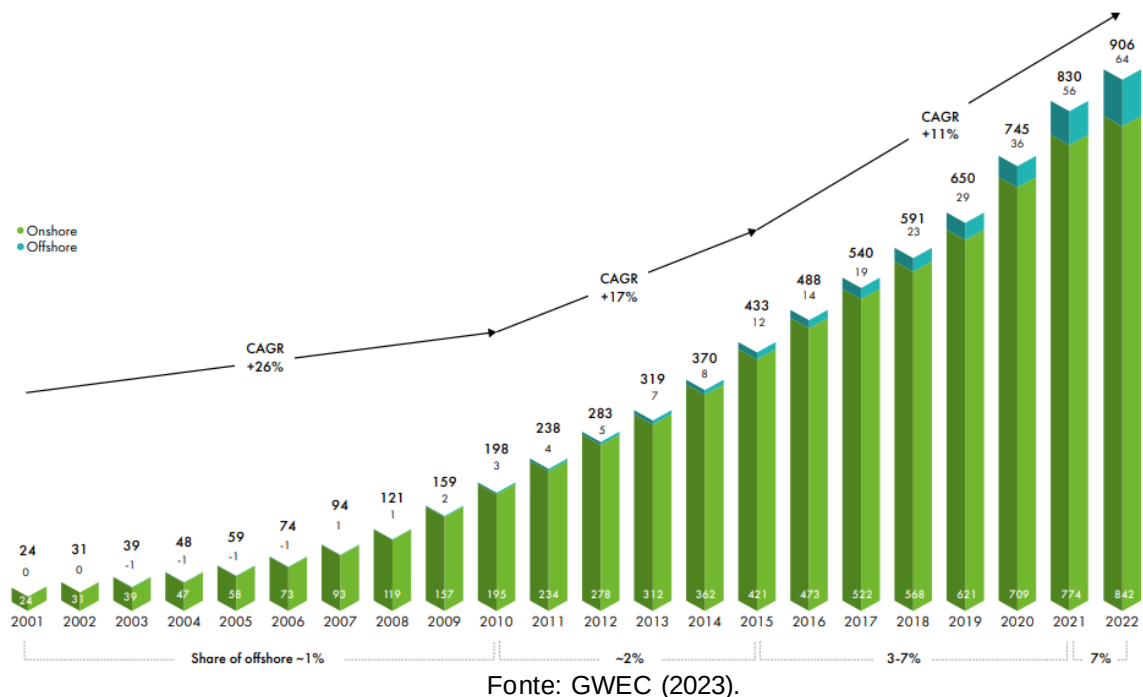
O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) estipula a curva de suportabilidade a falhas no Brasil essa curva é dividida em quatro faixas, as quais são detalhadas a seguir:

- **Faixa 1:** Se a queda de tensão estiver até 80%, ou tratada em p.u, entre 1 e 0,2 p.u., por um tempo de até 0,5 segundos (s), os aerogeradores devem permanecer conectados à rede elétrica.
- **Faixa 2:** Onde está acontecendo o ajuste da proteção, ou seja, a melhor solução/correção possível, ainda opera em intervalos de tempo reduzidos e existe um crescimento linear.
- **Faixa 3:** Momento da restauração do sistema, pode manter por um intervalo de tempo de 4 segundos (s) e dentro dos 15% de queda de tensão.
- **Faixa 4:** Caso funcionamento normal, deve se ajustar a partir dos 5 segundos, e operando acima dos 90% de tensão nominal, não deve ser interrompido, ou seja, continua seu fluxo normal.

4. CENÁRIO ATUAL DA ENERGIA EÓLICA NO MUNDO

O Conselho Global de Energia Eólica, do inglês, *Global Wind Energy Council* (GWEC), apresenta os dados de crescimento das instalações de parques eólicos, tanto *onshore*, como *offshore*. A partir da Figura 22 é possível retirar algumas conclusões apresentadas em diante.

Figura 22 – Taxas de crescimento da instalação de energia eólica até 2022 em (GW).



Na Figura 22, é possível ver os avanços das instalações eólicas, contendo uma ampliação a cada ano que passa como visto, os parques *onshore* são predominantes em relação aos *offshore*, porém junto com expansão total, ocorre também a expansão das instalações *offshore*, que é vista com bons olhos, pelas suas vantagens e aproveitamento de locais não utilizados, porém demanda de um avanço maior em desenvolvimentos e regulamentações, como mostrado anteriormente.

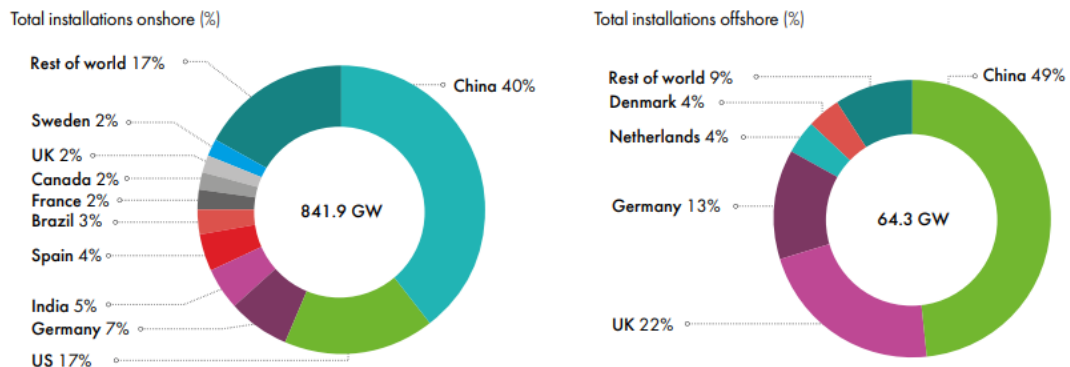
Na figura 22 é mostrada a taxa de crescimento anual composta, do inglês, *compound annual growth ratio* (CAGR), que tem diminuído nos últimos anos, porém ao avaliar a quantidade produzida, esse dado não retrata a evolução de forma real.

Essa expansão acelerada em um curto período pode ser explicada pela busca de novas fontes de energias renováveis, junto a isso a ampliação em pesquisa e desenvolvimento, surgimento de novas tecnologias, graças a revolução tecnológica.

O que traz cada vez mais, equipamentos de alta desempenho e redução nos custos de produção em escala.

No cenário atual, alguns países ainda predominam na geração de energia eólica, o que pode ser visto na Figura 23, onde é trazido os índices de instalação *onshore* e *offshore* dos principais países.

Figura 23 – Instalações totais *onshore* e *offshore*, de cada país, respectivamente.



Fonte: GWEC (2023).

Conforme visto na Figura 23, alguns países predominam em percentagem de instalações; em primeiro lugar, completamente isolada, vem a China, tanto nas instalações *onshore* como *offshore*, com 40% das instalações *onshore* e 49% nas *offshore* já o segundo lugar diferencia das *onshore* para *offshore*, no primeiro caso está os Estados Unidos com 17% das instalações, e no segundo caso o Reino Unido, com 22% das instalações. O terceiro lugar segue a linha do primeiro caso, com a Alemanha ocupando essa posição, tanto nas instalações *onshore*, com 7%, e nas instalações *offshore*, com 13%. O Brasil aparece nessa lista de instalações ocupando a sexta posição, com 3% dos 841,9 GW.

O que fazem esses países ocuparem esse ranking é uma série de fatores, é possível listar alguns principais:

- Recursos naturais favoráveis;
- Compromisso com as energias renováveis;
- Investimento em pesquisa e desenvolvimento;
- Infraestrutura e capacidade industrial;
- Políticas de incentivo e apoio governamental.

Por meio desses fatores a ampliação da instalação de energia eólica só tende a aumentar, além disso o uso da energia eólica corrobora para o aumento dessa e de outras fontes de geração de energia.

4.1 Cenário atual da energia eólica na China

A China ocupa a primeira posição no ranking de energia eólica instalada *onshore* e *offshore*. Um dos maiores incentivadores para os altos índices apresentados é a busca incessante para redução de gases de efeito estufa, uma vez que segundo BBC BRASIL (2021), “O maior produtor de energia eólica *onshore* no mundo é também o país que mais emite CO₂ no mundo”.

Pelo fato da matriz energética chinesa ser composta prioritariamente por combustíveis fósseis, essa transição energética é necessária e tende a continuar expandindo.

Em reconhecimento ao crescente consenso global acerca das mudanças climáticas, a China fez uma série de promessas climáticas nos últimos seis meses. Na Assembleia Geral das Nações Unidas em setembro de 2020, o presidente Xi Jinping anunciou que a China vai aprimorar sua NDC 7 tendo como alvo o pico de emissões de CO₂, antes de 2030 e a neutralidade de carbono até 2060. (GWEC, 2021).

Como prova da intensa ampliação eólica na China, existe um marco na história da energia eólica chinesa, que é a Usina Eólica de Gansu Jiuquan, localizada na província de Gansu, que se destaca como uma das maiores usinas eólicas do mundo. Uma parte do parque eólico de Gansu ou parque eólico de Jiuquan, é apresentado na Figura 24.

Figura 24 – Trecho do parque eólico de Gansu.



Fonte: Popolon (2013).

Conforme informado por REUTERS (2016), a capacidade instalada da Usina

Eólica de Gansu tem um total de aproximadamente 7.965 megawatts MW. Composto por aproximadamente 7.000 turbinas eólicas, espalhadas por uma área de 4000 quilômetros quadrados. Em termos de geração de energia, a usina é capaz de uma produção anual de cerca de 16 bilhões de kilowatt-hora (kWh) ou 16.000 GWh.

Os dados apresentados destacam o grande investimento chinês nos parques eólicos e a busca da transição energética.

4.2 Cenário atual da energia eólica nos Estados Unidos

Ocupando o segundo lugar no ranking de instalações eólica *onshore*, os Estados Unidos também ocupam o segundo lugar no ranking de maiores produtores de CO₂, assim, o governo americano busca fontes de energia sem poluição para chegar a uma matriz energética limpa. Conforme o GWEC (2021), a data estabelecida para tal meta é de 2035.

Os Estados Unidos possuem a matriz energética predominantemente de combustíveis fósseis e, para atingir as metas propostas, o país busca intensificar seu processo de transição energética.

O investimento em parques eólicos é comprovado ao se ver projetos consolidados e projetos em execução, como é o caso do parque eólico *Alta Wind Energy Center* (AWEC), ou também conhecido como *Mojave Wind Farm* localizado na Califórnia, o projeto busca, segundo o site *Renewable Energy World* (2022), "reduzir as emissões de dióxido de carbono em mais de 5,2 milhões de toneladas métricas, o que equivale a tirar 446.000 carros das ruas". O parque está mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Trecho do parque eólico (AWEC).



Fonte: Wikimedia Commons (2022).

Conforme uma nota do site americano, *American Wind Energy Association* (2023), o parque contém uma capacidade instalada de 1.550 MW, e busca atingir os 3.000 MW. Aproximadamente 600 aerogeradores compõem o parque eólico, em termos de capacidade de abastecimento, estima-se que o parque tem capacidade de abastecer cerca de 275.000 residências.

4.3 Cenário atual da energia eólica no Reino Unido

Diferentemente dos tópicos abordados, neste caso, trata-se de quatro países em vez de apenas um, sendo eles: Inglaterra, Escócia, País de Gales e Irlanda do Norte. Como visto na Figura 23 o Reino Unido contém 22% dos 64,4 GW de instalações eólicas *offshore* do mundo. Mundialmente, não está entre os principais países emissores de carbono segundo os dados apresentados pelo site *Statistical Review of World Energy* (2021), o país ocupava a quarta posição no ranking europeu em 2020, vindo de uma queda dos valores de carbono produzido, de 512,5 milhões de toneladas em 2012 para 319,4 milhões de toneladas em 2020.

O Reino Unido também contém sua matriz energética prioritariamente movida por combustíveis fósseis, como gás natural. Em busca da reversão desse cenário por meio da matriz energética, políticas de incentivo a transição energética, estimulam o desenvolvimento da energia eólica, o que se une aos recursos eólicos *offshore* favoráveis.

O Reino Unido possui um amplo potencial eólico devido à sua localização geográfica, com costas expostas ao Oceano Atlântico e ao Mar do Norte, que recebem ventos consistentes e fortes. Essa disponibilidade de recursos eólicos viáveis é fundamental para o desenvolvimento de parques eólicos *offshore* em larga escala.

Em busca de fornecer energia limpa e renovável alguns projetos de usinas eólicas *offshore* estão em expansão no Reino Unido um desses projetos é o *East Anglia One*, do grupo *Iberdrola*, que através de sua filial *ScottishPower Renewables*, colocou em funcionamento um dos maiores parques eólicos *offshore* do mundo. O projeto está na Figura 26 (IBERDROLA, 2018).

Figura 26 – Projeto do parque eólico *offshore* *East Anglia One*.



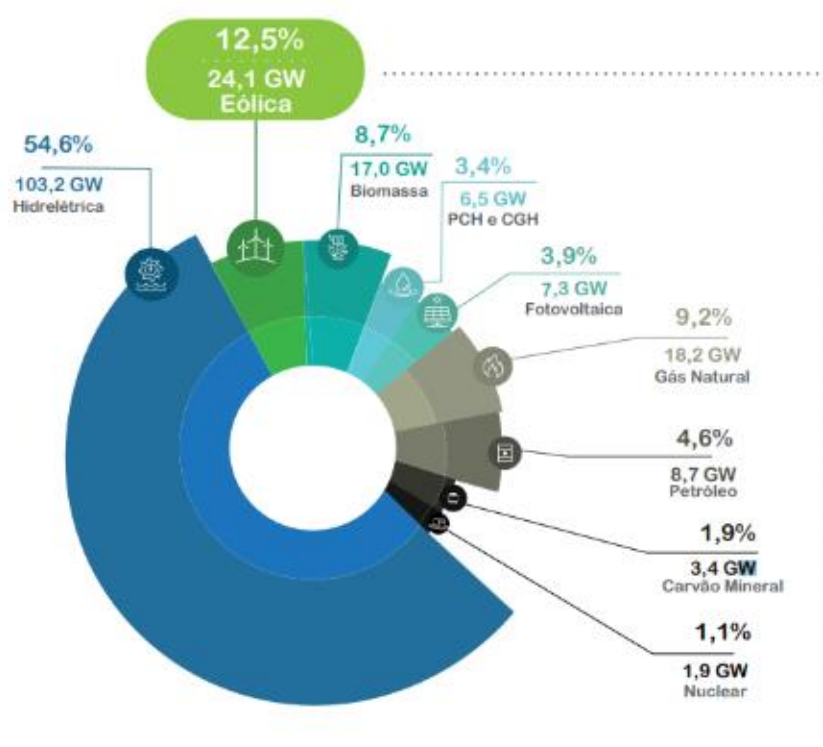
Fonte: IBERDROLA (2018).

O projeto apresentado, segundo a *ScottishPower Renewables*, está situado a cerca de 43 quilômetros da costa de Suffolk, na Inglaterra. Com uma capacidade total instalada de 714 MW, o projeto tem a capacidade de fornecer energia renovável para mais de 630.000 residências no Reino Unido. Ele é composto por 102 turbinas eólicas do tipo Siemens Gamesa SWT-7.0-154, cada uma com uma capacidade de 7 MW. As turbinas possuem um diâmetro de rotor de 154 metros e uma altura total de 190 metros. Além das turbinas, o parque inclui uma infraestrutura submarina que consiste em cabos de transmissão para conectar as turbinas ao ponto de conexão na costa, permitindo que a eletricidade gerada seja transportada para a rede elétrica terrestre. O parque entrou em operação no ano de 2020.

5. CENÁRIO ATUAL DA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

Diferentemente dos países apresentados no Capítulo 4, a matriz elétrica do Brasil não está concentrada em combustíveis fósseis, muito pelo contrário a geração de energia no Brasil é predominante de fontes renováveis, como pode ser observado na Figura 27.

Figura 27 – Matriz elétrica brasileira (GW).



Fonte: SIGA/ANEEL (2022).

Mesmo possuindo outras fontes de energias renováveis, que podem proporcionar a busca pela emissão de carbono zero, o Brasil ainda possui um valor considerável de instalações eólicas. Segundo dados da ABEEÓLICA (2023) contém 24,13 GW de capacidade instalada distribuída em 869 parques eólicos, contando com 9.770 aerogeradores em operação e ocupa o sexto lugar em capacidade instalada no mundo.

Em uma estimativa realizada pela ABEEÓLICA em 2021, a geração de energia eólica contribuiu na redução da emissão de carbono (CO₂) em 34,4 milhões de toneladas, o que equivale aproximadamente à emissão de carbono de 34 milhões de veículos de passeio.

O que proporciona esse avanço na instalação de energia eólica é

primeiramente o grande potencial eólico, contando com extensas áreas costeiras e ao vento constante em várias regiões. Graças a esse potencial e a necessidade de expandir o leque de fontes de energia renováveis do país, e complementar a fonte hídrica, o governo brasileiro começou a implementar políticas de incentivo e regulamentações favoráveis ao desenvolvimento da energia eólica, como o PROEÓLICA, PROINFA, e leilões de energia, que são detalhados posteriormente.

Agregando a todos esses fatores que ajudam a energia eólica evoluir no Brasil, seu fator de capacidade tem grande parcela nesse desenvolvimento. O fator de capacidade (FC) eólico, é a razão entre a geração efetiva de uma usina eólica em determinado período e sua capacidade máxima (ABEEÓLICA, 2015).

O cálculo do fator de capacidade é representado por (8):

$$FC = \frac{E_t}{P} * t, \quad (8)$$

sendo:

- FC como o fator de capacidade;
- E_t energia gerada em um período de tempo, em MW/h;
- P Potência, capacidade instalada, em MW;
- t é o intervalo de tempo, em h.

É possível simplificar esse cálculo para obter o fator de capacidade anual, conforme (9):

$$FC = \frac{E_{anual}}{P} * 8760, \quad (9)$$

sendo,

- E anual a energia gerada em um ano, em MW/h;
- 8.760, corresponde as horas totais de um ano h.

Vista a importância de se manter um fator de capacidade, para isso, algumas medidas podem ser adotadas para obter-se um fator de capacidade de qualidade, sendo algumas delas:

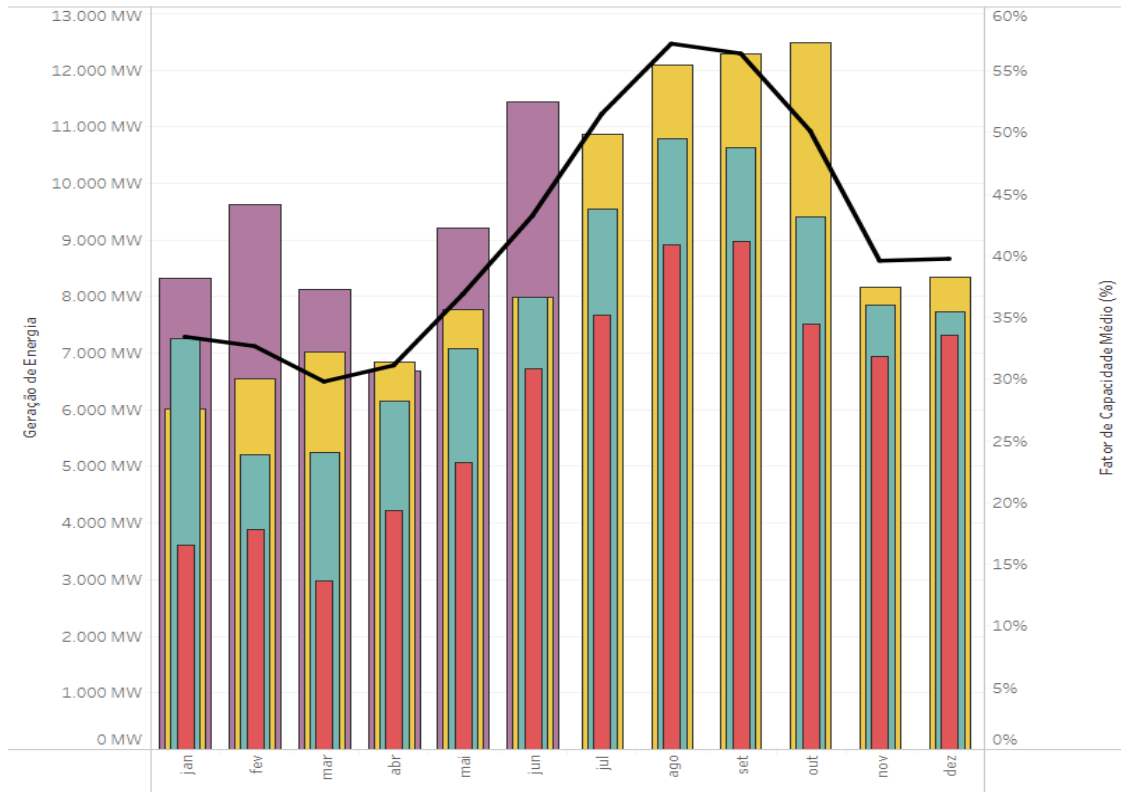
- **Identificar locais com maior potencial eólico:** Realizar estudos e análises detalhadas para identificar regiões com ventos mais consistentes e de maior

velocidade, onde a instalação de parques eólicos seja mais eficiente;

- **Aprimorar a tecnologia das turbinas eólicas:** Investir em pesquisas e desenvolvimento para aprimorar a eficiência e a capacidade de geração das turbinas eólicas. Isso inclui o desenvolvimento de turbinas maiores, com rotores mais eficientes e sistemas de controle avançados;
- **Melhorar a previsibilidade do vento:** Investir em sistemas de previsão meteorológica de curto prazo mais precisos, que possam fornecer informações detalhadas sobre a velocidade e a direção do vento. Isso auxilia na gestão mais eficiente da geração eólica e no planejamento da operação do sistema elétrico;
- **Aumentar a interligação da rede elétrica:** Melhorar a infraestrutura de transmissão e interligação da rede elétrica, permitindo o escoamento mais eficiente da energia gerada pelos parques eólicos para os centros de consumo. Isso evita perdas e maximiza o aproveitamento da energia gerada;
- **Investir em armazenamento de energia:** Desenvolver sistemas de armazenamento de energia em larga escala, como baterias ou sistemas de armazenamento térmico, para compensar a intermitência da geração eólica. Isso possibilita o uso mais eficiente da energia gerada, mesmo quando a demanda não está sincronizada com a disponibilidade de vento;
- **Estimular a participação da iniciativa privada:** Promover políticas e incentivos para atrair investimentos privados no setor eólico, estimulando a expansão da capacidade instalada e a implementação de novos projetos;
- **Fortalecer o planejamento energético:** Realizar estudos de planejamento energético de longo prazo, considerando a expansão da capacidade eólica de forma integrada com outras fontes de energia renovável e com a demanda futura, visando a um sistema elétrico equilibrado e confiável.

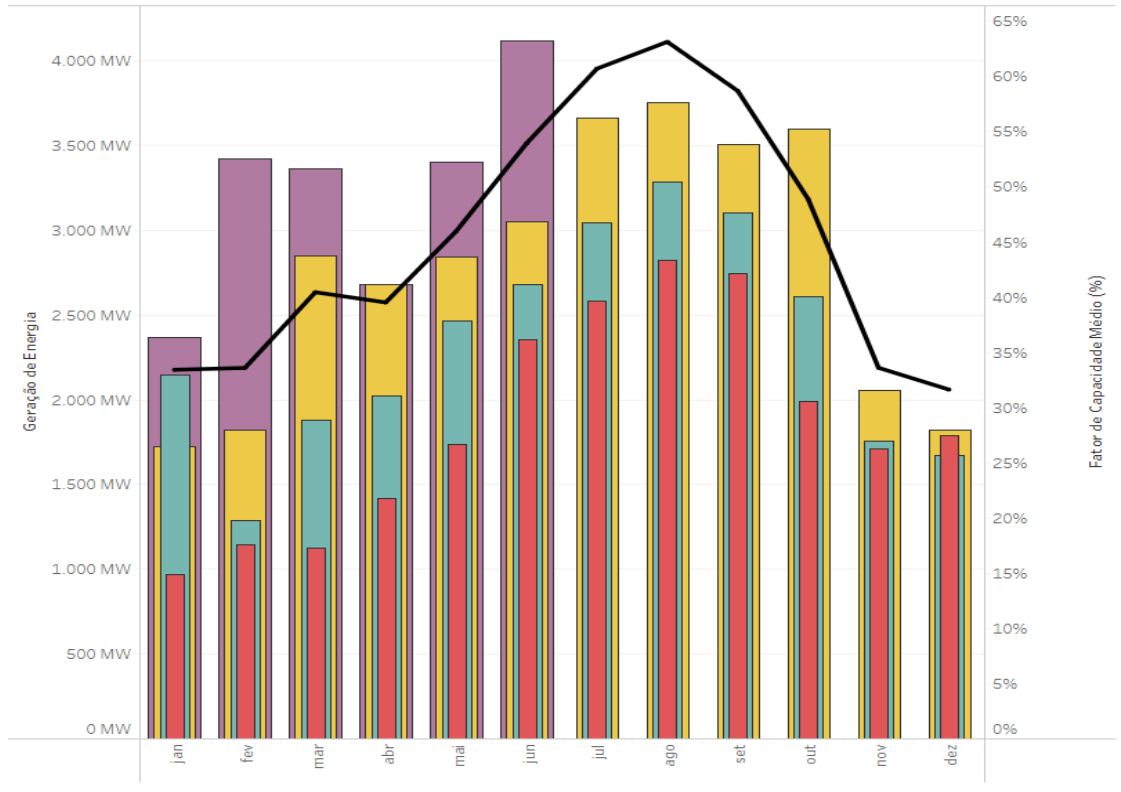
Algumas destas práticas já são utilizadas no Brasil, o que reflete no bom fator de capacidade existente no país. As Figuras 28 a 37 mostram o fator de capacidade médio mensal e a geração de energia eólica do Brasil e dos principais estados geradores, a partir do ano de janeiro 2020 até junho de 2023. Nas colunas os anos de 2020, 2021, 2022 e 2023 são representados pelas cores: vermelho, verde amarelo e roxo, respectivamente.

Figura 28 - Geração e Fator de Capacidade Mensal – Brasil (MWmed).



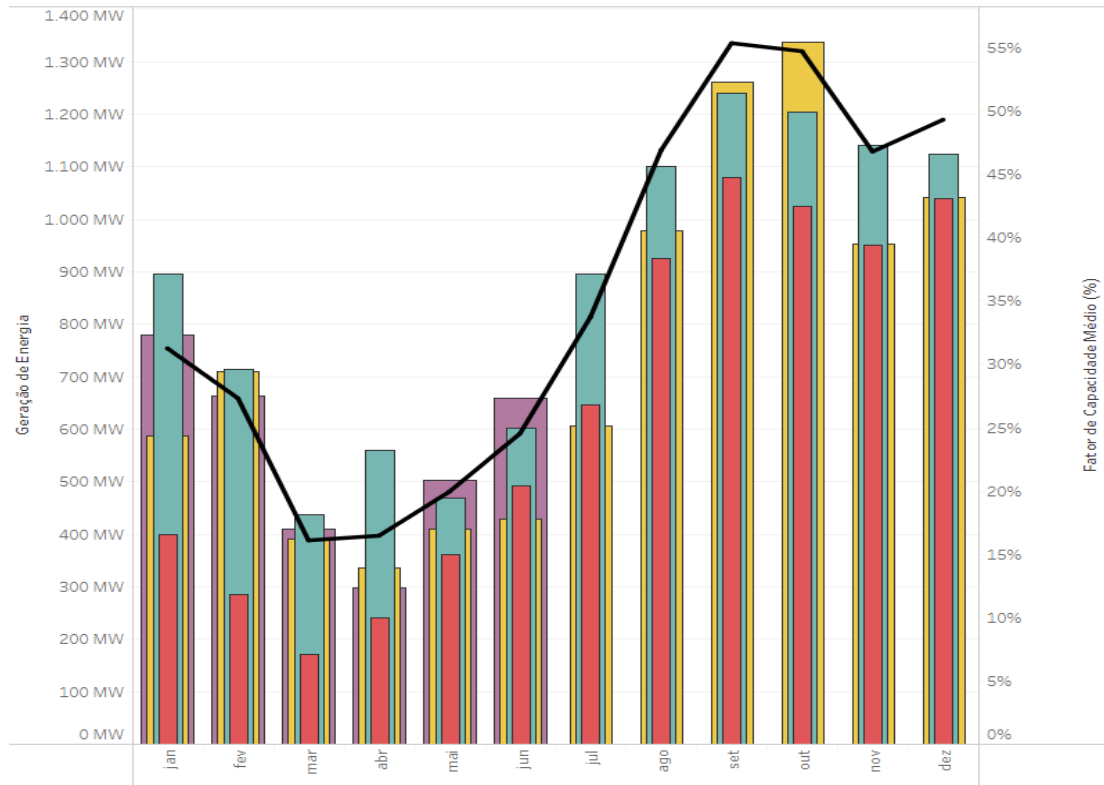
Fonte: ONS (2023).

Figura 29 - Geração e Fator de Capacidade Mensal – Bahia (MWmed).



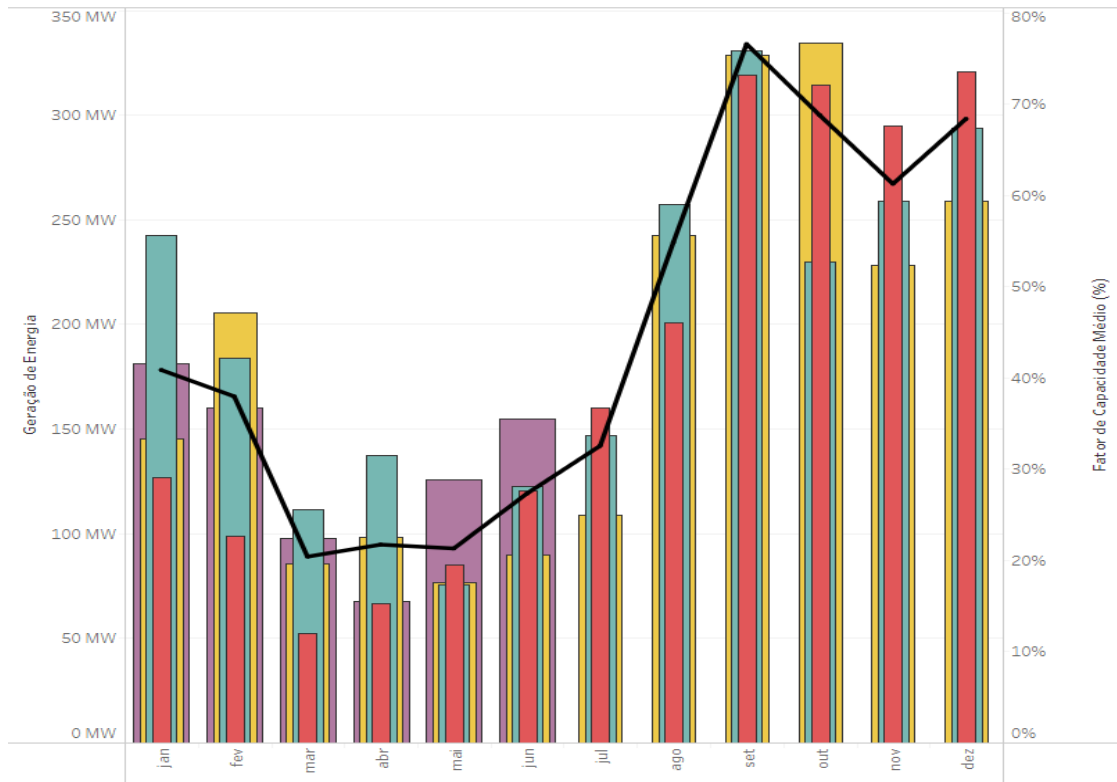
Fonte: ONS (2023).

Figura 30 - Geração e Fator de Capacidade Mensal – Ceará (MWmed).

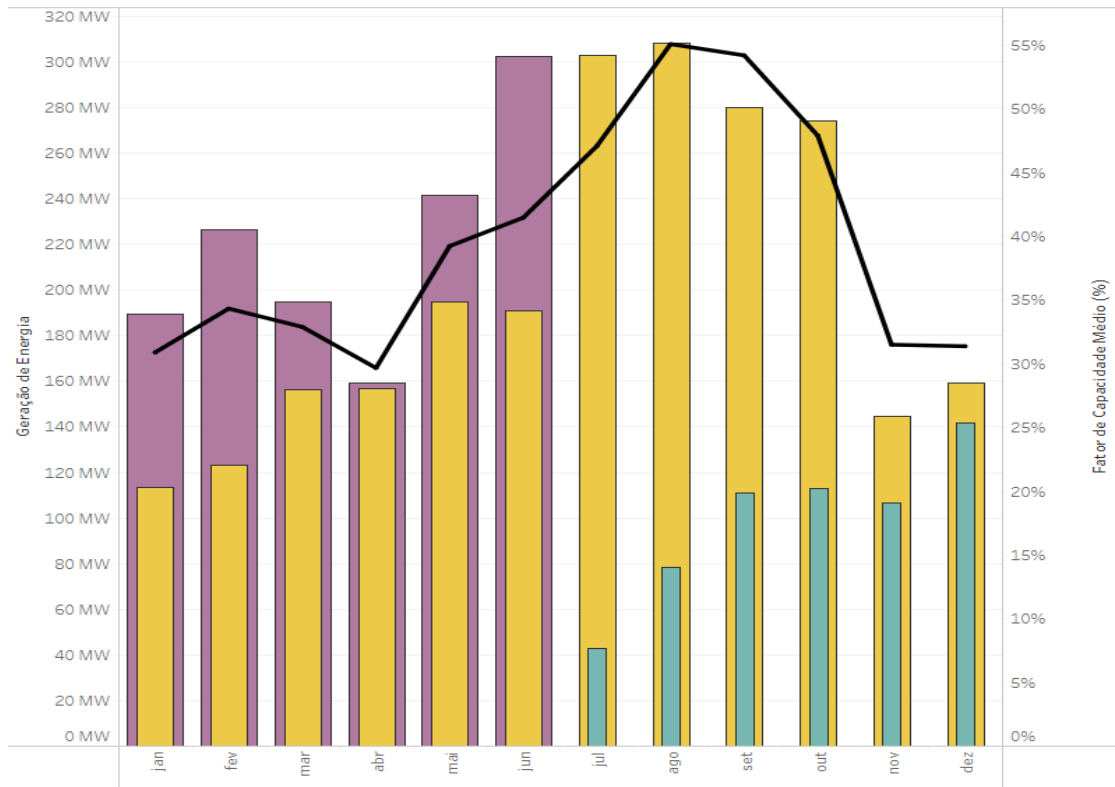


Fonte: ONS (2023).

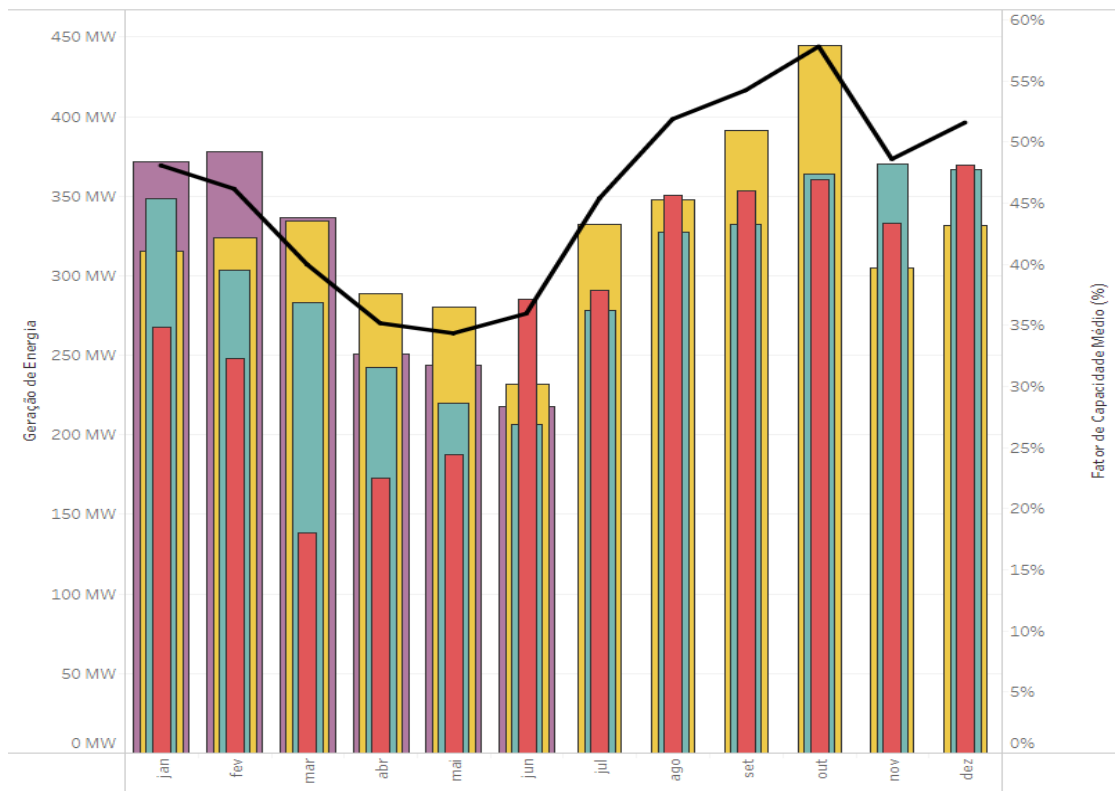
Figura 31 - Geração e Fator de Capacidade Mensal – Maranhão (MWmed).



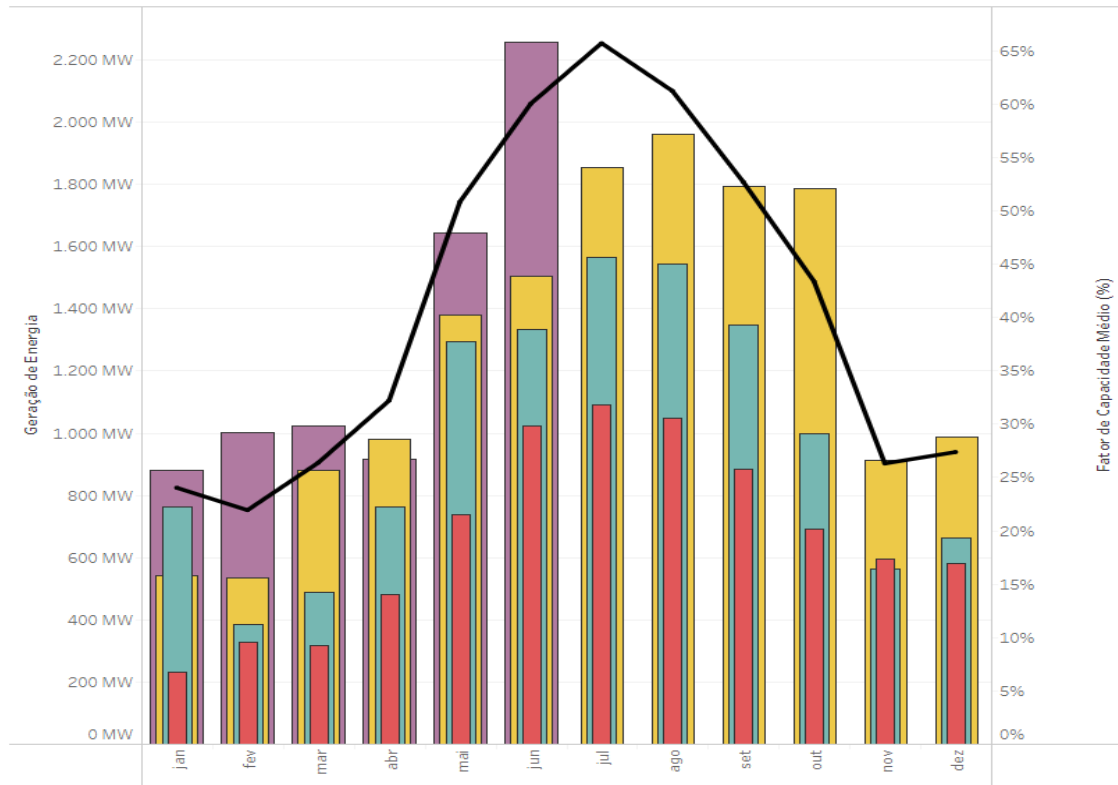
Fonte: ONS (2023).

Figura 32 - Geração e Fator de Capacidade Mensal – Paraíba (MWmed).

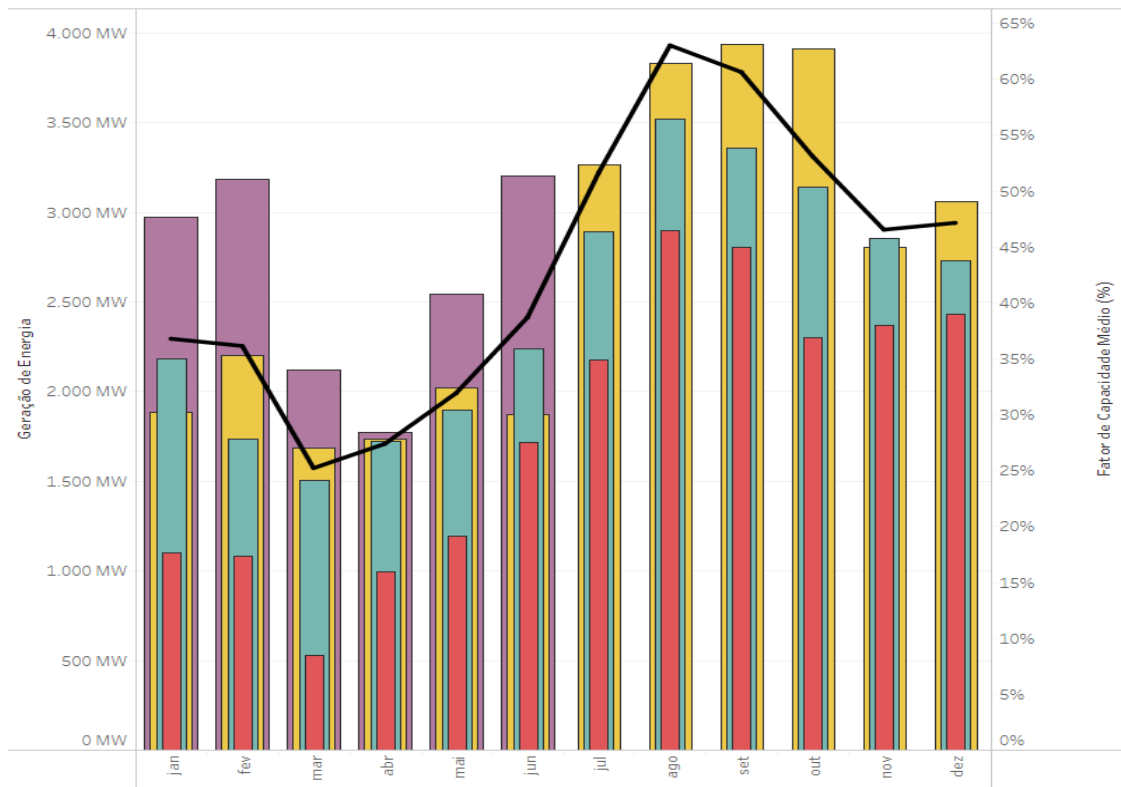
Fonte: ONS (2023).

Figura 33 - Geração e Fator de Capacidade Mensal – Pernambuco (MWmed).

Fonte: ONS (2023).

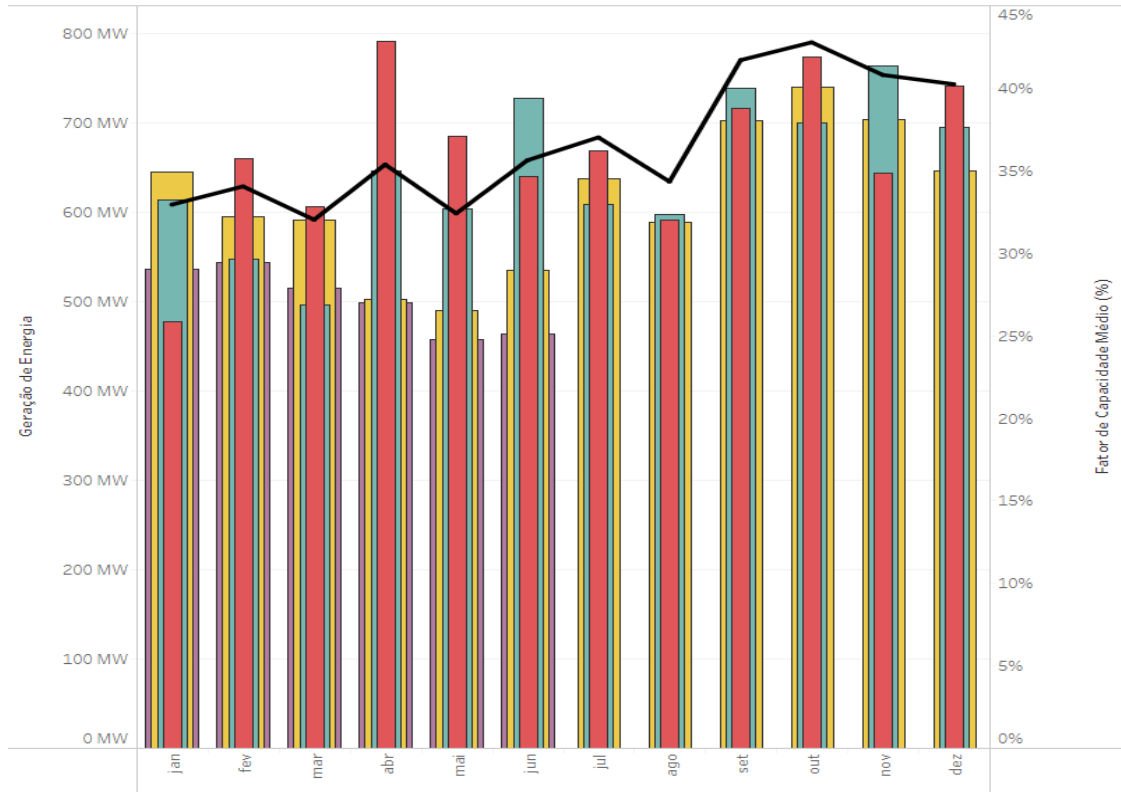
Figura 34 - Geração e Fator de Capacidade Mensal – Piauí (MWmed).

Fonte: ONS (2023).

Figura 35 - Geração e Fator de Capacidade Mensal – Rio Grande do Norte (MWmed).

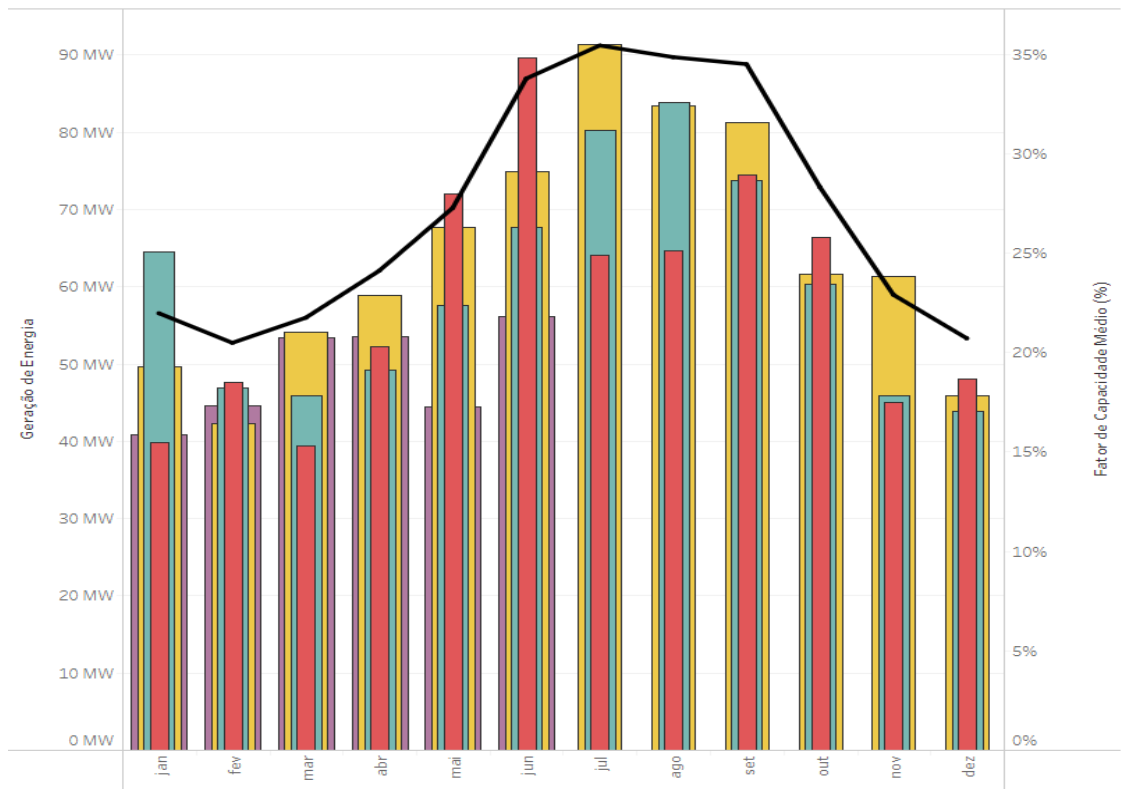
Fonte: ONS (2023).

Figura 36 - Geração e Fator de Capacidade Mensal – Rio Grande do Sul (MWmed).



Fonte: ONS (2023).

Figura 37 - Geração e Fator de Capacidade Mensal – Santa Catarina (MWmed).



Fonte: ONS (2023).

Analizando a Figura 28, que mostra as estatísticas do país todo, nota-se um fator de capacidade com uma média anual, considerando os valores a partir de 2020, de 41,75%, um valor considerado alto, quando comparado ao fator de capacidade mundial a partir de março existe uma progressão nesse valor, que tem o pico em agosto, 57%.

O fato do pico do fator de capacidade ser no mês de agosto, que é um mês com baixas incidências de chuva, realça a importância da geração eólica para complementar a geração predominante do país, que é a hidroelétrica.

Além disso, é evidente a evolução e expansão da geração eólica a cada ano, uma vez que praticamente todos os meses analisados tiveram uma crescente na geração de um ano para o outro.

Examinando o panorama de cada estado, pode-se destacar alguns devido a geração nos últimos anos, sendo eles Rio Grande do Norte, Bahia, Piauí e Ceará; esses estados são responsáveis por mais de 80% da geração eólica do país, isso se justifica ao observar a curva do fator de capacidade de cada estado, que mantém valores elevados durante o ano.

O estado do Rio Grande do Norte, lidera o *ranking* de geração de energia eólica, com aproximadamente 30% da geração. Segundo dados da ANEEL, o estado contém 379 empreendimentos eólicos, espalhados por 40 cidades do estado, sendo 240 em operação, 51 em construção e 88 na fase de projeto.

Os investidores confiam no estado para geração eólica, isso é comprovado ao analisar os investimentos na área de energias renováveis, que segundo CALADO, no ano de 2022 foram investidos cerca de R\$ 31 bilhões (AGÊNCIA UFC, 2022). Conforme a ABEEÓLICA, a tendência é o aumento desses dados com a chegada da eólica *offshore*.

Fora da região nordeste do país, é possível destacar o estado do Rio Grande do Sul, que possui grande capacidade de geração eólica e um fator de capacidade constante durante o ano, além disso o estado contém um grande potencial eólico *offshore*, o que pode transformar o cenário de geração, subindo o estado no *ranking* de geração eólica,

É de suma importância destacar os estados com menor geração de energia, pois, em nível nacional, eles têm menos impacto na produção total. No entanto, internamente, esses estados desempenham um papel fundamental na transição

energética e na complementaridade de outras fontes, como a energia hídrica.

5.1 Políticas de incentivo e regulamentações

Buscando alternativas para alavancar o desenvolvimento do setor eólico do país, o governo brasileiro propôs algumas políticas de incentivo e regulamentações específicas. A seguir estão contidas algumas políticas de incentivo.

- **Leilões de Energia:** Uma das principais políticas adotadas no Brasil é a realização de leilões de energia, onde projetos eólicos competem por contratos de longo prazo para fornecer energia ao mercado. Esses leilões têm impulsionado o crescimento do setor, atraindo investimentos e reduzindo os custos da energia eólica. Além disso, eles têm contribuído para diversificar a matriz energética do país e aumentar a participação das fontes renováveis.
- **Financiamento e Incentivos Fiscais:** O governo brasileiro oferece linhas de financiamento específicas e incentivos fiscais para estimular o investimento na energia eólica. Essas medidas visam reduzir os custos de capital e melhorar a viabilidade econômica dos projetos. Além disso, programas como o Programa de Sustentação do Investimento (PSI) têm fornecido condições favoráveis de financiamento para o setor.
- **Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA):** Como já citado anteriormente, o PROINFA foi implementado em 2002, foi um programa pioneiro no Brasil que tinha como objetivo incentivar a produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis, incluindo a energia eólica. Por meio desse programa, foram estabelecidos contratos de longo prazo para a compra da energia gerada por empreendimentos eólicos, garantindo estabilidade e segurança financeira para os investidores.

Além das políticas de incentivos, é muito importante as regulações estipuladas pelo país, pois a partir delas que se cria uma geração saudável e controlada, obtendo maior sucesso, alguns exemplos são:

- **Metas e Políticas de Energias Renováveis:** O Brasil estabeleceu metas

ambiciosas para a expansão das energias renováveis, incluindo a energia eólica. Através de políticas e regulamentações, o governo tem buscado criar um ambiente favorável para o desenvolvimento do setor e incentivar a participação das fontes renováveis na matriz energética nacional.

- **Licenciamento Ambiental:** Devido aos impactos ambientais associados à implantação de parques eólicos, os quais serão apresentados posteriormente, o licenciamento ambiental é uma etapa fundamental para a aprovação dos projetos. O Brasil possui regulamentações específicas que exigem a realização de estudos de impacto ambiental, planos de mitigação e monitoramento ambiental rigorosos, garantindo a preservação dos ecossistemas e a sustentabilidade dos empreendimentos.

O país busca evoluir no setor eólico, e conforme visto, o governo segue elaborando maneiras de aumentar o investimento no setor e alavancar o desenvolvimento sustentável.

5.2 Energia eólica *onshore* no Brasil

Os 12,5% de energia eólica presentes na matriz elétrica brasileira, totalmente representado por parques eólicos *onshore*, espalhados por 12 estados brasileiros (ABEEÓLICA, 2023), contudo, já existem projetos para transformar esse cenário, o que será mostrado mais adiante.

Para retratar a energia *Onshore* no Brasil, é possível observar o mapa da Figura 38, onde nele é contido os parques *onshore*, tanto construídos (em operação), em construção ou até em fase de planejamento. Além, é capaz de observar as linhas de transmissão existentes e em planejamento. Por fim, a cor do mapa representa o potencial eólico (Recursos Energéticos) do Brasil.

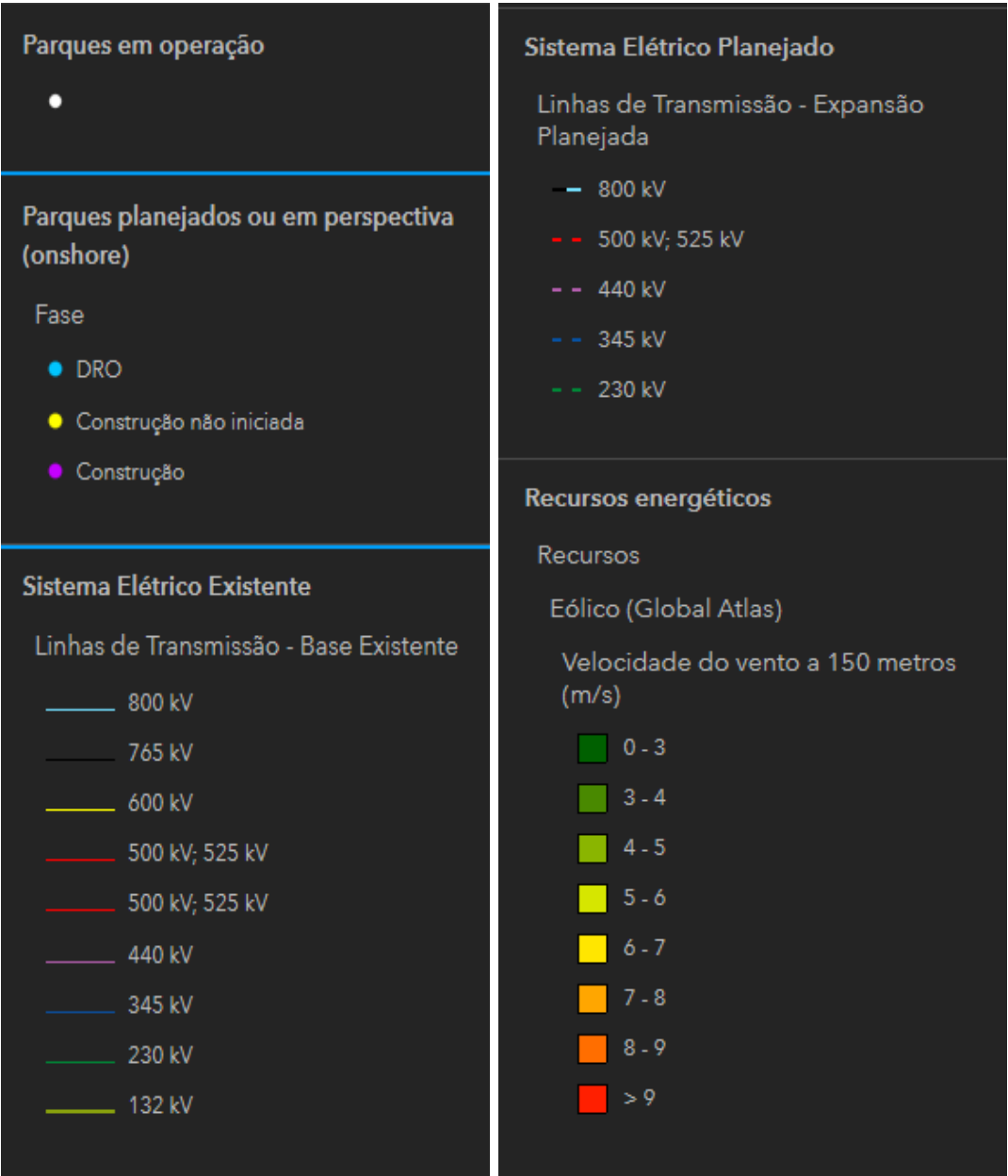
Figura 38 – Panorama eólico do Brasil.



Fonte: EPE (2023).

Na Figura 38 é possível ver as concentrações dos parques eólicos, sendo todos em estados com regiões costeiras, além disso, a distribuição dessa energia também se concentra nesses estados. Para um melhor entendimento, na Figura 39 contém a legenda de cada símbolo mostrado no mapa, o que retrata o número de parques ativos e projetos, e de acordo com a coloração do mapa, uma explicação visual dessa concentração em regiões costeiras. Na legenda contém os parques em fase de Deferimento de Registro de Outorga (DRO) e outros *status*. As linhas de transmissão estão apresentadas em kilovolt (kV)

Figura 39 – Legenda dos símbolos da Figura 38.



Fonte: EPE (2023).

5.2.1 Potencial eólico do Brasil

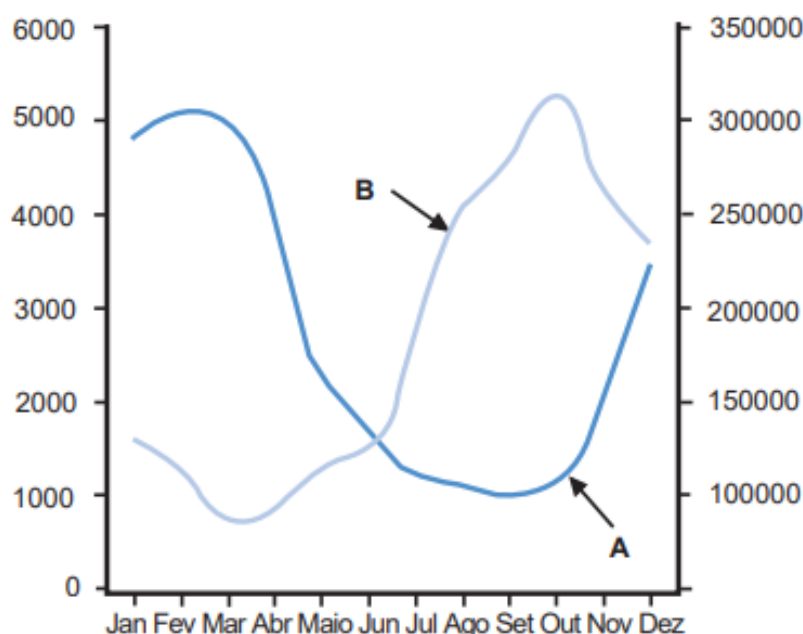
Conforme o Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL, 2001), por meio do Atlas Brasileiro, o Brasil possui um potencial estimado de 143,47 GW, o que permite uma geração anual de 272,220 TWh/ano, com ventos de velocidade média anual a partir de 7,0 m/s.

Quando esse valor é dividido por região, tem o maior potencial instalável na

região nordeste, com um total de 75 GW, equivalente a 144,3 TWh/ano; em segundo a região Sudeste, com aproximadamente 54,9 TWh/ano ou 24,7 GW de potência instalável. As regiões Sul, Norte e Centro-Oeste apresentam respectivamente 22,8 GW, 12,8 GW e 3,1 GW de potência instalável.

Agregando o vasto potencial eólico brasileiro, a sazonalidade dos ventos, traz um ponto de complementação à modalidade hidrelétrica. Por meio de uma análise feita pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), é possível observar um exemplo disso na prática, onde foi utilizado como base de comparação a capacidade eólica dos ventos da Costa do Ceará e a capacidade hidráulica da bacia do Rio São Francisco e foi visto a complementação das fontes de geração, conforme a Figura 40, em que: A é a fonte hídrica, com sua escala na direita, e B a fonte eólica, com sua escala na esquerda. No período de secas o vento complementa a baixa de geração hidráulica (CHESF, 2009).

Figura 40 - Complementaridade entre energia eólica e hídrica.

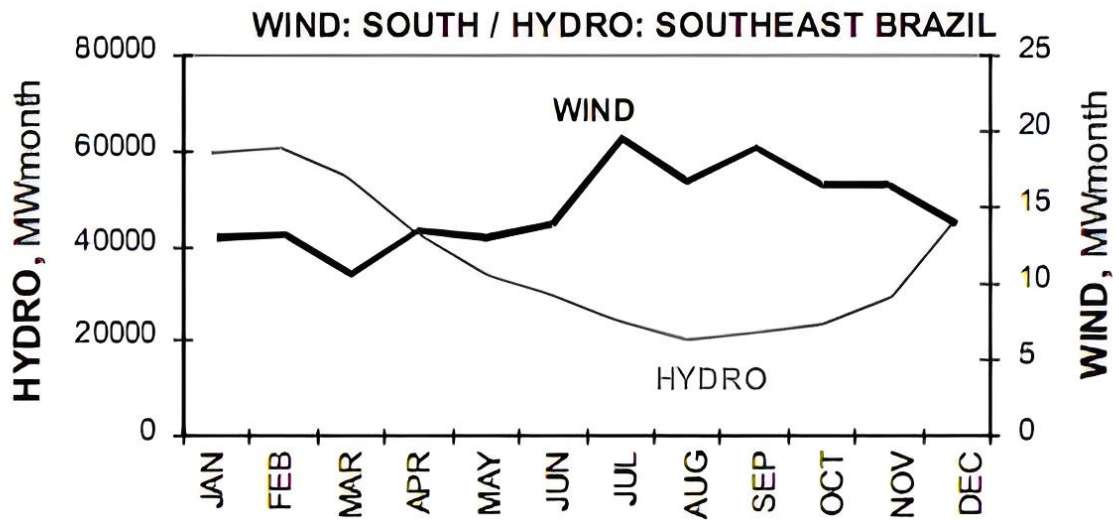


Fonte: CHESF (2009).

Esse fato não ocorre somente na região nordeste, em pesquisa realizada pelo Atlas de Potencial Eólico Brasileiro (2001), apresenta a mesma complementaridade, para as regiões Sul e Sudeste, onde nas temporadas de seca, normalmente nos meses de julho, agosto, setembro, o vento (*WIND*) da região Sul, complementa a redução hídrica (*HYDRO*) da região Sudeste na Figura 41, está o gráfico que

representa esse “balanço energético”.

Figura 41 - Complementaridade das fontes de energia nas regiões Sul e Sudeste.



Fonte: Amarante (2001).

5.2.2 Parques/usinas eólicas *onshore* no Brasil

Por meio da Figura 38 é possível observar a quantidade de parques eólicos no Brasil, dentre eles existem parques em operação, em construção, em planejamento e até em DRO. Pela quantidade de parques nota-se a expansão dessa fonte de energia. Assim, é importante ressaltar algumas Usinas Eólicas presentes no Brasil, em diferentes etapas.

5.2.2.1 Parque eólico Rio do Fogo

O Parque Eólico Rio do Fogo está localizado no estado do Rio Grande do Norte, na cidade de Rio do Fogo, onde os ventos são constantes e favoráveis para a geração de energia eólica. O parque conta com 62 aerogeradores, o que resulta em uma capacidade instalada de 49,3 MW (NEOENERGIA, 2023).

O parque pertence ao grupo Neoenergia e é o primeiro projeto de energia eólica a ser incentivado pelo PROINFA, já citado. Com isso, é considerado um dos primeiros complexos implementados do país (NEOENERGIA, 2023). O parque serve como um exemplo inspirador do potencial da energia eólica no Brasil e seu papel na construção de um futuro mais sustentável e resiliente. Uma visualização do parque se encontra na Figura 42.

Figura 42 - Parque eólico Rio do Fogo (RN).



Fonte: Duarte (2011).

Conforme visto, o parque eólico encaixa-se na categoria de parques em operação, já está instalado e gerando energia para as regiões em torno dele, tornando-se uma fonte de energia limpa e renovável.

5.2.2.2 Parque eólico Povo Novo

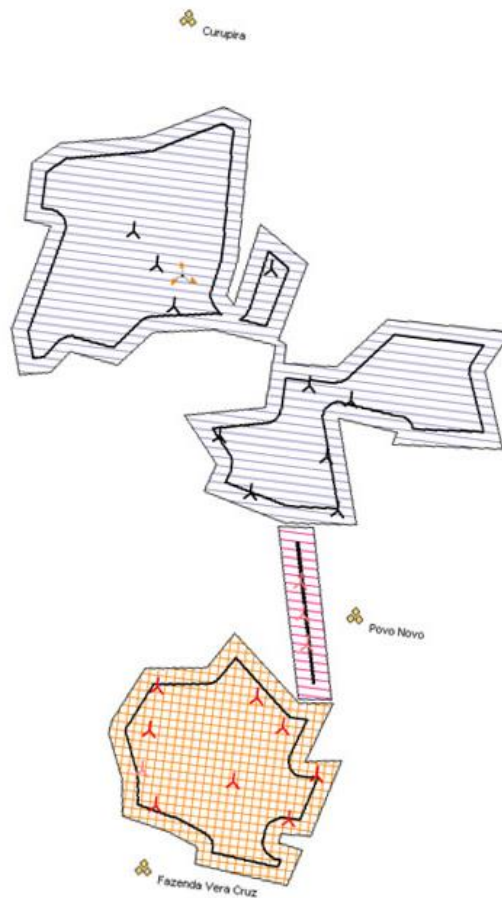
Em outro extremo do Brasil, o Parque Eólico Povo Novo, fica na região Sul do país, localizado no estado do Rio Grande do Sul, município de Rio Grande, o parque eólico, ou complexo eólico, conta com três Centrais Geradoras Eólicas, sendo:

- CGE Fazenda Vera Cruz com capacidade de 22,5 MW;
- CGE Curupira Vera Cruz com capacidade de 25 MW;
- CGE Povo Novo Vera Cruz com capacidade de 7,5 MW.

Totalizando uma capacidade instalada de geração de 55 MW, as quais são distribuídas em 25 aerogeradores da marca WEG, com 2,1 MW, e 120 metros de altura. Além disso, a instalação conta com uma rede interna subterrânea de 34,5 kV, linha de transmissão de 230 kV com 11 quilômetros de comprimento (EPCOR, 2014).

Na Figura 43 está representado o formato das centrais geradoras que compõem o Complexo Eólico de Povo Novo.

Figura 43 - Formato da composição do parque eólico Povo Novo (RS).



Fonte: EPCOR (2014).

O complexo tinha planejamento de já estar em atuação no cenário de geração eólica do país, porém devido a uma paralisação do projeto, o parque atrasou nos prazos previsto para início da geração, e recentemente a responsável do projeto, a Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE), buscou investidores para dar finalização o projeto e colocá-lo em operação. (GZH, 2023).

5.2.2.3 Parque eólico Lagoa dos Barros

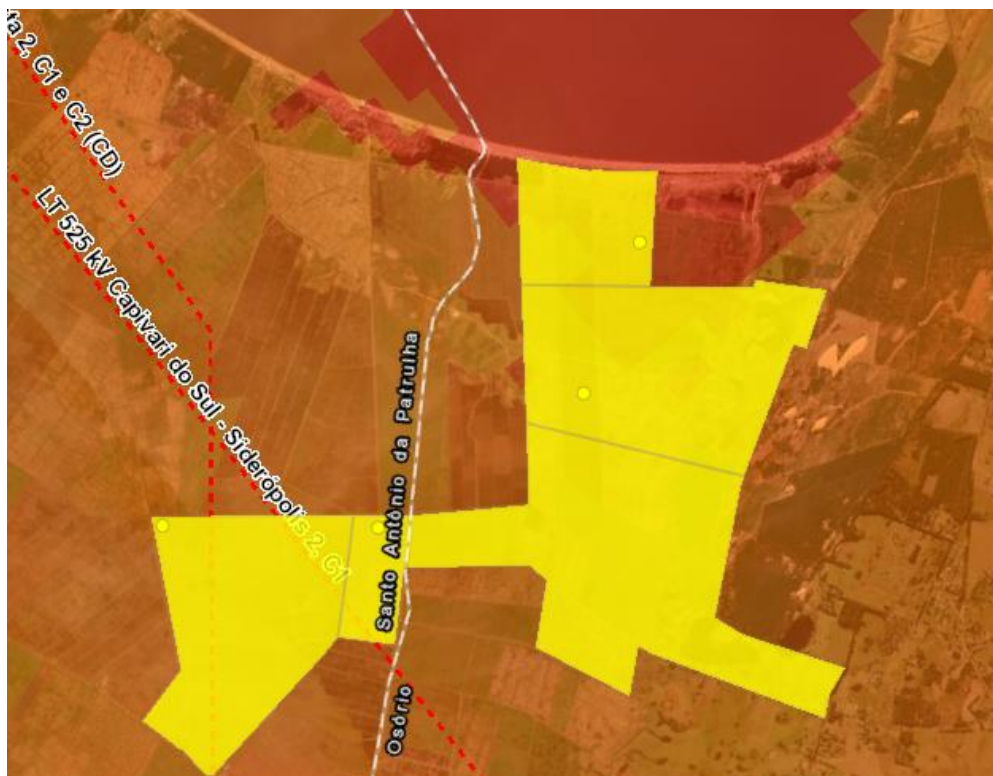
Um exemplo de projeto em planejamento é o do Complexo Eólico Lagoa dos Barros, localizado no estado do Rio Grande do Sul, cidade de Osório. No ano de 2022, a ANEEL, autorizou a implantação do complexo que contará com os parques eólicos Lagoa dos Barros: I, II e III.

No total, os parques eólicos contam com uma potência total de 94,52 MW, com

um investimento inicial de 600 milhões de reais. (JORNAL DO COMÉRCIO, 2022).

Na Figura 44 é possível ver a localização do projeto do complexo eólico.

Figura 44 - Área abrangida pelo projeto do complexo eólico Lagoa dos Barros (RS).



Fonte: EPE (2023).

5.2.3 Futuro da energia eólica *onshore* no Brasil

Em relação às projeções para o futuro da energia elétrica no país, em abril de 2022, o governo federal, através do Ministérios de Minas e Energia, publicou o Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2031. Por meio do documento, foram apresentadas as perspectivas de desenvolvimento do setor de energia brasileira para os próximos dez anos (GOVBR, 2022).

O PDE estabelece investimentos de aproximadamente R\$ 3,2 trilhões até 2031 no setor de energia no Brasil. O objetivo do governo é alcançar uma capacidade instalada de geração de energia elétrica de 275 GW, com ênfase nas fontes eólica e solar na matriz energética. Estima-se que a participação de fontes renováveis atinja 83% da capacidade instalada de geração elétrica no país.

Além disso, o PDE inclui um novo capítulo dedicado ao hidrogênio, reconhecido mundialmente como uma fonte de energia renovável, limpa e ilimitada. O objetivo do

governo é aproveitar os recursos naturais abundantes do Brasil para promover o bem-estar e a prosperidade da sociedade brasileira por meio do desenvolvimento do setor energético.

5.3 Energia eólica *offshore* no Brasil

A energia eólica *offshore* no Brasil, ainda está no papel, pelo fato da inexistência de marcos legais na regulamentação desse negócio no país, e a demora na definição de regras acaba ocasionando em um atraso na implementação de projetos de geração de energia eólica *offshore*.

5.3.1 Potencial eólico *offshore* no Brasil

Através de uma pesquisa realizada pelo Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais (INPE) foi mostrado que o potencial de geração eólica da costa brasileira é mais de 10 vezes maior do que o potencial em terra. Em números, o estudo relata que a capacidade de instalação *offshore* do país é em torno de 3.500 GW de potência, utilizando toda a Zona Econômica Exclusiva (ZEE) do Brasil.

Algumas regiões costeiras se destacaram pelas altas magnitudes no levantamento realizado, sendo elas, as regiões dos estados de Alagoas e Sergipe, Rio Grande do Norte e Ceará, Rio Grande do Sul e Santa Catarina essa magnitude quando realizada a média brasileira gira em torno de 7 m/s a 12 m/s. Além do alto fator de capacidade, girando em torno de 65% para áreas de melhor aproveitamento (FERREIRA, 2019).

Por meio da Figura 45, é possível analisar a região costeira do Brasil, e suas aplicabilidades de parques eólicos *offshore*, levando em conta os fatores já citados, como custos, com instalação, construção, conexão com a rede e a parte regulamentária.

Figura 45 - Viabilidade da Instalação eólica *offshore* na Costa Brasileira.



Fonte: EPE (2023).

Ao observar estudos feitos, sobre a potência de instalação, levando em conta a distância da costa e profundidade, observa-se que quanto mais distantes e mais profundos os potenciais são maiores, chegando a 1.780 GW nas (ZEEs) e 606 GW nas zonas profundas (100 metros) (ORTIZ, 2011), junto a isso os custos e dificuldades aumentam na mesma proporção.

Separando as regiões costeiras e faixas de velocidade, estimou-se a energia gerada, e com isso o fator de capacidade (EPE, 2020). Os dados serão apresentados por meio da Tabela 2, sendo importante ressaltar que as projeções foram realizadas considerando um sistema ideal, ou seja, sem perdas.

Tabela 2 – Faixa de fator de capacidade conforme a velocidade e região.

Faixa de Velocidade (m/s)	Fator de Capacidade			
	Norte	Nordeste	Sudeste	Sul
6,0 - 6,5	22%	23%	22%	23%
6,5 - 7,0	25%	30%	32%	31%
7,0 - 7,5	32%	37%	38%	37%
7,5 - 8,0	36%	42%	43%	43%
8,0 - 8,5	40%	46%	47%	46%
8,5 - 9,0	47%	54%	49%	49%
9,0 - 9,5	53%	62%	53%	53%
9,5 - 10,0	56%	65%	56%	56%
≥ 10,0	59%	68%	59%	59%

Fonte: EPE (2020).

Na Tabela 2 é possível observar que a Região Nordeste se destaca em meio às outras, e conforme a velocidade dos ventos aumenta, o fator de capacidade aumenta junto a ele.

Além do fator de capacidade, o EPE realizou um levantamento levando em conta os fatores apresentados, áreas aproveitáveis, potencial eólico, em gigaWatt e TeraWatt-hora, mais uma vez considerando um cenário ideal. Esse levantamento pode ser visto no Quadro 2.

Quadro 2 – Potencial eólico *offshore* acumulado do Brasil.

Velocidade /Batimetria	Áreas aproveitáveis (km²)				Potencial (GW)				Potencial (TWh)			
	0-20	20-50	50-100	>100	0-20	20-50	50-100	>100	0-20	20-50	50-100	>100
≥6,0	175.754	186.188	171.923	2.784.706	628	641	531	9.100	1.789	2.048	1.576	30.140
≥6,5	147.234	171.441	147.519	2.602.599	522	591	467	8.420	1.582	1.949	1.450	28.793
≥7,0	79.869	123.078	79.907	1.765.981	276	421	237	5.833	1.008	1.528	902	21.872
≥7,5	38.637	64.276	57.360	1.237.126	129	209	159	4.014	566	890	667	16.101
≥8,0	29.017	46.109	50.429	674.730	100	147	137	2.056	456	664	587	8.934
≥8,5	16.835	22.227	31.507	333.324	63	81	87	993	308	398	383	4.612
≥9,0	3.996	7.337	1.852	143.039	15	28	7	399	82	149	38	1.929
≥9,5	729	560	154	2.971	3	2	1	11	16	12	3	63
≥10,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: EPE (2020).

Na Tabela 3 é possível notar a faixa destacada na cor laranja, que representa as regiões mais atrativas, que são representadas pelas velocidades acima de 7 m/s.

5.3.2 Parques/usinas eólicos *offshore* no Brasil

Como citado, não existem parques eólicos *offshore* ativos no Brasil nos dias atuais, entretanto, muitos projetos já estão em fase de planejamento avançado, apenas aguardando os marcos legais e incentivos fiscais, regulações fiscais e licenciamentos ambientais, para os projetos iniciarem suas operações.

Conforme ALENCAR (2023) uma estimativa de mais de 70 pedidos de licenciamento ambiental para usinas eólicas *offshore*, vindo de mais de 20 empresa, como: A anglo-Holandesa Shell, a francesa total *energy*, a japonesa *Shizen*, a portuguesa EDP, a norueguesa *Equinor*, a espanhola *Neoenergia* e Cemig, concessionária de energia elétrica de Minas Gerais

Se somadas todas as propostas de capacidade instaladas apresentadas, a capacidade de geração resultaria em torno de 176 GW, valor que equivale a praticamente todo parque elétrico brasileiro na atualidade.

O avanço desses negócios vai depender de leilões das áreas a serem exploradas, uma vez que tais áreas pertencem à União. Além disso, os empreendedores ainda terão de passar pela obtenção de licenciamentos ambientais e fiscais. O licenciamento ambiental é de responsabilidade do Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA).

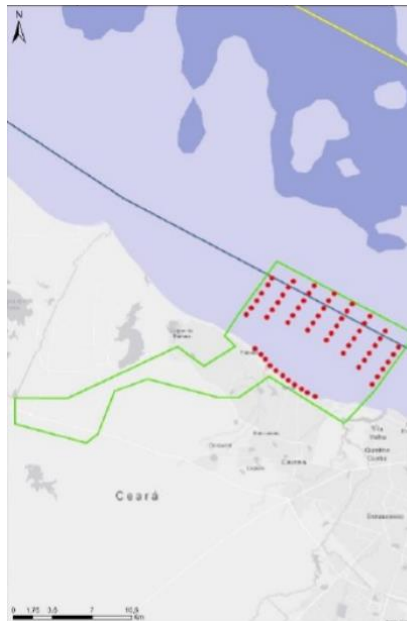
Dentre os projetos já protocolados alguns se destacam e parecem ter maior avanço e maturidade, alguns deles são mostrados a seguir.

5.3.2.1 Parque eólico *Ventos do Sul*

O maior projeto de Parque Eólico *Offshore* que existe no Brasil atualmente, segundo o IBAMA, é o Projeto Ventos do Sul, com proposta de instalação na costa do Rio Grande do Sul, com capacidade ideal de 6.507 MW, distribuída em 482 unidades geradoras ativas. O projeto pertence a uma *Joint Venture* entre a ENGIE e EPBR (ENGIE,2022).

Por meio da Figura 46, nota-se a localização do parque eólico *offshore* em comparação com a costa e também a quantidade de aerogeradores, além do modelo proposto para ligação do parque à rede elétrica.

Figura 47 – Esboço do projeto eólico Caucaia (CE).

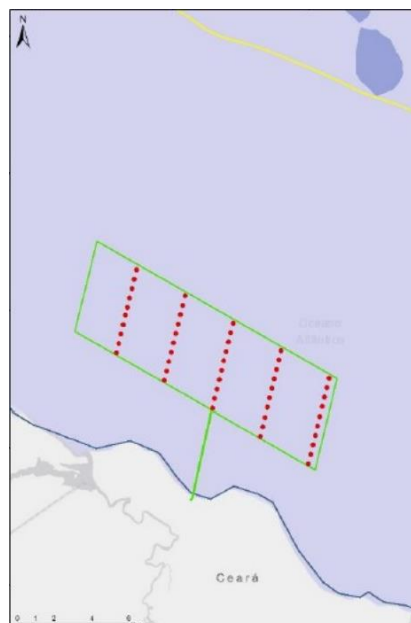


Fonte: EPE (2019).

O projeto eólico Asa Branca I é uma usina eólica localizada no município de Amontada, no estado do Ceará, Brasil. É um empreendimento desenvolvido pela empresa *Echoenergia*, que tem como objetivo aproveitar o potencial dos ventos da região para a geração de energia renovável. A capacidade do parque está avaliada em 400 MW.

Na figura 48 o esboço do projeto.

Figura 48 – Esboço do projeto eólico Asa Branca I (CE).



Fonte: EPE (2019).

Nos últimos anos a ANEEL, travou um entrave com os empresários responsáveis pelos projetos citados, uma vez que, conforme Souza (2022) no ano de 2022, a ANEEL deu como extintos os projetos de produção de energia eólica *offshore*, alegando que os dois empreendimentos não cumprem as exigências da legislação, devido aos riscos ambientais para fauna e flora da região.

5.3.3 Futuro da energia eólica *offshore* no Brasil

Especialistas preveem o início de operação desses Parque Eólicos entre 2025, para os mais otimistas, que é o caso do presidente da Associação Brasileira de Eólicas Marítimas (ABEMAR) Marcelo Storrer, que pontuou que, caso haja incentivos a essa fonte de geração, deverá iniciá-la em 2025, e 2027 para os mais contidos, que é o caso da presidente da Associação Brasileira da Energia Eólica (ABEEólica), Elbia Silva Gannoum (ENGIE,2022).

Ao avaliar o universo da energia eólica *offshore*, destaca-se a Dinamarca como um exemplo a ser seguido, um país pioneiro no setor, é detentora do maior parque de geração *offshore* do mundo.

Conforme MONTEIRO (2023) “O sucesso da geração da energia eólica *offshore* no país nórdico, se deveu, entre outros fatores, à pré-existência de uma indústria eólica *onshore*”.

Caso esse fator citado seja um grande diferencial para evolução do setor, o Brasil já possui uma indústria *onshore* estabelecida, com profissionais altamente qualificados e treinados, além de instalações para fabricação de componentes e turbinas eólicas terrestres. Esses recursos humanos e físicos são valiosos e podem ser aproveitados para impulsionar o desenvolvimento tecnológico nacional no setor eólico *offshore*.

6. IMPACTOS AMBIENTAIS, SOCIAIS E ECONÔMICOS NO BRASIL

Como já apresentado, a geração de energia eólica vem desempenhando um papel significativo na matriz energética/elétrica brasileira, oferecendo benefícios socioeconômicos e ambientais. Apesar disso, é importante levar em conta, os impactos positivos e negativos dessa forma de energia para garantir um desenvolvimento sustentável.

A energia eólica, por ser uma fonte renovável para geração, sua produção de energia é tratada muitas vezes como limpa e 100% sustentável. Buscando desmistificar isso, o Laboratório de Geoprocessamento e Cartografia Social (LABOCART), trouxe em pauta a discussão de que a geração eólica, sem cumprir certos requisitos, podem causar impactos, muitas vezes parcialmente ocultos, nos âmbitos socioeconômicos e ambientais.

6.1 Impactos ambientais

Conforme OLIVEIRA (2020): “A energia eólica é limpa e renovável, não produz resíduos atmosféricos ou nos corpos d’água em seu processo de geração e pouco afeta a direção e a velocidade dos ventos, pois as próprias hélices se adaptam e se orientam em direção a posição favorável para giro”. Conforme a evolução das tecnologias dos parques eólicos, a tendência é que essa produção seja cada vez mais sustentável.

A geração de energia eólica implica em impactos ambientais positivos e negativos para o cenário brasileiro.

6.1.1 Impactos ambientais positivos

A energia eólica traz benefícios para o meio ambiente, a principal e que mais incentiva a expansão e desenvolvimentos de parques eólicos, é a redução na emissão de GEE, nas gerações do setor elétrico, principalmente durante seu funcionamento, que pode ser considerado zero.

Para um fator comparativo, é possível analisar a Tabela 3, que apresenta a emissão de CO₂, em diferentes estágios dos parques eólicos, como na extração do

combustível, que no caso o vento é um recurso abundante disponível na atmosfera.

Tabela 3 – Emissão de dióxido de carbono nos processos de geração de energia de diferentes fontes.

Tecnologias	Emissão de CO ₂ nos estágios de produção de energia (ton/GWh)			
	Extração do Combustível	Construção	Operação	Total
Carvão	1	1	962	964
Óleo	-	-	726	726
Gás natural	-	-	484	484
Geotérmica	<1	1	56	57
PCH	N/A	10	-	10
Nuclear	~2	1	5	8
Eólica	N/A	7	-	7
Fotovoltaica	N/A	5	-	5
Hidroelétricas	N/A	4	-	4
Solar	N/A	3	-	3
Biomassa	-1.509	3	1.346	-160

Fonte: Camargo (2005).

Na Tabela 3 pode ser visto que a partir do processo de operação o valor de emissão de (CO₂) é nulo, tornando uma geração de energia limpa, principalmente quando comparada com fontes como Carvão, Óleos e Gás Natural.

Além disso, a fonte eólica ajuda na produção de Hidrogênio Verde, que é o hidrogênio produzido com eletricidade proveniente de fontes de energia limpas e renováveis, como as de matriz hidrelétrica, eólica, solar e provenientes de biomassa e biogás, ou seja, não ocorre emissão de CO₂ no ciclo da energia elétrica utilizada (PORTAL HIDROGÊNIO VERDE, 2021).

Essa produção, pode também ajudar a desenvolver os métodos de armazenamento de energia, uma vez que segundo PAIVA (2022) uma alternativa viável para o armazenamento é o por meio da produção de hidrogênio, pois este é capaz de reter grandes quantidades de energia por longos períodos.

Mais um ponto positivo da geração eólica, pode ser retirado por uma análise da Tabela 3, que mostra a preservação dos recursos naturais, pois essa fonte evita a exploração de recursos naturais não renováveis, como o petróleo, carvão ou gás natural. Isso resulta em uma menor degradação do meio ambiente e na preservação dos recursos para as futuras gerações.

6.1.2 Impactos ambientais negativos

Como toda instalação que é inserida na natureza, as implantações de parques eólicos geram alguns impactos negativos no cenário ambiental brasileiro, em questão de emissão de gases ou resíduos esses impactos apenas são considerados nas fases de construção e no descarte de equipamentos fora da vida útil, como a emissão de gases de efeito estufa na fabricação dos componentes e descartes de materiais não reutilizáveis de forma inadequada.

Porém, a operação dos parques, podem afetar, mesmo que de maneira reduzida, a fauna e flora do ambiente. Como por exemplo, o impacto nas aves da região, um caso trazido por PINTO (2013): “no final dos anos 1980, nos Estados Unidos, foram encontrados pássaros, em especial os protegidos por leis federais, como as águias douradas e alguns falcões, que estavam sendo mortos por turbinas eólicas e pelas linhas de transmissão dos parques eólicos de Altamonte Pass, na Califórnia”.

Os principais efeitos causados pela energia eólica na questão das aves são: as populações de pássaros das mortes provocadas por turbinas eólicas; e, a violação de trajetórias de migração de pássaros.

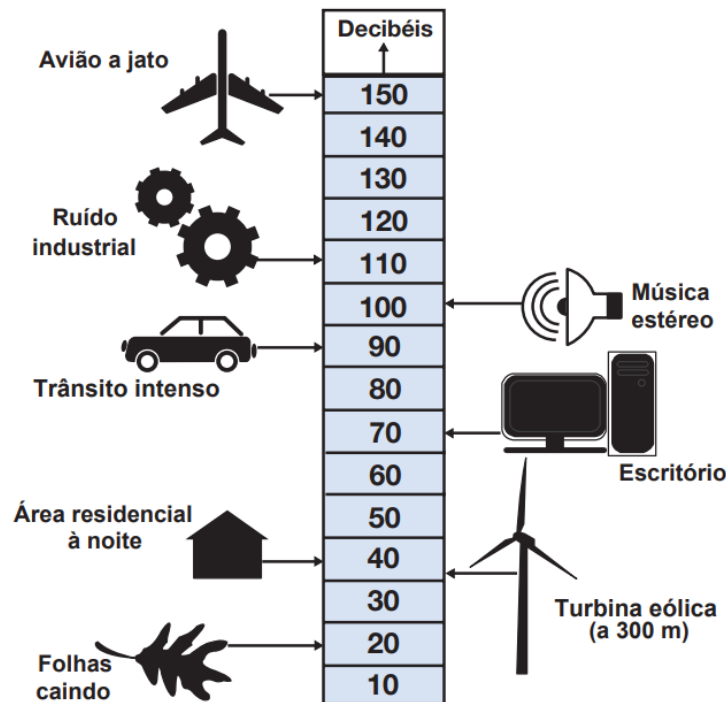
Além da questão das aves, outro grupo de animais também podem ser prejudicados, no caso os morcegos, que ao colidirem com os aerogeradores acabam vindo a óbito, além disso isso pode causar um descontrole de pragas, como insetos, pela falta de predadores. Um levantamento realizado pela *Renewable Energy Wildlife Institute*, em 248 instalações da empresa, trouxe um total de 10.231 morcegos mortos entre os anos de 2009 e 2021.

No caso das possíveis instalações de parques eólicos *offshore*, esse impacto estaria sendo sobre a fauna e flora marinha, uma vez que podem ser afetados locais de migrações de peixes, e alguns resquícios podem ser derrubados no mar em possíveis manutenções, como óleo, graxas, ou até metais, poluindo o ambiente marinho.

Outros impactos trazidos são o visual e o sonoro. O impacto visual se dá pela alteração do ambiente, composto pelos grandes aerogeradores, e também podendo gerar uma grande região de sombra. Já o impacto sonoro pode causar irritações em populações próximas aos parques eólicos, devido aos ruídos provocados pelos

aerogeradores, mesmo sendo um ruído teoricamente baixo comparado a outros equipamentos, como pode ser visto na Figura 49, onde mostra uma turbina localizada a 300 metros.

Figura 49 – Quantidade de ruído sonoro produzido em dB.



Fonte: Pinto (2013).

6.2 Impactos sociais

Do mesmo modo que os impactos ambientais, no âmbito social também são gerados impactos positivos e negativos.

6.2.1 Impactos sociais positivos

Através da ABEEÓLICA (2023), a energia eólica gera cerca de 11 postos de trabalho por cada MW instalado e a partir dessa instalação, pode-se destacar a:

- **Geração de empregos e desenvolvimento local:** A indústria eólica tem um grande potencial de geração de empregos, beneficiando as regiões onde os parques eólicos são instalados. A construção, operação e manutenção desses

parques demandam mão de obra local, gerando empregos diretos e indiretos. Além disso, a presença desses empreendimentos impulsiona o desenvolvimento econômico regional, com o surgimento de novos negócios, serviços e oportunidades de capacitação profissional. Esses aspectos são fundamentais para reduzir as desigualdades socioeconômicas e promover o desenvolvimento sustentável nas comunidades.

- **Melhoria da infraestrutura e qualidade de vida:** A implantação de parques eólicos frequentemente requer a melhoria da infraestrutura nas regiões onde são instalados. Isso pode incluir a construção ou aprimoramento de estradas, redes elétricas e sistemas de comunicação, o que beneficia não apenas o setor eólico, mas também as comunidades locais. Além disso, os recursos financeiros provenientes dos parques eólicos podem ser direcionados para a melhoria de serviços públicos, como saúde, educação e saneamento básico, contribuindo para a qualidade de vida da população local.

6.2.2 Impactos sociais negativos

Apesar dos benefícios sociais trazidos pela energia eólica, também é importante reconhecer que existem impactos sociais negativos que devem ser considerados e mitigados.

A instalação dos parques eólicos é feita em locais mais inutilizados e afastados das sociedades, porém existem casos que isso não ocorre, o que pode causar o deslocamento de atividades praticadas por comunidades locais, podendo gerar conflitos territoriais e impactando negativamente a coesão social das comunidades afetadas.

Em compensação a esse deslocamento forçado, as empresas pagam pelas terras arrendadas para uso. Porém em pesquisa realizada pela Universidade Federal do Ceará (UFC), LOUREIRO (2019), trouxe que enquanto o pagamento por aerogerador no Texas (EUA), seja de aproximadamente R\$ 32.696,00 por ano, no Brasil esse valor gira em torno de R\$ 8.000,00 a R\$13.000,00 por ano.

No caso da eólica *offshore*, esse impacto pode ser trazido nas atividades econômicas advindas do mar, como a pesca, e turismo, que como citado por BRANNSTORM (2019), os parques podem causar: cerceamento da área de pesca;

alteração na rota pesqueira; perturbação nos ventos; perdas no atrativo turístico; violação na liberdade dos pescadores e dificuldade na pesca em jangadas, paquetes e canoas a vento.

6.3 Impactos econômicos

A geração de energia eólica no Brasil tem impulsionado o desenvolvimento econômico do setor energético, criando oportunidades de negócios, gerando empregos e contribuindo para a diversificação da matriz energética. Como apresentados nos impactos ambientais e sociais, os econômicos também podem ser de natureza positiva ou negativa.

6.3.1 Impactos econômicos positivos

Alguns impactos econômicos da geração de energia eólica no Brasil podem ser representados a seguir:

- **Investimentos e cadeia produtiva:** A implantação de parques eólicos demanda investimentos significativos em infraestrutura, equipamentos e tecnologia. Esses investimentos impulsionam a cadeia produtiva da energia eólica, beneficiando indústrias como a fabricação de turbinas, equipamentos eletrônicos, transporte e construção civil. Isso estimula o desenvolvimento de empresas locais e a geração de empregos ao longo da cadeia de valor.
- **Geração de empregos e Impulso à Economia Local:** Como citado anteriormente os parques eólicos geram diversas oportunidades de emprego, o que consequentemente aumenta o poder de compra da população daquele local, o que permite a desenvolver os negócios da região.
- **Redução dos Custos de energia:** A expansão da geração de energia eólica contribui para a diversificação da matriz energética, reduzindo a dependência de fontes de energia convencionais e importadas. Isso pode resultar em uma redução dos custos de energia para os consumidores, uma vez que a energia eólica tem custos operacionais mais baixos e não está sujeita às flutuações dos preços dos combustíveis fósseis.

De acordo com uma previsão feita pela Agência Internacional de Energias

Renováveis (IRENA), em 2025 os custos médios da eletricidade eólica e solar podem reduzir a até 59%.

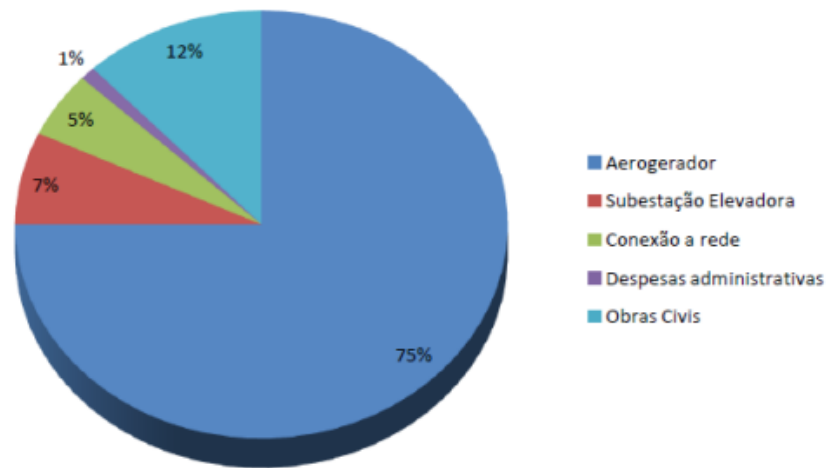
6.3.2 Impactos econômicos negativos

O principal impacto negativo econômico, pode ser considerado os custos de produção de um parque eólico, seja ele *onshore* ou *offshore*. Esses custos podem ser classificados em: custos de capital inicial, que segundo VIEIRA (2009), referem-se: a todas atividades de planejamento e desenvolvimento do projeto; compras de equipamentos e materiais; comissionamento; e, custos de prédios, estoque inicial, sistemas de controle e aquisição de ferramentas. Ou custos anuais, VIEIRA (2009), classifica como: pagamento de arrendamento de terra; seguro; impostos; taxas de gerenciamento; custos operacionais e administrativos; taxas de transmissão e interconexão; e, custos de manutenções.

Devido a esses custos altos, os parques eólicos brasileiros, muitas vezes, dependem de investimentos estrangeiros. Embora isso traga capital para o país, também pode resultar em uma maior dependência externa e transferência de recursos para empresas estrangeiras. Além disso, em momentos de instabilidade econômica global, a atração de investimentos pode se tornar mais desafiadora, afetando o crescimento e desenvolvimento do setor.

O custo inicial do projeto de uma usina eólica são os maiores, conforme pode ser visto na Figura 50.

Figura 50 – Percentagem dos custos da implantação de um parque eólico.



Fonte: Soares (2016).

Dessa forma, observa-se a grande fatia de gastos com investimentos iniciais, ou seja, na fase de construção do parque, compra das peças, mão de obra qualificada, transporte, o que encarecem os custos de entrada da implantação da usina eólica..

7. CONCLUSÃO

O trabalho apresenta uma série de benefícios e desafios a serem considerados. No Brasil, onde as fontes renováveis têm um papel fundamental no desenvolvimento sustentável, a energia eólica tem mostrado um crescimento significativo e um grande potencial para contribuir com o balanço energético e a redução de gases de efeito estufa (GEE).

A utilização do vento como fonte de energia contribui para reduzir a utilização de combustíveis fósseis, e mitigar os impactos ambientais associados à geração convencional de energia. Além disso, a energia eólica oferece benefícios econômicos, como a criação de empregos locais, o estímulo à cadeia produtiva e o aumento da competitividade do setor energético.

Apesar de tais avanços e pontos positivos, a expansão da energia eólica também traz desafios que precisam ser tratados. Um deles é a necessidade de infraestrutura adequada para a transmissão da energia gerada. A ampliação da interligação da rede elétrica e o fortalecimento das linhas de transmissão são essenciais para garantir a integração eficiente da energia eólica na matriz elétrica nacional.

Além disso, é essencial o planejamento adequado do uso do território. A escolha de locais com alto potencial eólico, a realização de estudos de impacto ambiental e a consideração dos aspectos socioeconômicos são fundamentais para minimizar conflitos e maximizar os benefícios da energia eólica.

O estudo mostra a importância do desenvolvimento em pesquisa e tecnologia contínuo. A evolução das turbinas eólicas e o investimento em sistemas de armazenamento de energia são essenciais para otimizar a eficiência da geração eólica e garantir a estabilidade do sistema elétrico.

Com isso, é possível notar que, embora apresente benefícios significativos, é necessário enfrentar os desafios relacionados à infraestrutura, planejamento territorial, desenvolvimento tecnológico e participação social. O investimento contínuo em pesquisa, políticas públicas e parcerias entre os setores público e privado são cruciais para impulsionar o crescimento sustentável da energia eólica e garantir um futuro energético mais limpo e sustentável para o Brasil.

Sobre o futuro da energia eólica no Brasil, de certa forma parece promissor, pelo fato do potencial já comentado, as regulações ambientais, e a necessidade da diversificação da matriz energética. A geração *onshore* já consolidada tende a continuar evoluindo e expandindo, conforme o desenvolvimento já apresentado dos últimos anos. Já a geração *offshore* fica à deriva, devido as regulações propostas pelo governo, e insegurança que os investidores externos sentem quando analisam a possibilidade em investir na energia eólica *onshore* no Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEOLICA. IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS E AMBIENTAIS DA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NO BRASIL. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2022/04/ABEEolica_GO-Associados-V.-Final.pdf> Acesso em 28 mai. 2023.

AGÊNCIA BRASIL. ENERGIA EÓLICA: PANORAMA ATUAL E PERSPECTIVAS FUTURAS. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2023-04/capacidade-de-geracao-de-energia-eolica-deve-bater-recorde-neste-ano#:~:text=A%20e%C3%B3lica%20j%C3%A1%20responde%20hoje,29%20GW%20de%20capacidade%20instalada.>> Acesso em 16 mai. 2023.

AGÊNCIA UFC. Os impactos ambientais e sociais da produção de energia eólica. Disponível em: <<https://agencia.ufc.br/os-impactos-ambientais-e-sociais-da-producao-de-energia-eolica/>> Acesso em 5 jun. 2023.

AMBIENTE LEGAL. O CAMINHO PARA A ENERGIA EÓLICA OFFSHORE NO BRASIL. Disponível em: <<https://www.ambientelegal.com.br/o-caminho-para-a-energia-eolica-offshore-no-brasil/>> Acesso em 1 mai. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. Números ABEEólica de setembro 2022. São Paulo: 2022.

BBC Brasil. CO2: os gráficos que mostram que mais da metade das emissões ocorreram nos últimos 30 anos. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-59013520>>. Acesso em: 20 mai. 2023.

BEN. Balanço Hídrico Nacional Interativo. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-interativo>> Acesso em 17 mar. 2023.

BFGINTERNATIONAL. Caixa da Nacelle para turbina eólica. Saiba as vantagens. Disponível em: <https://bfginternational.com.br/pt/energia-renovavel/caixa_nacelle-turbina-eolica/> Acesso em 30 mar. 2023

BICALHO, F. S.. Integração de Turbinas Eólicas às Redes Elétricas. 2013. Dissertação de Especialização – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

BP. Statistical review of world energy 2009. Disponível em: <bp.com/> Acesso em: 15 mai. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Roadmap – Energia Eólica Marítima no Brasil. Rio de Janeiro: 2023.

ENGIE. CONHEÇA OS 66 PROJETOS DE ENERGIA ELÉTRICA OFFSHORE EM ANDAMENTO NO BRASIL. Disponível em: <<https://www.alem-da-energia.engie.com.br/conheca-as-fases-dos-66-projetos-de-energia-eolica-offshore-em-andamento-no-brasil/>>

Acesso em: 15 jan. 2023.

EPBR. Eólicas offshore: sem marco legal, investimentos podem migrar para outros países. Disponível em: < <https://epbr.com.br/eolicas-offshore-sem-marco-legal-investimentos-podem-ir-embora/>> Acesso em 10 mai. 2023.

EPBR. LITORAL DEVE TER PRIMEIRO PARQUE EÓLICO OFFSHORE Disponível em: < <https://litoralmania.com.br/litoral-deve-ter-primeiro-parque-eolico-offshore/>> Acesso em: 19 jan. 2023.

EPE. Dashboard de Energia Eólica Onshore: base existente, evolução temporal e perspectivas. Disponível em: < <https://gisepeprd2.epe.gov.br/arcgisportal/apps/dashboards/d520ad94eadc48b18da1ef2fa409866b>> Acesso em 12 mai. 2023.

EPE. EPE publica Plataforma Interativa de Energia Eólica Onshore no Brasil. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/epe-publica-plataforma-interativa-de-energia-eolica-onshore-no-brasil>> Acesso em 12 mai. 2023.

EWEA. EWEA diagrama de conexão offshore. Disponível em: < <https://www.ewea.org/>> Acesso em 11 mai. 2023.

FERREIRA, L. M., PERSPECTIVA DA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA OFFSHORE NO BRASIL. Trabalho de Graduação. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

FUNDAÇÃO JOAQUIM NABUCO. Inaugurado o maior parque eólico offshore do mundo, o Walney Extension. Disponível em: < <https://antigo.fundaj.gov.br/index.php/a-questao-energetica/6001-inaugurado-o-maior-parque-eolico-offshore-do-mundo-o-walney-extension>> Acesso em 23 abr. 2023.

GIZBR. Mortes de morcegos e pássaros em turbinas eólicas aumentam durante migrações. Disponível em: < <https://gizmodo.uol.com.br/mortes-de-morcegos-e-passaros-em-turbinas-eolicas-aumentam-durante-migracoes/>> Acesso em 6 jun. 2023.

GORAYEB, A.; BRANNSTROM, C.; MEIRELES, A. J. A.. Impactos socioambientais da implantação dos parques de energia eólica no Brasil; Fortaleza: Edições UFC, 2019

GOVBR. Brasil sobe para a sexta posição em ranking internacional de capacidade de energia eólica onshore. Disponível em: < <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2022/04/brasil-sobe-para-a-sexta-posicao-em-ranking-internacional-de-capacidade-de-energia-eolica>> Acesso em 4 abr. 2023.

GOVBR. Eólica Offshore é a aposta do Brasil para consolidar a transição energética. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/meio-ambiente-e-clima/2022/11/eolica-offshore-e-a-aposta-do-brasil-para-consolidar-a-transicao-energetica.>> Acesso em 20 abri. 2023.

GWEC. Global Wind Report 2023. Disponível em: <<https://gwec.net/globalwindreport2023/>> Acesso em 21 mar. 2023.

HERNANDEZ, M. O.; SHADMAN, M.; Environmental impacts of offshore wind installation, operation and maintenance, and decommissioning activities. A case study of Brazil. Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 144, July 2021,110994.

IBERDROLA. ENERGIA EÓLICA OFFSHORE. Disponível em: <<https://www.iberdrola.com/quem-somos/nossa-atividade/energia-eolica-offshore> > Acesso em: 19 jan. 2023.

IEA. International energy agency. world energy outlook 2009. Disponível em: <<https://www.worldenergyoutlook.org/> > Acesso em: 25 mai. 2023.

MARTINS, F.R.,

MURAYAMA, R. H., ESTUDO, ANÁLISE E EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE GERAÇÃO EÓLICA. Trabalho de Graduação, curso de Engenharia Elétrica – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2012.

NEOENERGIA. NEOENERGIA | RIO DO FOGO. Disponível em: <<https://www.neoenergia.com/pt-br/sobre-nos/linhas-denegocios/renovaveis/renovaveis-eolica/Paginas/rio-do-fogo.aspx>> Acesso em 15 abr. 2023.

ONS. RESULTADOS DA OPERAÇÃO - GERAÇÃO E FATOR DE CAPACIDADE MÉDIOS MENSAIS. Disponível em: < <https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao-fator-capacidade-medios-mensais.aspx> > Acesso em 13 jun. 2023

PEREIRA, F.. ANÁLISE DO ARCABOUÇO LEGAL ASSOCIADO AO DESENVOLVIMENTO DE PARQUES EÓLICOS OFFSHORE NO BRASIL. Dissertação apresentada ao Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) e à Escola Nacional de Administração Pública (ENAP), como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Políticas Públicas e Desenvolvimento, área de concentração em Políticas Públicas, para a obtenção do título de Mestre, 2017.

PEREIRA, M. M.. Um Estudo do Aerogerador de Velocidade Variável e Sua Aplicação para Fornecimento de Potência Elétrica Constante. 2004. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2004.

PERSPECTIVAS. Disponível em: < <https://noticias.portaldaindustria.com.br/artigos/ricardo-cavalcante/o-futuro-do-nordeste-e-verde/>> Acesso em 26 mai. 2023.

PINTO, M. O.. Fundamentos de energia eólica – Rio de Janeiro: LTC, . il.; 24 cm, 2013.

PORTAL DA INDÚSTRIA. ENERGIA EÓLICA NO BRASIL: EVOLUÇÃO, DESAFIOS RIBEIRO, Luíza Bastos. UM ESTUDO SOBRE ENERGIA EÓLICA NO BRASIL. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.

PORTAL ENERGIA. PARQUES EÓLICOS. Disponível em: < <https://www.portal-energia.com/os-maiores-parques-eolicos/> > Acesso em 16 mai. 2023.

SANTOS, V. M. L.. ENERGIA EÓLICA NO BRASIL: EVOLUÇÃO, DESAFIOS E PERSPECTIVAS. Trabalho Acadêmico – Artigo, Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Vale do São Francisco, 2019.

SEEG. Emissão de Gases. Disponível em: < https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission > Acesso em 10 mai. 2023.

SILVA, R. R. C.. VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DAS ESTACAS INJETADAS AUTOPERFURANTES EXECUTADAS EM SOLOS ARENOSOS PARA CONSTRUÇÃO DE USINA EÓLICA. Artigo Acadêmico publicado na Revista Eletrônica de Engenharia Civil – REEC, 2017.

TEIXEIRA, W. C.. ENERGIA EÓLICA: PANORAMA ATUAL E PERSPECTIVAS FUTURAS. Trabalho Acadêmico - Artigo, Curso de Engenharia Elétrica, UniAcademia, Centro Universitário, 2022.

TRAPP, B.. Análise de Viabilidade de uma fazenda eólica no Rio Grande do Sul. 2009. Trabalho de Graduação, curso de Engenharia Mecânica, departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.