



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE CARAÚBAS
INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

BRUNA NAIARA SANTOS DIAS

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENÉRGICO DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM
PARQUE EÓLICO *OFFSHORE* NA COSTA DO RN

CARAÚBAS

2021

BRUNA NAIARA SANTOS DIAS

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENÉRGICO DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM
PARQUE EÓLICO *OFFSHORE* NA COSTA DO RN

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em Ciência
e Tecnologia.

Orientador: Prof. Me. Daniel Carlos de
Carvalho Crisóstomo

CARAÚBAS

2021

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas
da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S541 Santos Dias, Bruna Naiara.
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENÉRGICO DA
IMPLEMENTAÇÃO DE UM PARQUE EÓLICO OFFSHORE NA
COSTA DO RN / Bruna Naiara Santos Dias. - 2021.
63 f. : il.

Orientador: Daniel Carlos de Carvalho
Crisóstomo.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2021.

1. Energia Eólica. 2. Offshore. 3.
Aerogeradores. I. Carlos de Carvalho Crisóstomo,
Daniel, orient. II. Título.

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

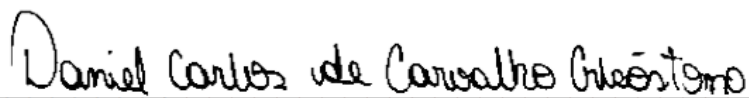
BRUNA NAIARA SANTOS DIAS

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENÉRGICO DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM
PARQUE EÓLICO *OFFSHORE* NA COSTA DO RN

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em Ciência
e Tecnologia.

Defendida em: 05 /11/ 2021.

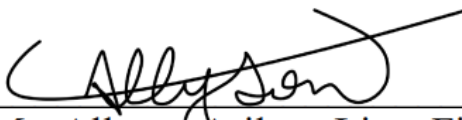
BANCA EXAMINADORA



Prof. Me. Daniel Carlos de Carvalho Crisóstomo



Prof. Me. Thomas Tadeu de Oliveira Pereira



Prof. Me. Allyson Arilson Lima Filgueira

A toda a minha família, por sempre terem me apoiado e me sustentado até aqui!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer a deus por sempre ter me sustentado, me dado forças e fé para continuar a caminhada e chegar até aqui, sem a sua força divina jamais teria conseguido êxito para chegar até este estágio.

Em seguida quero agradecer a minha família, em especial aos meus pais, Edivaldo Dias da Cunha e Rosinete Marques dos Santos e a minha irmã, Brena dos Santos Dias, que sempre me apoiaram e me deram forças para que eu pudesse seguir em frente, buscando meus objetivos e valorizando cada vitória conquistada. Vocês foram e sempre serão o meu pilar de sustentação e tenho certeza que esta batalha será vencida e essa vitória jamais poderá ser apenas minha, essa vitória com certeza partilharei com vocês.

Também quero agradecer aos meus mestres formadores, sem vocês não seria possível adquirir toda essa carga de conhecimentos. Em especial a professora e doutora Guymmann Clay, que além de ser uma grande profissional, também é uma amiga que encontrei dentro da universidade, sou extremamente grata pelos ensinamentos que me passou e por todos os conselhos.

Aos meus colegas da universidade que, sempre estiveram presentes comigo, desde os momentos bons até os momentos mais árduos desta caminhada. Em especial a Jonas Góis, Gustavo Brito, Cassio Alencar, Victor Renan, Victor Emanuel. As minhas melhores amigas, Renyele Mesquita que sempre esteve ao meu lado me apoiando e me incentivando para que eu pudesse alcançar meus sonhos, Elizabeth Aragão que é uma pessoa muito importante e que sempre esteve ao meu lado, Fernanda Alves, Joice Gurgel, Marcela Sampaio e Eulinia Queiroz.

Quero agradecer ao Professor Daniel Carlos de Carvalho Crisóstomo, que me orientou de forma magistral e sempre teve paciência e muita dedicação para que este trabalho pudesse ser feito da melhor forma possível, a você, meu muito obrigada. E por último quero agradecer a instituição UFERSA que, me abriu as portas e me possibilitou adquirir essa gama de conhecimentos.

RESUMO

Com o aumento dos danos ao meio ambiente e a crescente procura por fontes de energias alternativas, a energia eólica desponta como uma fonte capaz de suprir essas necessidades, além de ser uma fonte de energia renovável, é capaz de produzir altos índices de energia, sem que haja muitos danos ao meio ambiente. Nos últimos anos, pode-se ver a energia eólica ganhando um maior espaço no mercado de geração de energia. A energia eólica *offshore* passou a figurar neste mercado por que grandes potências produtoras de energia eólica não dispunham mais de território para a instalação *onshore*, com isso, as instalações *offshore* foram ganhando seu espaço e a tendência é que haja um grande investimento neste setor. Este estudo, buscou estimar o potencial eólico *offshore* existente na costa marítima do Rio Grande do Norte. Os dados utilizados para a realização deste estudo foram coletados do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro por meio um modelo de Brams que, realiza previsões de tempo e clima. Para realizar os cálculos correspondentes a medição de energia, se fez necessário a utilização da velocidade dos ventos para uma altura de 100 m. Calculou-se a distribuição da frequência de Weibull, a produção de energia, por conseguinte foi calculada a produção de energia anual, e por último, foi realizado o cálculo do fator de capacidade. Através da realização destes cálculos citados anteriormente, foi possível comprovar que é viável a instalação do aerogerador de 9,5 MW de potência que, foi analisado no trabalho.

Palavras-chave: Energia eólica *offshore*, aerogerador, energia renovável.

ABSTRACT

With the increase in damage to the environment and the growing demand for alternative energy sources, wind energy emerges as a source capable of meeting these needs, besides being a renewable energy source, it is capable of producing high energy levels, without harm to the environment. In recent years, you can see wind energy gaining more space in the power generation market. Offshore wind *power became* part of this market because major wind power producers no longer had territory for the *onshore installation*, with this, *offshore installations were gaining* their space and the tendency is for there to be a large investment in this sector. This study aimed to estimate the offshore wind potential *existing* on the maritime coast of Rio Grande do Norte. The data used to carry out this study were collected from the Atlas of Brazilian Wind Potential through a Brams model that performs weather and climate forecasts. In order to perform the calculations corresponding to the energy measurement, it was necessary to use the wind speed for a height of 100 m. Weibull frequency distribution, energy production were calculated, therefore annual energy production was calculated, and finally, the capacity factor was calculated. By performing these calculations mentioned above, it was possible to prove that it is feasible to install the wind turbine of 9.5 MW of power that was analyzed at work.

Keywords: Offshore wind *power*, wind turbine, renewable energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Turbina eólica de Charles Brush.....	20
Figura 2.2 – Aerogerador de Jacobs.....	21
Figura 2.3 – Principais partes de um aerogerador.....	30
Figura 2.4 – Princípio de conversão de energia cinética do vento em energia elétrica.....	30
Figura 2.5 – Turbinas eólicas do eixo horizontal.....	31
Figura 2.6 – Turbinas eólicas do eixo vertical.....	31
Figura 2.7 – Curva de potência de uma turbina eólica.....	32
Figura 2.8 – Zonas de curva de potência de uma turbina eólica.....	33
Figura 2.9 – Pressão horizontal que atua em um pequeno elemento diferencial de um fluido.....	36
Figura 2.10 – Tipos de fundações para parques eólicos <i>offshore</i>	44
Figura 3.1 – Procedimentos utilizados para a realização deste trabalho.....	53
Figura 4.1 – Áreas mais promissoras para empreendimentos eólicos no RN.....	55
Figura 4.2 – Curva de potência do aerogerador.....	56
Figura 4.3 – Distribuição de Weibull para $K = 4,5$ e $C = 9,0$ m/s.....	58

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 – Cinco continentes que mais produzem Energia Eólica.....	23
Gráfico 2.2 – Países que mais produzem Energia Eólica no mundo.....	23
Gráfico 2.3 – Parques instalados x Parques com instalações previstas para 2020.....	24
Gráfico 2.4 – Matriz Energética Atual – Em operação.....	26
Gráfico 2.5 – Matriz Energética Atual – Em construção.....	26
Gráfico 2.6 – Matriz Energética Atual – Em construção não iniciada.....	26
Gráfico 2.7 – Frequência de distribuição em horas por ano de vento.....	38
Gráfico 2.8 – Função Densidade Probabilidade dos ventos.....	40
Gráfico 2.9 – (a) representa a função densidade probabilidade de Weibull com parâmetros de forma $k = 1, 2$ e 3 , e parâmetro de escala fixo de $c = 2$. (b) densidade probabilidade de Weibull com parâmetros escala $c = 4, 6$ e 8 (com parâmetro de forma fixo em $k = 3$).....	41
Gráfico 2.10 – Novas instalações <i>Onshore</i> e <i>Offshore</i>	45
Gráfico 2.11 – Novas instalações eólicas <i>Onshore</i> e <i>Offshore</i> na Europa.....	46
Gráfico 2.12 – Novas instalações eólicas <i>Onshore</i> e <i>Offshore</i> na Europa por país.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Escala de Beufort para magnitude dos ventos.....	37
Tabela 2.2 – Potencial de geração de energia eólica em diferentes regiões da margem brasileira.....	49
Tabela 2.3 – Características técnicas da turbina eólica AREVA Wind M 5000.....	49
Tabela 4.1 – Característica da turbina V164-9,5 MW.....	56
Tabela 4.2 – Curva de potência do aerogerador V164-9,5 MW.....	57
Tabela 4.3 – Produção de energia para cada valor de velocidade.....	59
Tabela 4.4 – Análise do aerogerador V164-9,5 MW.....	60

NOMECLATURAS

Letras latinas

C_p - Coeficiente de potência

v - Velocidade

h - Altura

P - Potência disponível

f - Frequência

k - fator de escala

c - fator de forma

F_c – Fator de capacidade

PE – Produção de energia

PAE – Produção de energia anual

P_n – Potencia nominal

$V_{Cut\ in}$ – Velocidade mínima em que a máquina gera potência útil

$V_{Cut\ out}$ – Velocidade maxima permitida

V_n – Velocidade nominal

D – Diâmetro

A – Área varrida

t – Tempo

μ - Velocidade escalar na ponta da pá

r – Raio

Letras gregas

μ - Rugosidade

β – Ângulo de passo

ω – Velocidade angular

ρ – Densidade

λ – TSR

Siglas

IRENA - Agência Internacional de Energia Renovável

GWEC – *Global Wind Energy Counce*

EPE – Empresa de pesquisa energética

IEA/CTA - Instituto de Aeronáutica e Espaço/Centro de Tecnologia Aeroespacial

CELPE - Companhia Energética do Pernambuco

Cepel - Centro de Pesquisa em Energia Elétrica

Proinfa - Programa de incentivo às fontes alternativas de energia

ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

Cosern - Companhia Energética do Rio Grande do Norte

TSR - *Tip-speed ratio*

IBAMA - Instituto Brasileiro de Meio Ambiente

ZEE - zona de economia exclusiva

Abreviações

CGH – Central Geradora Hidrelétrica

EOL – Central Geradora Eólica

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

UFV – Central Geradora Solar Fotovoltaica

UHE – Usina Hidrelétrica

UTE – Usina Termelétrica

UTN – Usina Termonuclear

PAE – Produção de Energia Anual

PE - Produção de Energia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
OBJETIVOS	18
1.1.1 Objetivo geral.....	18
1.1.2 Objetivos específicos.....	18
2 HISTÓRIA, PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO, PECULIARIDADES E	
TECNOLOGIAS DA ENERGIA EÓLICA	19
2.1 Histórico da Energia Eólica no Mundo	19
2.1.2 Geração de Energia Eólica no Mundo.....	22
2.2 HISTÓRICO DA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL	24
2.2.1 Potência Nacional	25
2.2.2 Panorama da Energia Eólica no Nordeste no Rio Grande do Norte	27
2.2.3 O Aerogerador, Seus Principais Componentes e Princípio de Conversão de Energia	
.....	28
2.2.4 Curvas de Potência e Potência Extraída do Aerogerador	31
2.3 O Vento: Fatores que Influenciam a Estatística	34
2.3.1 Forças Atuantes no Vento	35
2.3.2 Estatísticas dos Ventos	37
2.4 Energia Eólica <i>Offshore</i>	41
2.4.1 Histórico da Energia Eólica <i>Offshore</i>	41
2.4.2 Peculiaridades da Geração de Energia Eólica <i>Offshore</i>.....	42
2.4.3 Potência Global Instalada.....	43
2.4.4 Energia Eólica <i>Offshore</i> no Brasil.....	47
3 MATERIAIS E METODOLOGIA.....	50
3.1 Materiais Utilizados.....	50
3.2 Metodologia.....	51
3.3 Caracterização da Área de Estudo.....	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1 Análises e resultados.....	54
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	60
5.1 Conclusões	60
5.2 Sugestões.....	61

1 INTRODUÇÃO

Sabendo do aumento demasiado das agressões causadas ao meio ambiente e as mudanças climáticas que causam alterações nas características naturais do planeta, diversos países têm se preocupado em diminuir a emissão de gases poluentes através da produção de energia elétrica, e ao mesmo tempo, em que procuravam diversificar sua matriz energética através de fontes de energia renováveis (NUNES, 2020). Outro fator que colaborou com a utilização de fontes alternativas, foi a crise do petróleo e o declínio da economia mundial em 1970, onde foi surgindo a necessidade de novas fontes de energias renováveis, já que até então o mundo praticamente só dispunha de fontes de energias não renováveis provindas de combustíveis fósseis, foi a partir desse período que os investidores se voltaram para a produção de energia eólica (FADIGAS, 2011). Além disso, a população cresceu de forma exponencial e assim, se fazia necessário uma maior geração de energia elétrica e que fosse capaz de satisfazer a demanda do mercado. Mediante a essas problemáticas, a energia eólica surge como opção para a geração de energia limpa, pouco nociva para o meio ambiente e com um vasto recurso energético.

A produção de energia eólica vem ganhando espaço no cenário mundial, atualmente a maior fonte de geração de energia eólica é através de torres terrestres (*onshore*), contudo, a produção de energia através da fonte marítima (*offshore*) pode obter melhores resultados, pois, os ventos em alto mar possuem uma maior velocidade, comparado aos ventos terrestres (PINTO, 2017). Segundo levantamento divulgado pelo Banco Mundial, o território marítimo pode produzir até 71.000 GW de potência. Atualmente, a potência explorada pela tecnologia *offshore* ao redor do mundo é, cerca de 35.000 GW (GWCE, 2021).

Em um estudo realizado pela Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2020), foi possível demonstrar que até o ano de 2030 a capacidade global de energia eólica *offshore* instalada será de 228 GW. O mesmo estudo comprovou que, a fonte é capaz de gerar uma potência que pode ser até quatro vezes maior em relação a demanda energética atual, proporcionando melhorias sociais e econômicas.

Segundo um estudo realizado pela empresa de pesquisa energética (EPE, 2020), dados apontam que, o potencial eólico da tecnologia *offshore* no Brasil é de aproximadamente 700 GW, o mesmo estudo ainda declarou que em águas profundas de alto mar a geração de energia pode ser cada vez maior, o que também irá afetar diretamente nos gastos para realizar tal operação.

Essa pesquisa objetiva estudar e estimar o potencial eólico *offshore*, dando ênfase ao litoral do Rio Grande do Norte. A região é privilegiada geograficamente, parte do seu litoral possui velocidade média variando entre 8,0 e 8,5 m/s em uma altura de 50 m, tornando o estado pioneiro na geração de energia eólica (PINTO, 2013).

OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Realizar um estudo estimativo na costa do estado do Rio Grande do Norte, com a finalidade de apresentar o panorama atual em que a energia eólica está inserida, dando ênfase para a energia eólica *offshore*.

1.1.2 Objetivos específicos

- Pesquisar equipamentos e componentes estruturais que otimizem o custo-benefício na implementação do parque no local.
- Realizar estudos demonstrativos sobre a caracterização dos ventos na costa potiguar.
- Analisar tecnologias utilizadas atualmente de acordo sua viabilidade técnica.
- Demonstrar os principais constituintes que integram o sistema de geração de energia eólica *offshore* e a durabilidade desses equipamentos.

2 HISTÓRIA, PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO, PECULIARIDADES E TECNOLOGIAS DA ENERGIA EÓLICA

No cenário nacional e mundial, a geração de energia elétrica através da energia cinética dos ventos vem se consolidando e aparece como uma das principais fontes de energias renováveis. Nos últimos anos, essa fonte alternativa vem crescendo e apresentando resultados satisfatórios. O principal objetivo em relação a utilização desta prática é, a diversificação da matriz energética nacional e menor dependência da geração de energia através de fontes não renováveis.

Este capítulo possui como foco, a demonstração de diversas perspectivas relacionadas a energia eólica como: o surgimento da utilização desta prática, dados sobre a potência nacional e mundial, melhores tecnologias e sua relevância.

2.1 Histórico da Energia Eólica no Mundo

Para conseguir gerar energia através dos ventos, foi necessário passar por um processo evolutivo que vem desde os moinhos de ventos até grandes tecnologias dos aerogeradores atuais. Os primeiros registros que fazem menção de moinhos de ventos vieram da Pérsia no século VII onde hoje fica localizado o Irã, inclusive, há relatos de que alguns desses moinhos existem até a atualidade. Ainda nessa época, a Holanda com o seu território abaixo do nível do mar, conseguiu destaque por meio da instalação de uma grande quantidade de moinhos de vento que realizavam a drenagem das terras e a moagem de grãos (PINTO, 2013).

Após o surgimento das máquinas a vapor no século XIX deu-se início ao decaimento da energia eólica na Europa, contudo, nessa mesma época os Estados Unidos alavancaram as instalações de moinhos de ventos através de novas tecnologias deixando-os cada vez mais descomplicados e eficientes, o que também gerou uma diminuição dos custos. Através do Reverendo Leonhard R. Wheeler, chegaram a desenvolver um equipamento chamado Eclipse, semelhante aos cata-ventos atuais (MOREIRA, 2017).

Historicamente, os primeiros moinhos de ventos foram fabricados com madeira, essa matéria-prima não era favorável, pois a máquina não dispunha de velocidade suficiente para a geração de energia. Para realizar melhorias no equipamento, em 1883 o norte-americano Thomas Osborn Perry desenvolveu o primeiro moinho de vento de aço, contudo, o novo equipamento contava com um maior custo e um melhor desenvolvimento (EL-SHARKAWI, 2016). O professor James Blyth foi responsável pela criação da primeira máquina capaz de

transformar os ventos em energia elétrica, o feito foi realizado em julho de 1887 na cidade escocesa Glasgow, a máquina serviu de inspiração para a evolução das turbinas de moinhos de vento que viria a ser desenvolvida na Holanda (PINTO, 2013).

No ano seguinte, o americano Charles Francis Brush desenvolveu outro aerogerador, com essa nova tecnologia (Figura 2.1), Charles foi nomeado como o criador do primeiro aerogerador, contudo, essa nomeação ocorreu de forma equivocada, já que havia relatos comprovando que esse feito é James. Sua máquina possuía tamanhos e características diferentes da máquina de James, possuindo 144 pás, um diâmetro de 17 metros do rotor e sua torre contava com 18,3 metros de altura. A energia gerada através dessa máquina, servia para fornecer energia elétrica para a sua própria residência (PINTO, 2013).

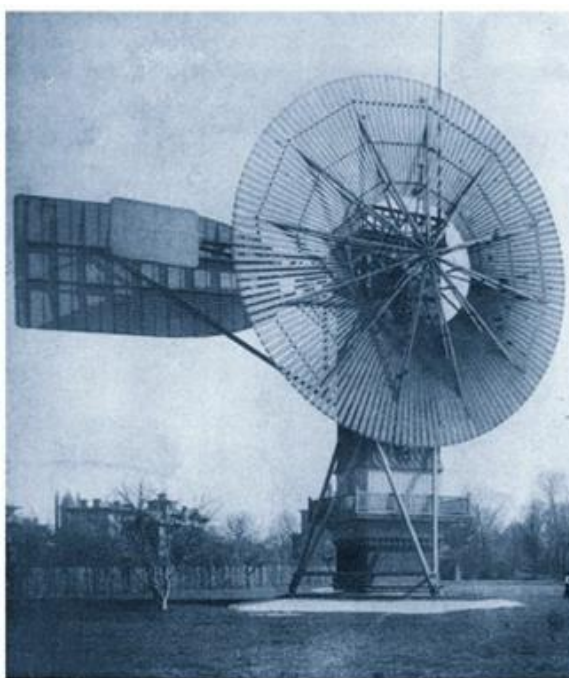


Figura 2.1 Turbina eólica de Charles Brush

Fonte: PINTO, 2013

O professor dinamarquês Poul La Cour foi outro a contribuir de forma assídua na elaboração de aerogeradores, em 1891, o mesmo confeccionou um protótipo de turbina eólica para realizar seus experimentos. Essa tecnologia contava com turbinas acopladas a um gerador de corrente contínua, a eletricidade produzida era destinada para eletrólise e para armazenamento de gás. As áreas rurais das cidades dinamarquesas que, antes não dispunham de energia elétrica, passaram a contar com o recurso por volta de 1908, e posteriormente, no decorrer da I guerra mundial, o país já contava com 120 turbinas instaladas em seu território. Ao

fim da II guerra mundial, essas turbinas passaram a ser cada vez mais utilizadas, devido ao seu fácil manuseio (FADIGAS, 2011).

Os Estados Unidos foi outro país a conseguir desenvolver um aerogerador, o modelo foi bem aceito no mercado e obteve um grande índice de vendas, o feito foi realizado pelos irmãos Marcellus e Joseph Jacobs (Figura 2.2). A máquina foi denominada como aerogerador Jacobs, dispunha de três pás, diâmetro de 4 metros, sua potência variava entre 1,8 e 3 kW respectivamente (FADIGAS,2011).



Figura 2.2 - Aerogerador de Jacobs

Fonte: FADIGAS, 2017

Após a criação e utilização da máquina a vapor, houve um declínio da utilização da energia eólica, esse panorama foi revertido no ano de 1970, quando se deu início a crise do petróleo, foi a partir de então que, o governo norte-americano lançou o plano de créditos fiscais, gerando um novo interesse pela utilização da energia gerada pelos ventos e alavancou a construção de um grande número de parques eólicos. Contudo, essas máquinas necessitavam

de custos excedentes de manutenção e problemas elétricos para a rede (EL-SHARKAWI, 2015).

2.1.2 Geração de Energia Eólica no Mundo

Com o aumento da demanda nacional por energia elétrica, atrelada a culminância pela diversificação da matriz energética, a energia eólica apresenta bons números relacionados ao aumento de potência instalada. A energia eólica tem se tornado uma das fontes de energia elétrica que mais vem crescendo no mundo, fomentando a sua instalação e aumentando a potência produzida. A capacidade total produzida ao fim de 2015 chegou a 432,41 MW de potência, apresentando um crescimento de 17% em relação ao ano 2000 (MOREIRA, 2017).

O ano de 2020 tornou-se o segundo melhor ano da história em questão de instalações da energia eólica, foi possível atingir a marca de 86,9 GW de potência em instalações *onshore*, enquanto as instalações realizadas em alto mar (*offshore*) chegaram a produzir 6,1 GW. Com o aumento de instalações no território chinês, em 2020 a Ásia-Pacífico chegou a liderar a produção de energia eólica mundial, e melhorou a sua produção em 8,5%, em seguida, destaca-se a América do Norte que detém 18,4% de potência instalada, essa produção alavancou ainda mais com as grandes instalações realizadas pelos EUA, a Europa vem em seguida com 15,9%, a América Latina, encontra-se em quarto lugar, possuindo 5,0%, por último África e Oriente Média com 0,9% (GWE, 2021).

Em 2020, os cinco maiores produtores de energia eólica foram, China, Estados Unidos, Brasil, Holanda e Alemanha, estes países foram responsáveis por gerar 80,6% de toda potência de energia eólica instalada no mundo (GWE, 2021).

Os Gráficos 2.1 e 2.2, demonstraram a nova capacidade de geração de energia eólica por região em 2020 e nova capacidade de energia eólica e a participação dos cinco principais mercados em 2020, respectivamente.

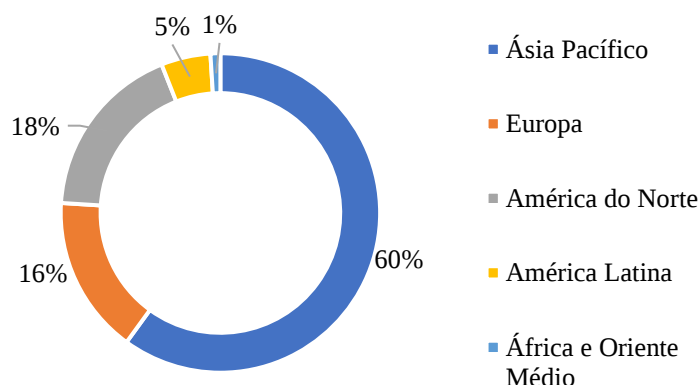


Gráfico 2.1 - Cinco continentes que mais produzem Energia Eólica

Fonte: Adaptado de GWEC, 2021

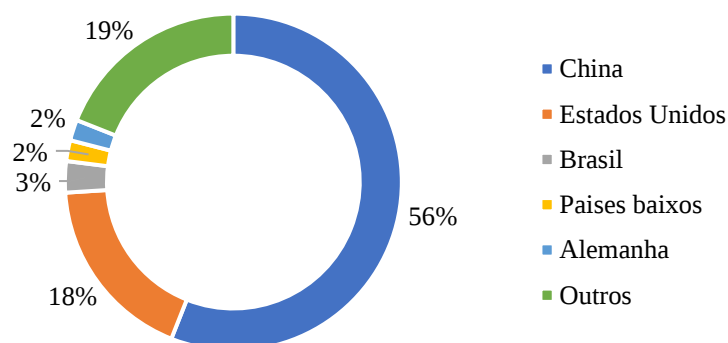


Gráfico 2.2 - Países que mais produzem Energia Eólica no mundo

Fonte: Adaptado de GWEC, 2021

A capacidade de energia eólica *onshore* global adicionada em 2020 alcançou 86,9% da capacidade, esses dados, representam uma crescente de 59% ao ano. Vale ressaltar que, essa marca foi alcançada mediante a relevância de potências mundiais como China e Estados Unidos, os dois países são os maiores produtores de energia eólica do mundo (GWEC, 2021).

O Gráfico 2.3, demonstra dados referentes a parques já instalados, como também parques que tinham previsão de serem instalados no ano de 2020, em alguns países que se destacam na produção de energia eólica, tanto *onshore* quanto *offshore*, os dados em azul representam parques já instalados em 2020, enquanto os dados em laranja, demonstram os projetos que devem ser construídos no ano de 2020.

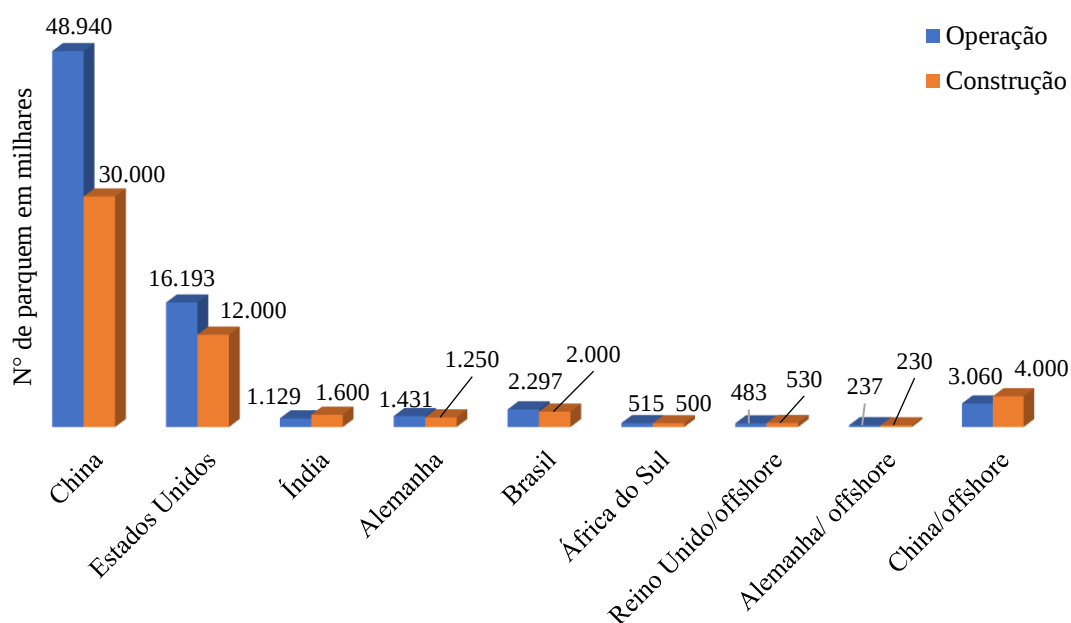


Gráfico 2.3 – Parque instalados x Parques com instalações previstas para 2020

Fonte: Adaptado de GWEC, 2021

2.2 HISTÓRICO DA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

Quando deu-se início a crise do petróleo em 1973, o mundo passou a procurar novas fontes de energia, afim de diversificar a matriz energética através das energias renováveis, porém, apenas em 2001 o Brasil passou a explorar seu potencial eólico. Diante dessa problemática, em 1976 o IEA/CTA (Instituto de Aeronáutica e Espaço/Centro de Tecnologia Aeroespacial), elaborou 15 protótipos de turbinas eólicas, as mesmas foram produzidas na cidade paulista de São José dos Campos, possuía uma potência nominal de 20 kW, o equipamento funcionou durante poucas semanas até demonstrar fadiga, o instituto ainda chegou a produzir novos modelos, com potências nominais de 1 kw e 5 mm de diâmetro, mesmo com a mudança, o projeto não funcionou bem, contendo problemas de vida útil dos materiais utilizados, o que culminou com a desistência do projeto (PINTO, 2013).

A primeira turbina eólica foi instalada no Brasil em 1992, na ilha de Fernando de Noronha, a instalação ocorreu através da colaboração de três entidades, CELPE (Companhia Energética do Pernambuco), juntamente com um grupo de energia eólica da Universidade Federal do Pernambuco- UFPE e o Folkcenter (Instituto de pesquisa da Dinamarca), que inclusive financiou o projeto. A turbina continha um aerogerador de 75 kW de potência, torre de 23 m e 17 metros de diâmetro (PINTO, 2017).

Quando foi criado o Atlas Eólico Brasileiro em 2001, por meio do Centro de Pesquisa em Energia Elétrica (Cepel), os estudos demonstravam que o Brasil poderia explorar um potencial avaliado em 143 GW, a pesquisa ainda indicava que esses dados poderiam ser explorados apenas por parques *onshore* (no solo) que continham turbinas instaladas em até 50 metros do solo (MOREIRA, 2014).

A exploração do atlas brasileiro se deu início em 2002, quando foi alavancada por meio da lei n. 10.438 e da criação do Proinfa (programa de incentivo às fontes alternativas de energia). Este programa teve início com a elaboração de metas, a primeira delas estabelecia a geração de 3.300 MW até o último semestre de 2006, essa potência seria dividida de forma igualitária entre a energia eólica, biomassa e PCH. Já a segunda meta determinava a participação dessas fontes em 10% do consumo de eletricidade em 20 anos (FADIGAS, 2011).

2.2.1 Potência Nacional

O setor da energia eólica apresenta uma crescente positiva nos últimos anos, ao final de 2020, o Brasil contava com 686 parques eólicos em operação com uma capacidade instalada de 17,75 GW de potência, comparado ao mesmo período de 2019, ocorreu um acréscimo de aproximadamente 14,89%. O ano de 2020 contou com 66 parques instalados juntos, chegaram a produzir 2,30 GW. Os estados que mais foram beneficiados com instalações de parques eólicos foram, Bahia, Rio Grande do Norte, Piauí e Ceará (ABEEólica, 2020).

Com o alto investimento realizado pelo setor de energia eólica, em junho de 2021 o Brasil chegou a produzir 19 GW de capacidade instalada, essa condição foi alcançada por meio de 726 parques em operação, contando com 8.500 aerogeradores. Atualmente, a energia gerada pelos ventos é a segunda fonte de energia elétrica mais utilizada no Brasil, de acordo com o Ranking Mundial do GWEC (*Global Wind Energy Counce*), no ano de 2020 o Brasil passou a ser a sétima maior potência mundial no quesito de produção de energia eólica e se tornou o terceiro país que mais instalou energia eólica no mundo (ABEEÓLICA, 2021).

De acordo com o *site* virtual da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), é possível obter dados capaz de explanar o atual cenário da energia eólica do Brasil, por meio de estudos divulgados através da plataforma é possível verificar as diferentes fontes de energias brasileiras, estas fontes são distribuídas por meio de três categorias diferentes: Organização em operação, organização em construção e organização em construção não inicializada.

Os Gráficos, 2.4, 2.5 e 2.6 demonstrarão a realidade da matriz energética atual, de acordo com a descrição realizada anteriormente.

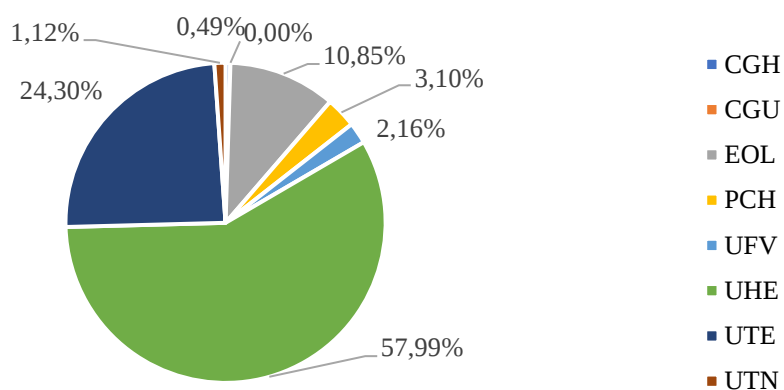


Gráfico 2.4 - Matriz Energética Atual – Em operação

Fonte: Adaptado de ANEEL, 2021

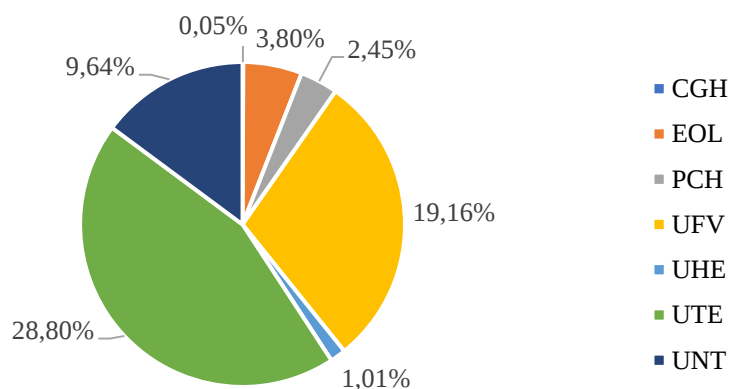


Gráfico 2.5 - Matriz Energética Atual – Em construção

Fonte: Adaptado de ANEEL, 2021

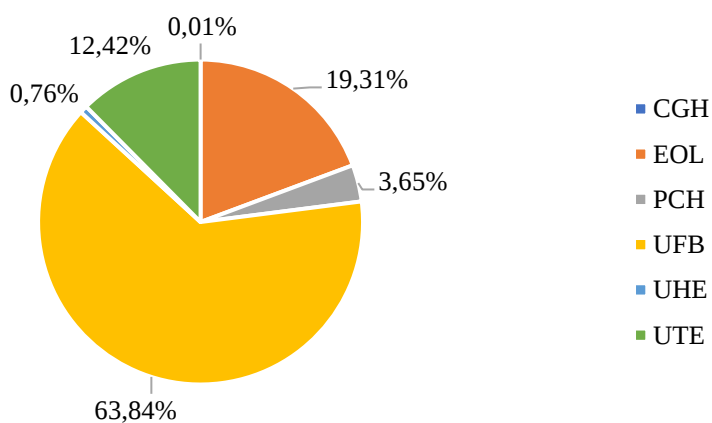


Gráfico 2.6 - Matriz Energética Atual – Em construção não iniciada

Fonte: Adaptado de ANEEL, 2021

De acordo com os Gráficos 2.4, 2.5 e 2.6, as siglas demonstradas, apresentam: CGH – Central Geradora Hidrelétrica; EOL – Central Geradora Eólica; PCH – Pequena Central Hidrelétrica; UFV – Central Geradora Solar Fotovoltaica; UHE – Usina Hidrelétrica; UTE – Usina Termelétrica; UTN – Usina Termonuclear.

Os gráficos 2.4, 2.5 e 2.6, comprovam que a energia eólica ainda está sendo pouco utilizada na diversificação da matriz energética brasileira, aparecendo com uma geração de 10,64 %, contudo, vale ressaltar que de acordo com os gráficos a produção de energia eólica no Brasil pode ser alavancada através os empreendimentos que estão em fase de construção e os empreendimentos que ainda não começaram a ser construídos.

2.2.2 Panorama da Energia Eólica no Nordeste no Rio Grande do Norte

O Nordeste brasileiro possui destaque na geração de energia eólica, vem adquirindo visibilidade técnica e atraindo investidores do setor de produção de energia eólica, esse crescimento se dá em função da sua localização geográfica, onde possibilita uma frequência constante da velocidade dos ventos (SILVA, 2020).

De acordo com o levantamento realizado por meio do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro em 2001, o Brasil possuía naquele ano uma potência de 143 GW somente de incluindo a geração de energia através de parques *onshore*, com turbinas de pequeno porte e torres de até 50 metros do solo (MOREIRA, 2014). O Rio Grande do Norte, hoje é pioneiro na geração de energia eólica através de parques *onshore*. O estado passou a diversificar sua matriz energética e utilizar seu atlas em 2003, através da Cosern – (Companhia Energética do Rio Grande do Norte), na qual ficou responsável pela realização de pesquisas (PINTO, 2013).

A primeira instalação de parque eólico no território norte-rio-grandense ocorreu na cidade de Macau em 2004, a Petrobrás ficou responsável pela execução da obra que possuía a finalidade de gerar energia para a própria empresa. O empreendimento progrediu no estado em 2009, onde ocorreu a realizações de leilões na qual implantaram 32 parques em solo potiguar (PINTO, 2017).

Segundo dados publicados pela ANEEL, o estado do Rio Grande do Norte possui 313 empreendimentos em operação, apresentando uma potência instalada de 10.349.736 kW, o estado é o maior produtor de energia eólica do Brasil (ANEEL, 2021).

2.2.3 O Aerogerador, Seus Principais Componentes e Princípio de Conversão de Energia

Os aerogeradores são utilizados para produzir energia por meio da energia cinética dos ventos que, movimentam as turbinas, produzindo uma energia mecânica, transportando até o aerogerador que possui a função de transformar energia mecânica em elétrica.

O aerogerador é composto por diversos componentes importantes, como: Torre, nacele, caixa de engrenagens, o cubo, a pá e o aerogerador (PINTO, 2013).

1. Torre: Consistem em uma estrutura de sustentação, onde existe dois tipos, tubulares cônicas que são construídas a partir do aço ou concreto e as treliçadas fabricas com aço.
2. Torres treliçadas: Esses equipamentos foram utilizados no período em que a energia eólica despontou no mundo, eram usadas em turbinas de pequeno porte. As turbinas operantes atualmente possuindo maiores dimensões, com isso, as turbinas de treliças foram perdendo seu espaço e dando lugar as torres de aço, contudo, possuem uma vantagem em relação ao menor custo em relação a quantidade de material para a sua fabricação.
3. Torre de concreto: Foram bastante utilizadas na Dinamarca, porém, na atualidade vem perdendo espaço e sendo substituídas por torres tubulares de aço, possui uma construção prolongada, podendo ser mais ágil através da utilização de partes pré-fabricadas.
4. Nacele: Compõe a estrutura que é montada na parte superior da torre, onde fica localizado o aerogerador e a caixa de acoplamento. O tamanho da nacele é diretamente proporcional a utilização ou não utilização de caixas de engrenagens e a composição de seus componentes. A nacele possui em seu interior um sistema composto por um motor que, é encarregado por situar a turbina na direção do vento, esse direcionamento, deve ocorrer de forma gradual, para evitar turbulências na própria turbina. No interior da nacele, encontra-se os medidores de velocidade do vento, denominados anemômetros, e da sua direção, também conhecida por *Wind Vane*, que possui como função a transmissão dos dados obtidos para o sistema de

controle montado na base da torre, esses dados, são coletados com a finalidade de inspecionar o desempenho do aerogerador.

5. Caixa de engrenagens: Situada no interior da nacela, sua finalidade é realizar uma concordância entre a velocidade baixa da turbina e a velocidade alta do gerador. Alguns aerogeradores denominados de sofisticados não possuem caixa de transmissão, outros modelos são fabricados com este multiplicados.
6. Aerogerador com multiplicador: Quando se fez o uso do multiplicador, a nacela precisa ser maior, pois, a caixa de embreagens é formada por mancais e um eixo de transmissão e acoplamento. O multiplicador possui alto índice de ruídos e necessita de manutenção em suas engrenagens, tornando-o desvantajoso.
7. Aerogerador sem multiplicador: São geradores com maiores dimensões, possuindo rotação baixa, acoplados a turbina. Uma das suas desvantagens está relacionada ao transporte, já que se trata de um equipamento extenso, porém, uma das vantagens que pode ser elencadas é, a viabilidade econômica devido seu baixo custo com manutenção, operação e redução significativa de peças.
8. O cubo: Estrutura em que as pás estão posicionadas, fabricadas de aço ou ligas metálicas que contenha alta resistência.
9. A pá: As pás são estruturas que produzem um movimento rotacional gerado por meio do vento. São fabricadas de fibra de vidro e possuem um reforço em epóxi ou madeira.
10. O gerador: É o equipamento responsável pela transformação da energia cinética em energia elétrica.

A Figura 2.3 ilustra as partes constituintes existentes em um aerogerador.

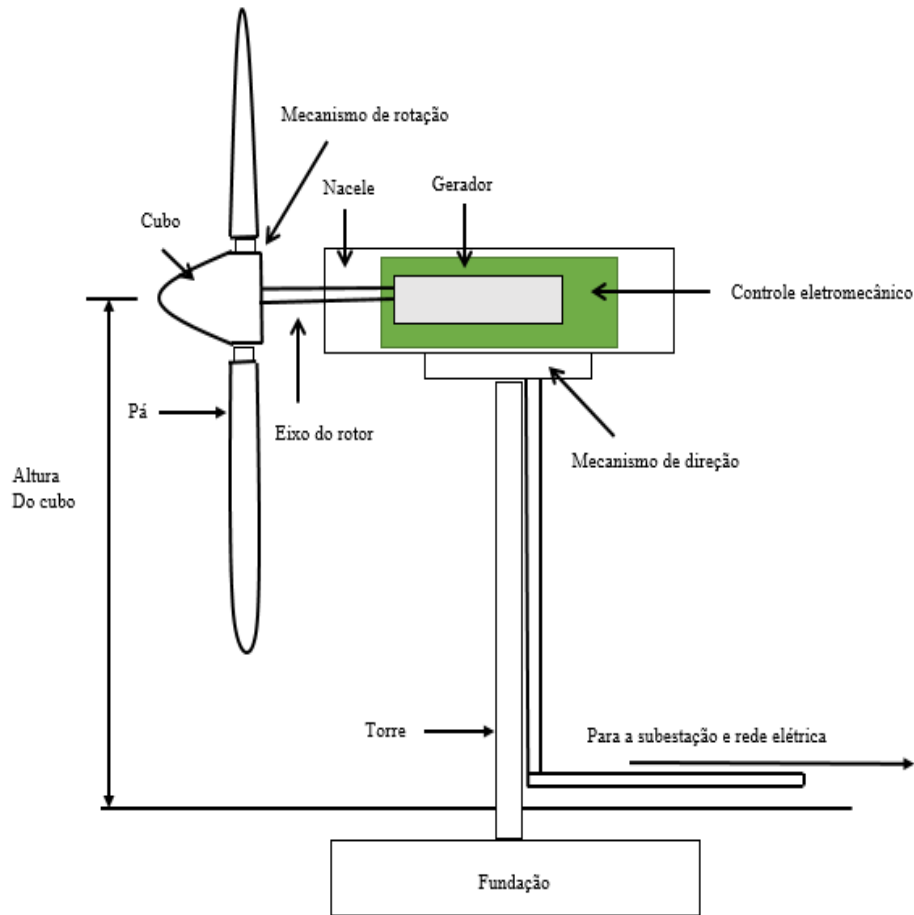


Figura 2.3 - Principais partes de um aerogerador

Fonte: PINTO, 2013

As turbinas ou aerogeradores, são máquinas utilizadas para converter energia cinética dos ventos em energia elétrica. Essa convenção possui duas etapas, a primeira a turbina capta a energia cinética existente para converter em energia mecânica e, a segunda etapa, o gerador recebe a energia mecânica e transforma em energia elétrica que, por conseguinte é transmitida para a rede e posteriormente chegará até o consumidor. Esse processo, deve seguir os princípios atestados por meio da Figura 2.4 (PINTO,2013).

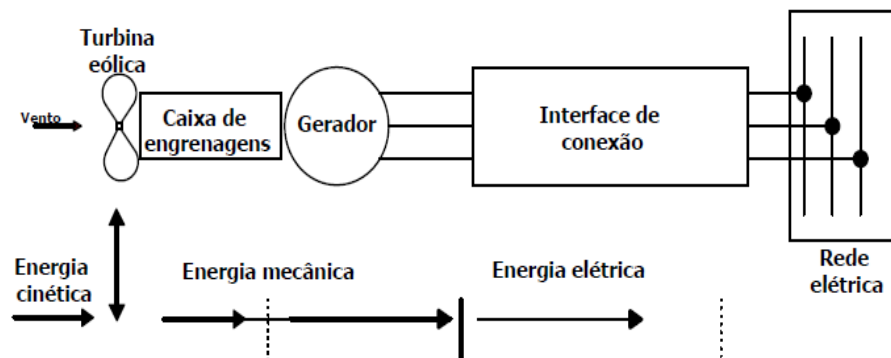


Figura 2.4 - Princípio de conversão de energia cinética do vento em energia elétrica

Fonte: Adaptada de PINTO, 2013

As turbinas eólicas possuem duas classificações: De acordo com as Figuras 2.5 e 2.6:

- 1) Turbina de eixo horizontal
- 2) Turbina de eixo vertical



Figura 2.5 - Turbinas eólicas de eixo horizontal

Fonte: EL- SHARKAWI, 2015



Figura 2.6 - Turbinas eólicas de eixo vertical

Fonte: EL- SHARKAWI, 2015

Os dois modelos possuem suas devidas peculiaridades, contudo, a turbina de eixo horizontal é mais comumente utilizada, possui a capacidade de captar ventos de quaisquer direcionamentos.

2.2.4 Curvas de Potência e Potência Extraída do Aerogerador

A curva de potência pode ser definida como a relação entre a potência removida pelo vento e a potência disponibilizada pelo vento é denotada C_p , ou seja, coeficiente de potência (PINTO, 2013).

$$C_p = \frac{P_{ext}}{\left(\frac{1}{2}\right) \rho A v^3} \quad (2.1)$$

Na Figura 2.7 é demonstrada a concordância de uma turbina eólica com a velocidade do vento. É notório que não ocorre geração de energia abaixo da velocidade da turbina. Para velocidades do vento entre a velocidade nominal e a velocidade de corte, a saída será a própria

potência nominal do gerador, com isso, a curva de potência de uma turbina eólica possuirá três velocidades básicas (PINTO, 2013):

A) Velocidade de partida: Melhor velocidade do vento em que a máquina gera potência útil.

B) Velocidade nominal do vento: Velocidade onde a potência nominal é obtida

C) Velocidade de corte: Maior velocidade do vento permitida, na qual é concedida a entrega de potência. Limitada pelo design da engenharia e por restrições de segurança.

Quando se atinge uma velocidade superior a velocidade de corte, a turbina é desligada, em casos de fortes ventos, para que a turbina não corra riscos de sofrer com avarias.

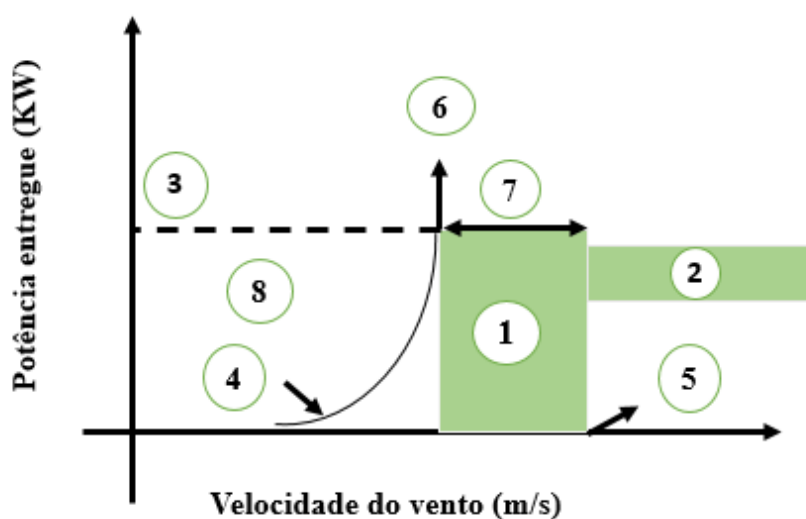


Figura 2.7 - Curva de potência de uma turbina eólica

Fonte: Adaptado de PINTO, 2013

De acordo com a Figura 2.7, tem-se:

- 1) Velocidade nominal
- 2) Ventos de alta velocidade
- 3) Potência nominal
- 4) Velocidade de partida
- 5) Velocidade de corte
- 6) Transição
- 7) Controle de potência nominal
- 8) Aumento de potência com o cubo da velocidade

As curvas de potência dos aerogeradores são arranjadas pelos seus devidos fabricantes, através de testes de campos, utilizando métodos de testes, de acordo com a Figura 2.8.

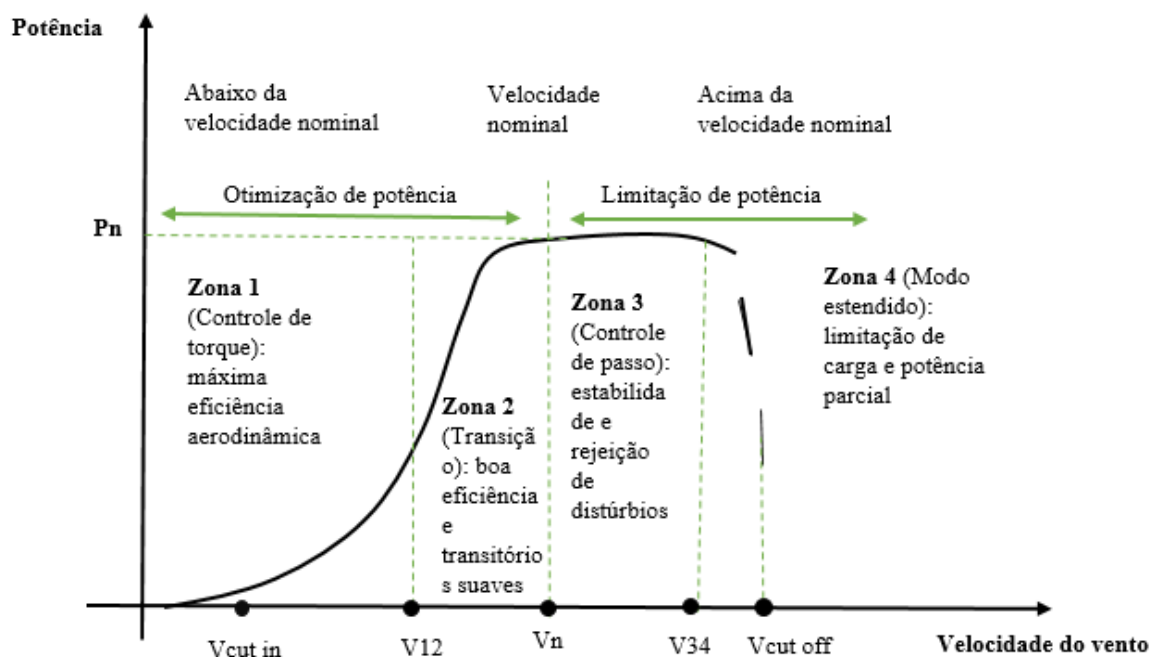


Figura 2.8 - Zonas de curva de potência de uma turbina eólica

Fonte: Adaptada de PINTO, 2013

Percebe-se, que na Figura 2.8, existe quatro zonas de curva de potência diferentes. Apresentando algumas características que serão descritas a seguir:

- **Zona 1 – Controle de Torque:** Acontece quando se tem ventos com velocidades baixas. Sua função é adquirir mais eficiência aerodinâmica. Isso é realizado ao manipular o torque elétrico, a fim de se obter uma taxa entre a velocidade e a pá e a velocidade do rotor máxima. Desse modo, atinge-se o máximo coeficiente de potência C_p .
- **Zona 2 – Transição:** Essa zona não possibilita alcançar a razão da velocidade de ponta desejada, pois a velocidade do rotor está aproximada do valor máximo.
- **Zona 3 – Controle de Passo:** Ventos com altas velocidades, as pás mudam de ângulo de passo β , com o intuito de reduzir a absorção de potência, controlar a velocidade e minimizar suas cargas, paralelamente.
- **Zona 4 – Modo Estendido:** Ventos com valores elevados. Limita-se a velocidade do rotor, e as cargas externas são reduzidas.

Para Pinto (2013), quando a pá de uma turbina rotaciona, a velocidade na extremidade da pá é maior do que a velocidade no meio da pá. A eficiência de um rotor é relacionada à taxa na qual o rotor gira. Se o rotor gira em uma velocidade retardada a eficiência é reduzida, pois, boa parte do vento passará espaço entre as pás do rotor, ocasionado uma não utilização deste vento. Se o rotor estiver rotacionando veloz demais, ocorrerá uma diminuição da eficiência, já

que a área coberta pelas pás funcionará como empecilho contra o vento. Com isso, um bom caminho para demonstrar a eficiência de um rotor é expressar em função da sua razão de velocidade de ponta da pá e a velocidade de giro do rotor. Onde, essa relação é denotada como TSR (Tip-speed ratio, ou λ), disponível através da Equação 2.2.

$$\lambda = \frac{u}{v} \quad (2.2)$$

Onde v é a velocidade inercial do movimento e u é velocidade escalar na ponta da pá, calculada em metros por segundo. Sabendo que $u = \omega r$, tem-se:

$$\lambda = \frac{\omega r}{v} \quad (2.3)$$

Com isso, o coeficiente de potência, é subordinado a condição aerodinâmica das pás (TSR e ângulo de passo β), matematicamente pode ser apresentado, através de:

$$C_p(\lambda, \beta) \quad (2.4)$$

Deste modo, a potência elétrica gerada por meio de um aerogerador é dada por meio da Equação 2.5.

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2.5)$$

2.3 O Vento: Fatores que Influenciam a Estatística

O deslocamento das massas de ar na atmosfera é denominado “vento”, e sua geração é proveniente do aquecimento da terra, a rotação da terra e a influência de efeitos térmicos (MOREIRA 2014). O que ocasiona esse deslocamento ou movimento é a circulação das camadas de ar gerada pelo aquecimento desigual do planeta (PINTO, 2013).

O vento é um recurso natural e renovável, onde está sempre em movimento relativo em relação a superfície terrestre. Uma das suas principais peculiaridades é que o mesmo pode ser caracterizado como um fenômeno casual, podendo ser definido como uma variável

imprevisível, sua direção muda constantemente, portanto, denomina-se que, o vento é uma variável que não pode ser controlada (EL- SHARKAWI, 2015).

2.3.1 Forças Atuantes no Vento

O vento, pode ser considerado como uma parcela de ar, de acordo com essa classificação, denomina-se 3 fatores que descriminam a velocidade do vento: Força Gradiente de Pressão, força de Coriolis e a rugosidade do terreno, sendo o primeiro fator o de natureza mais estocástica, sendo o primeiro o componente mais estocástico componente da velocidade do vento.

Força Gradiente de Pressão: Provem da redondeza da Terra e seu alinhamento em relação ao sol. O Sol realiza o aquecimento da Terra com diferentes temperaturas. Duas áreas adjacentes com temperaturas variadas ocasionam uma diferença de pressão, formando o gradiente de pressão. O gradiente de pressão é responsável por realizar a flutuação do ar, saindo do lado que possui pressões elevadas para o lado que possui baixas pressões, esse fenômeno ocorre na tentativa de uniformizar as pressões. Quando se tem uma velocidade de vento elevada, maior será a força gradiente de pressão (Figura 2.9)

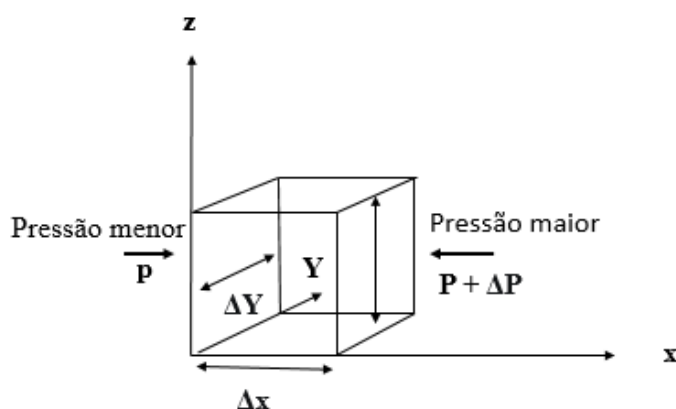


Figura 2.9 - Pressão Horizontal que atua em um pequeno elemento diferencial de um fluido

Fonte: Adaptada de PINTO, 2013

Força de Coriolis: Acontece por meio da rotação da Terra. O *Coriolis* é a deflexão do ar em movimento quando são vistos de um referencial rotativo, determinando a magnitude e direção do vento. A força de *Coriolis* é mais potente quando se aproxima da linha do equador.

Rugosidade: Está relacionado à condição da superfície onde estuda-se o comportamento do vento. Quando a superfície possui alta rugosidade, conseqüentemente, possui um alto atrito, diminuindo assim a velocidade dos ventos. Em superfícies de menor rugosidade, como a água, o atrito é reduzido, maximizando assim, a velocidade do vento em superfícies aquáticas. Analisando localidades como Florestas, cidades e construções prediais, percebe-se que a magnitude é reduzida consideravelmente. Com isso, percebe-se que, a elevação é um fator capital para a determinação da velocidade do vento. Com isso, percebe-se que é um fator essencial para a determinação da velocidade do vento. Para verificar a quantidade dessa influencia em um terreno se faz necessário a utilização de conhecimentos específicos de levantamento topográfico e parâmetros relacionados a meteorologia, demonstrados na equação 2.6.

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^\mu \quad (2.6)$$

Temos que:

μ : Coeficiente de atrito. É função do terreno e de sua topologia de área, seus valores variam de acordo com o terreno. Para terrenos abertos, tem-se $\mu = 0,143$, $\mu = 0,4$ para grandes cidades e $\mu = 0,1$ para águas calmas.

v : Velocidade do vento para uma altura h , calculada em (m/s):

v_0 : Velocidade do vento na altura conhecida, calculada em (m/s):

A magnitude dos ventos, pode ser explanada através dos valores da Escala de força do vento de Beaufort, desenvolvida pelo Irlandês Francis Beaufort no ano de 1805. Para que os aerogeradores mais modernos, devem utilizar escalas de 3 a 9 as quais são consideradas ideais. Quando o vento está abaixo de 3, considera-se que o vento não possui capacidade suficiente para gerar a rotação das turbinas. Acima de 9, considera-se um vento forte podendo ocasionar avarias nos aerogeradores. A escala será demonstrada através da tabela 2.1. (EL-SHARKAWI, 2015).

Escala de Beaufort		
Escala Beaufort	Velocidade dos ventos por períodos maiores que 10 minutos	Termo Geral
0	<1	Calmo
1	1-3	Vento leve
2	4-6	Brisa leve

3	7-10	Brisa moderada
4	11-16	Brisa fresca
5	17-21	Brisa forte
6	22-27	Ventania moderada
7	28-29	Ventania fresca
8	30-33	Ventania forte
9	34-40	Gale total
10	41-47	Tempestade
11	48-55	Furação
12 - 17	56-120	

Tabela 2.1 - Escala de Beaufort para magnitude dos ventos

Fonte: EL- SHARKAWI, 2015

2.3.2 Estatísticas dos Ventos

A prospecção é constituída por meio de levantamentos de áreas e dados do vento, é realizada através de atividades computacionais e ferramentas GIS. A prospecção é uma atividade que propõe atividades de campo com equipe multidisciplinar no apoio referente a escolha da área do projeto eólico e escolha dos pontos de medição do recurso eólico. A etapa seguinte, consiste na elaboração do projeto básico e executivo, que subsidiarão a fase de construção. Essa etapa é objeto de mitigação de riscos de negócio para o proprietário do empreendimento, além de fundamentar o planejamento de investimentos e amortização financeira (OLIVEIRA; ARAÚJO, 2015).

Para realizar uma análise de qualidade em relação ao potencial eólico, é necessário realizar medições precisas da velocidade dos ventos. Essa análise, servirá para garantir que a energia produzida no parque eólico tenha a menor margem de erro possível prevista na prospecção. Isso é de extrema importância, para que se obtenha êxito do processo de financiamento dos parques eólicos (OLIVEIRA; ARAÚJO, 2015).

Diante dessa narrativa, é possível perceber que o vento é um dado variável e, que exige avaliações bem elaboradas. Sabendo da relação da frequência dos ventos, é possível avaliar o potencial de um empreendimento eólico. Para analisar esse tipo de dados, pode-se trabalhar com a variável discreta, descrita por meio do Gráfico 2.7.

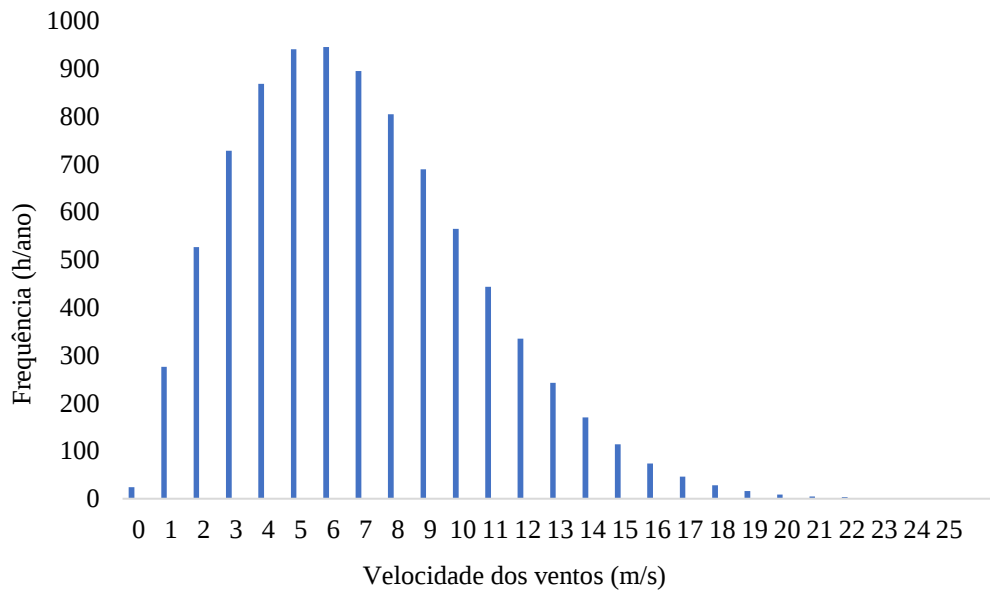


Gráfico 2.7 – Frequência de distribuição em horas por ano de vento

Fonte: Adaptado de MASTERS, 2004

Os dados do Gráfico 2.7 são denominados dados brutos, sua análise não é considerada simples, devido suas medições conterem tamanhos elevados, difíceis de gerir, gerando uma maior dificuldade na coleta de informações específicas. Os dados podem ser escassos em alguns intervalos do gráfico. Para solucionar esses problemas, existem funções matemáticas que representam características dos dados coletados e poder ser usadas substituindo as informações brutas. Essas funções, são denominadas como funções de densidade e probabilidade $f(v)$ (EL-SHARKAWI, 2015).

De acordo com o que foi visto no Gráfico 2.7, as funções eram discretas, agora serão apresentadas na forma de função contínua, denotada de função densidade e probabilidade, onde suas principais características serão demonstradas através do Gráfico 2.8, onde a área total contida por ela é igual a unidade (MASTERS, 2004).

Pode-se demonstrar a distribuição da velocidade do vento, descrita no Gráfico 2.8, através da função matemática de densidade de probabilidade $f(v)$, demonstrada a seguir:

$F(v)$ = Função densidade probabilidade

Probabilidade

$$(v_1 \leq v \leq v_2) = \int_{v_1}^{v_2} f(v)$$

Probabilidade

$$(v_1 \leq v \leq \infty) = \int_{v_1}^{\infty} f(v) dv = 1 \quad (2.7)$$

Para demonstrar a probabilidade e as características do vento em um dado local, a função mais adequada é a função de distribuição de Weibull (Figura 2.10).

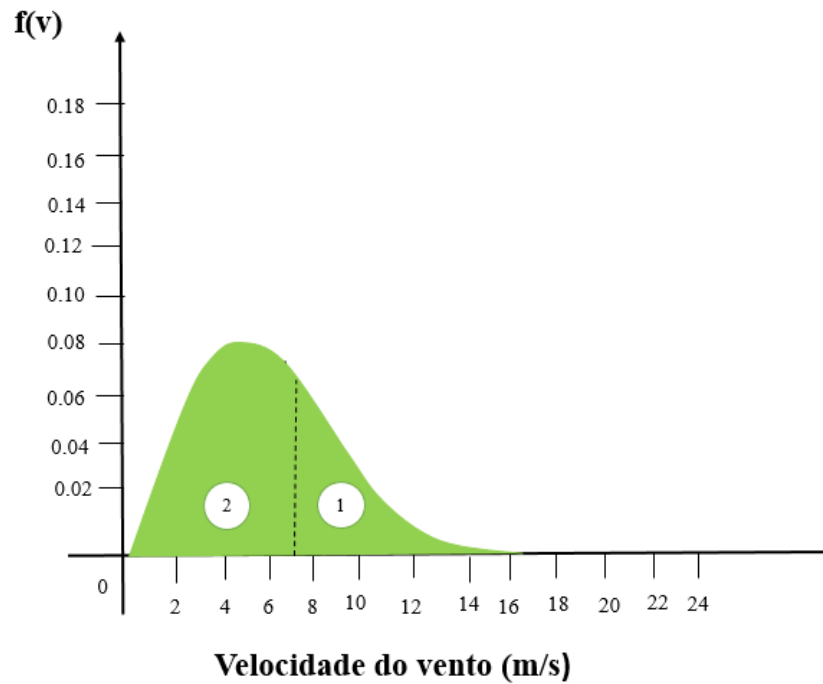


Gráfico 2.10 - Função Densidade Probabilidade dos ventos

Fonte: Adaptado de PINTO, 2013

Onde: Em 1 tem-se a velocidade média e em 2 a área correspondente a 1.

O setor eólico necessita constantemente compreender os fatores que cercam o vento e suas variações, para que seja possível aprimorar sua funcionabilidade. A função de Weibull é utilizada para descrever a variação da velocidade do vento. Onde a função de densidade e probabilidade descrita por $f(v)$, demonstra a probabilidade de ocorrer ao decorrer de todo o ano uma determinada velocidade do vento v . Essa função é descrita a seguir:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp^{-(v/c)^k} \quad (2.8)$$

De modo que:

v : é a velocidade do vento, medida em (m/s);

k : é um fator de escala adimensional;

c : é o fator de forma (m/s), onde pode-se mudar o formato da função.

Os parâmetros relacionados a função de Weibull, podem ser notados através do Gráfico 2.9.

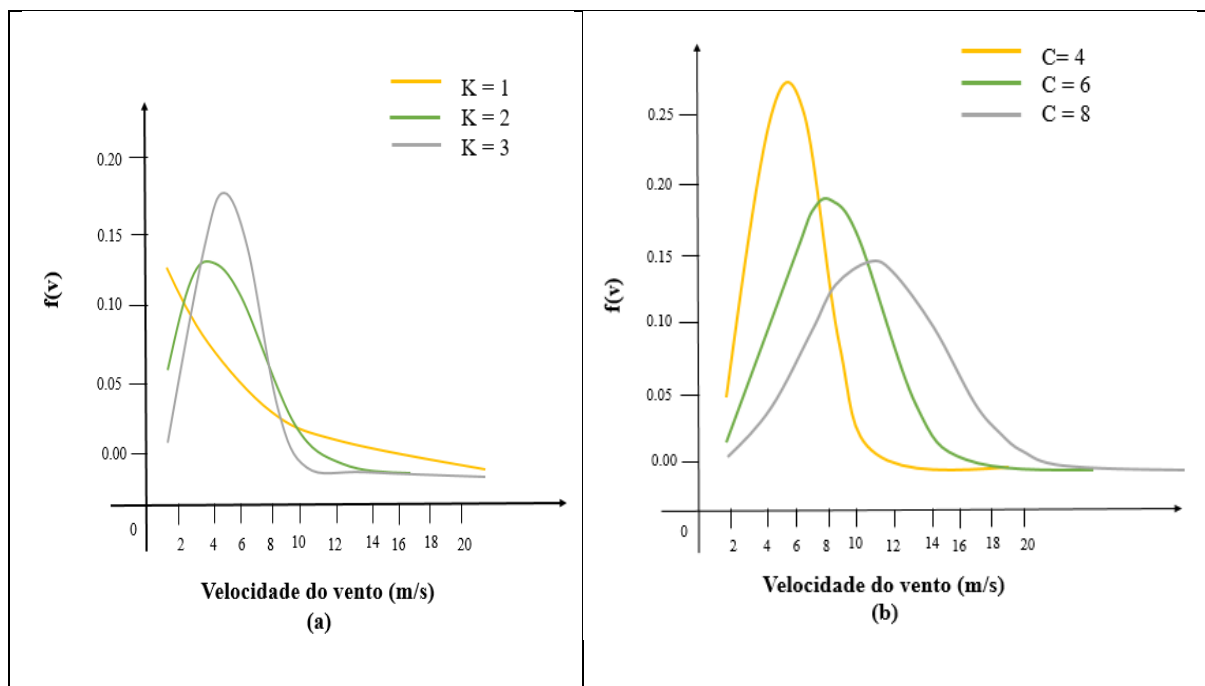


Gráfico 2.9 - (a) representa a função densidade probabilidade de Weibull com parâmetros de forma $k = 1, 2$ e 3 , e parâmetro de escala fixo de $c = 6$. (b) densidade probabilidade de Weibull com parâmetros escala $c = 4, 6$ e 8 (com parâmetro de forma fixo em $k = 3$)

Fonte: Adaptado de MASTERS, 2004

No Gráfico 2.9 com o fator de forma $k = 1$ a função denota-se uma curva similar com função exponencial com decaimento, elevando a probabilidade de não ser uma região adequada para instalações de torres eólicas, pois o vento se encontra com velocidades baixas. Quando $k = 2$, o vento está mais constante, contudo, existe períodos em que o vento está mais firme em relação aos ventos situados próximos ao pico da função. Para $k = 3$, a função é similar ao formato de um sino, a região localizada próxima a curva seria onde parte dos ventos sopram, moderadamente constante igual aos ventos alísios, ou seja, ventos que sopram durante o ano todo. Portanto, conclui-se que, o parâmetro $k = 2$ é o mais viável dentre os três, pois, é a curva mais clara para a provável área de ação de uma turbina, onde tem-se ventos fortes e períodos de ventos baixos (PINTO, 2013).

Quando o valor de k é igual a 2, a distribuição de Weibull é denominada função de distribuição de Rayleigh. A função de Rayleigh possui apenas dois parâmetros,

consequentemente é uma função mais simplificada e menos precisa em relação a função de Weibull, é utilizada especificamente quando se conhece poucos parâmetros em relação ao regime do vento e em estudos preliminares. Portanto, quando $k = 2$, tem a seguinte função matemática:

$$f(v) = \frac{2v}{c^2} \exp \left[-\left(\frac{v}{c}\right)^2 \right] \quad (2.9)$$

2.4 Energia Eólica *Offshore*

Este tópico irá abordar aspectos relacionados a energia eólica *offshore*, como suas peculiaridades, infraestrutura, desafios e potencial eólico *offshore* instalados no mundo.

Para Pinto (2013), a energia eólica *offshore* refere-se a energia elétrica produzida por meio de instalações de turbinas eólicas em superfície aquáticas como, mares, oceanos e lagos. As primeiras turbinas eólicas *offshore* foram estaladas após cerca de uma década das instalações de turbinas *onshore*. Segundo relatos históricos, as primeiras turbinas desenvolvidas para instalações em alto mar, foram estaladas em território alemão, através de Herman Honnef nos anos de 1930.

2.4.1 Histórico da Energia Eólica *Offshore*

Em 1991 foi instalado o primeiro parque eólico *offshore* do mundo, o parque foi instalado na Dinamarca e possuía o nome de Vindeby *Offshore* Wind Park, objetivava-se provar a probabilidade de geração de energia através da fonte *offshore*, o empreendimento manteve-se em operação durante cinco anos, e conseguiu credibilidade para demonstrar a sua viabilidade e ainda conseguiu decolar o setor, fazendo com que projetos semelhantes fossem implementados (VAICBERG *et al.*, 2021).

Segundo Pinto (2013), no ano de 2016, o parque Black Island deu início a suas atividades nos Estados Unidos, foi o primeiro parque eólico *offshore* do mundo a entrar em operação, era formado com 5 turbinas de 6 MW (modelo Haliade 150), que era fabricada pelas Alstom. O projeto era avaliado em mais ou menos \$ 300 milhões, sua projeção foi realizada pela DeelWater Wind e produzia uma potência suficiente para abastecer 17 mil residências.

A energia eólica *offshore* vem obtendo um espaço cada vez maior no mercado, no ano de 2020 o setor conseguiu o seu melhor ano, obtendo uma instalação de mais de 6 GW de nova capacidade. Esse crescimento foi possível através de ajuda generosa da China, o país foi líder no quesito de instalações, instalou mais de 3 GW através de novos empreendimentos. O continente Europeu seguiu e impulsionou o setor e por meio de países como Holanda e Bélgica, que instalaram 1,5 GW e 706 MW de potência, respectivamente (GWEC, 2021).

O Brasil ainda não possui nenhuma instalação de parque eólico *offshore*. A Petrobras chegou a anunciar a instalação de um projeto piloto para 2022 no estado do Rio Grande do norte. Além deste projeto piloto, onde ficará localizado na costa marítima da cidade de Guamaré, existe mais dois projetos para empreendimento da energia eólica *offshore* que, ficaram localizados no estado do Ceará, porém, ainda estão em fase de licenciamento (SILVA, 2019).

2.4.2 Peculiaridades da Geração de Energia Eólica *Offshore*

Em empreendimentos do tipo *offshore* os custos são mais elevados em relação ao *onshore*. Esse crescimento é ocasionado por causa dos maiores custos na infraestrutura das turbinas, fundações das torres e cabos de transmissões. As turbinas eólicas *offshore* possuem uma maior geração de energia por hora em relação as turbinas *onshore*, isso ocorre porque as dimensões de suas pás são maiores e são instaladas em localidades onde existe uma maior velocidade dos ventos. O tipo de fundação utilizada nesse tipo de empreendimento, deve-se levar em consideração a profundidade em que a torre será instalada. Atualmente, existem seis tipos de fundações para parques eólicos *offshore*: Monipolar ou monoestaca, gravitacional, tripé, tripod, jacket e flutuante ancorados.

Para os chamados parques eólicos *offshore* (marítimos), haja vista que ela permite o aproveitamento das fortes rajadas de vento existentes nas áreas dominadas pelo oceano. Para a utilização das correntes eólicas marítimas, é recomendada a implantação de aerogeradores de grande porte, capazes de suportar a força eólica constante e, assim, gerar mais energia elétrica. Com a instalação de uma estrutura adequada e resistente a grandes cargas, é possível que a produção de eletricidade a partir da força dos ventos seja realizada de forma eficaz e segura (NASCIMENTO, 2018).

A Figura 2.11, demonstra os principais tipos de fundações utilizadas no setor eólico *offshore*.

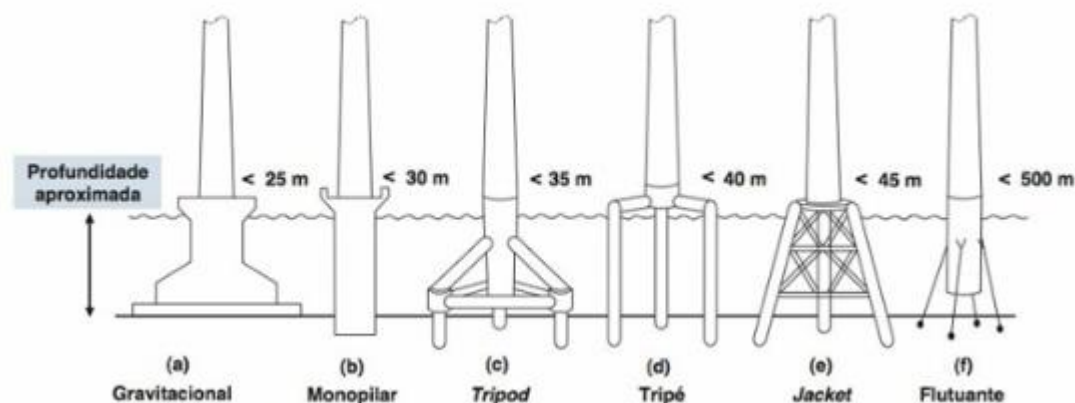


Figura 2. 11 - Tipos de fundações para parques eólicos *offshore*

Fonte: PINTO, 2013

A fundação monopolar é a mais usual, constituída de tubos de aço que variam de 2,5 a 4,5 m de diâmetro, são utilizadas para profundidades de até 30 m e seu uso depende do tipo de solo em que será instalado no fundo das águas.

De acordo com o relatório divulgado pela (EPE, 2019), para atender demandas relacionadas a águas com maiores profundidades e turbinas com maiores dimensões, as fundações dos empreendimentos eólicos *offshore* estão em constante evolução para que seja possível atender as suas devidas demandas e reduzir os custos, por meio de alguns artifícios listados a seguir, como:

- Adotando geometrias mais eficientes, e que buscam minimizar materiais e simplificar a fabricação;
- Otimizando as operações de instalação, diminuindo o tempo e/ou reduzindo as dependências de embarcações mais caras; e
- Com o amadurecimento da cadeia de suprimentos, incorporando equipamentos e processos mais eficientes.

2.4.3 Potência Global Instalada

O ano de 2020 foi promissor no setor de energia eólica *offshore*, através do setor, foi capaz produzir 6,1 GW de potência, foi o segundo melhor ano para o setor. A China foi o responsável por metade das instalações globais no setor em questão. A Europa também conseguiu destaque, a Holanda liderou as instalações, em seguida veio a Bélgica e Reino Unido,

Alemanha e Portugal. Os Estados Unidos e a Coreia do Sul foram os responsáveis pelo restante das instalações eólica *offshore* em 2020. A capacidade total instalada de energia eólica *offshore* ultrapassou 35 GW no referido ano (GWEC, 2021).

Espera-se que a capacidade de energia eólica *offshore* a ser adicionada nos próximos cinco anos seja de quase 94 GW de novas instalações até 2025. O CAGR para os ventos do setor eólico *offshore* para os próximos cinco anos é de aproximadamente 31,50%. A tendência é que o número anual de instalações possa quadruplicar, sendo de 6,1 GW em 2020 e chegar a 21% em 2025. No total, espera-se que o setor eólico *offshore* adicione uma capacidade de mais de 70 GW de potência global entre os anos de 2021 e 2025. Para o ano de 2021 o Gráfico 2.10 explana dados referentes as novas instalações *onshore* e *offshore* (GWEC, 2021).

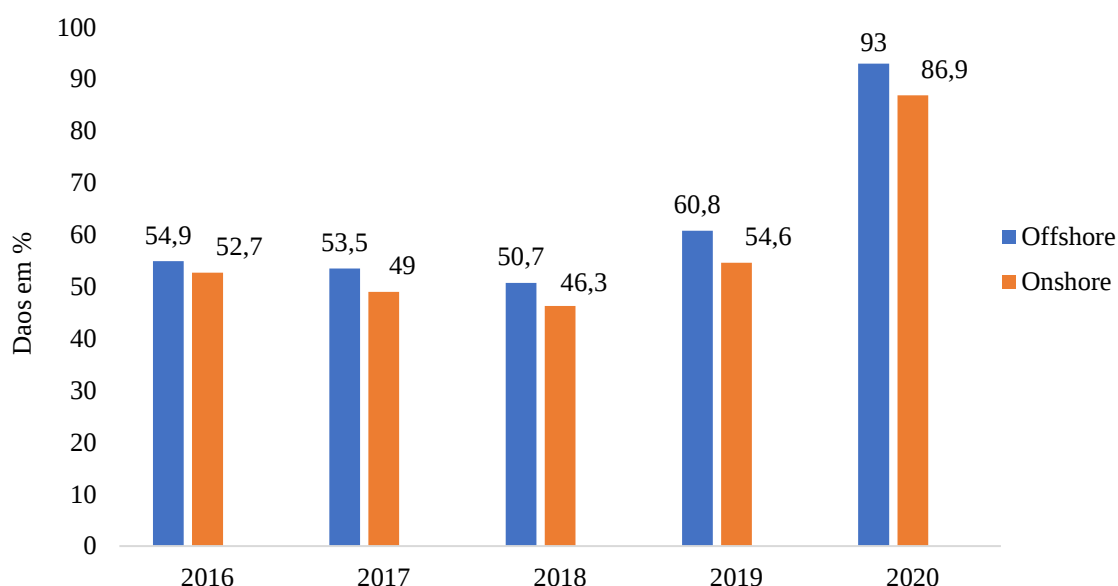


Gráfico 2. 10 – Novas instalações *Onshore* e *Offshore*

Fonte: Adaptado de GWEC, 2021

Através do Gráfico 2.10, é possível notar um crescimento exponencial da energia eólica *offshore* entre os anos de 2016 e 2020.

Em 2020, o continente Europeu aumentou sua capacidade eólica e instalou 14,7 GW de potência que, em sua maioria foram instalações *onshore*, porém, houve um decréscimo de 6% no mesmo setor em relação ao ano anterior. As novas instalações de empreendimentos eólicos *offshore* representaram 20% das novas instalações realizadas em toda Europa, acumulando uma nova capacidade de 2,9 GW. A Holanda foi o país que mais realizou

instalações no setor marítimo em 2020, sendo 75% de suas novas instalações em alto mar (WINDEUROPE, 2020).

O Gráfico 2.11 demonstra as novas instalações eólicas *onshore* e *offshore* na Europa durante o período de 2011 a 2020, enquanto o Gráfico 2.12 mostra as novas instalações por países apenas no ano de 2020. Onde é possível, visualizar um destaque acentuado para países como, Holanda, Alemanha, Bélgica e Reino Unido.

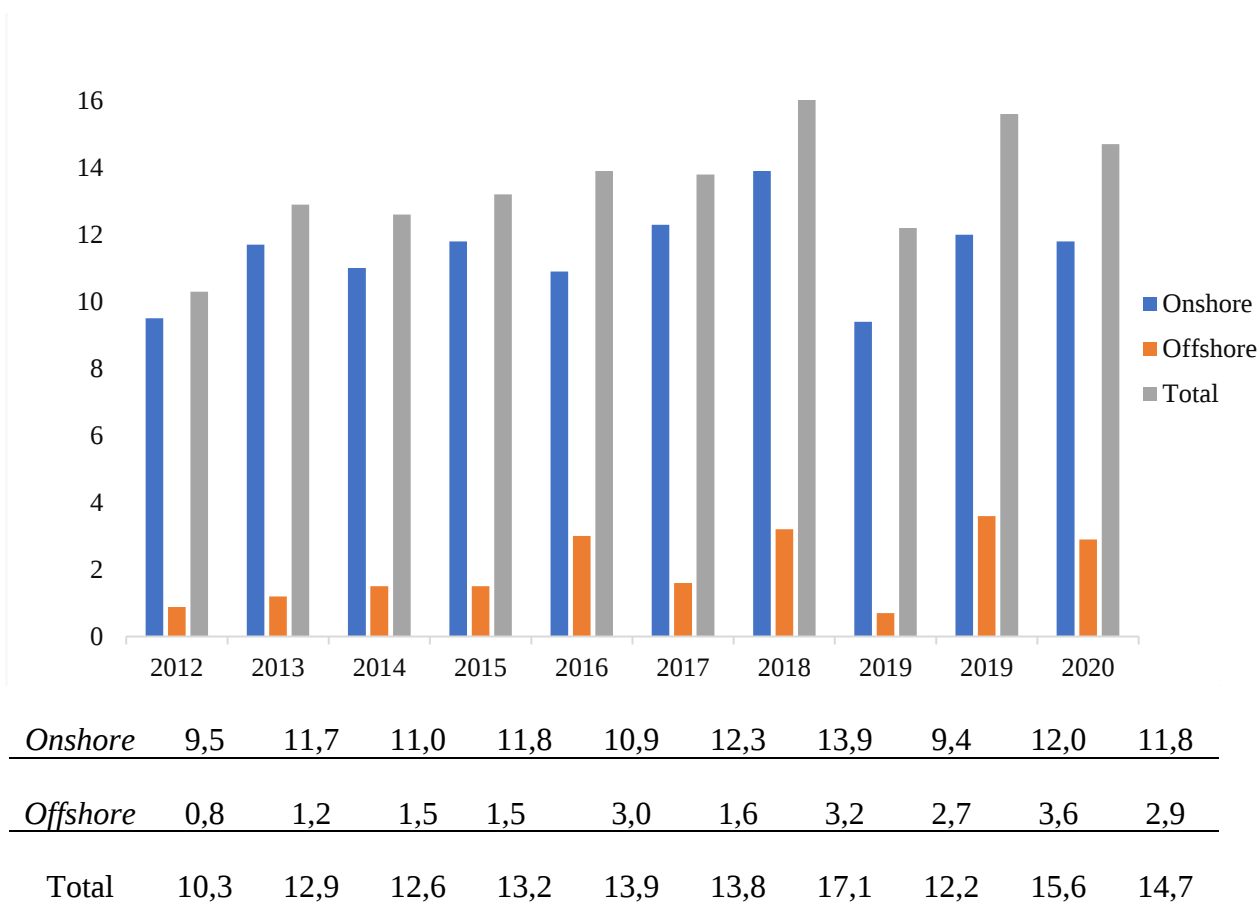
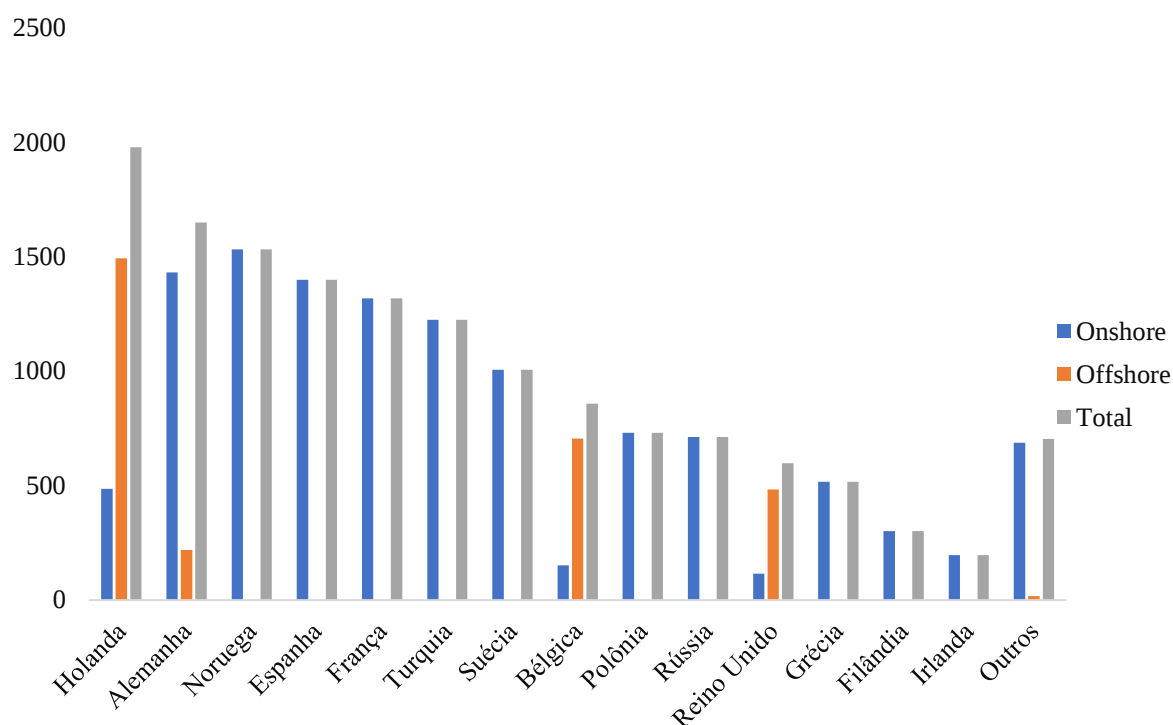


Gráfico 2.11- Novas instalações eólicas *onshore* e *offshore* na Europa

Fonte: Adaptado de WINDEUROPE, 2020



<i>Onshore</i>	486	1.431	1.531	1.400	1.318	1.224	1.007	152	731	713	115	517	302	196	688
<i>Offshore</i>	1.493	-	-	-	-	-	706	-	-	483	-	-	-	17	
Total	1.979	1.650	1.531	1.400	1.318	1.224	1.007	858	731	713	598	517	302	196	705

Gráfico 2.12 – Novas instalações eólicas *onshore* e *offshore* na Europa por País

Fonte: Adaptado de WINDEUROPE, 2020

De acordo com a WINDEUROPE (2020), a Europa detém 220 GW de capacidade de energia eólica instalada, sendo 11% dessa potência é proveniente da fonte *offshore*. A UE-27 (União Europeia 27) possui 58% de toda capacidade eólica *offshore* instalada no continente europeu. O ano de 2021 será promissor para a energia eólica instalada em alto mar, de acordo com pesquisas, 3,7 GW das instalações marítimas da Europa devem ocorrer no Reino Unido produzindo 2 GW, seguido de Holanda, Dinamarca e França.

De acordo com nosso cenário de expectativas realistas, entre 2021 e 2025, a Europa instalará 29 GW de energia eólica *offshore*. Com uma média de 6 GW/ano, a energia eólica *offshore* representará cerca de 28% do mercado total no período de cinco anos (em comparação com uma participação de 20% do período de 2019-2023). As instalações estão concentradas principalmente no Reino Unido, com 15 GW ou 50% de toda capacidade conectada à rede. Cinco outros países também verão grandes instalações *offshore*, nomeadamente Holanda (4,4 GW), Alemanha (3 GW), França (3 GW), Dinamarca (1,9 GW), Polónia (0,7 GW). Noruega, Bélgica, Itália, Espanha

e Suécia verão mais de 100 MW de instalações *offshore* concluídas nos próximos cinco anos. A Irlanda terá um pequeno projeto entrando em operação em 2023 (WINDEUROPE, 2020).

O maior parque eólico *offshore* do mundo fica localizado no mar do Norte, no Reino Unido, deu início a suas atividades em 2013 e é denominado *London Array*, possui 175 turbinas eólicas do tipo Siemens DE 3,6 MW, instaladas a 20 km da costa, com uma profundidade de 25 m, gerando 630 MW. (LONDON ARRAY, 2021).

As turbinas instaladas nos parques europeus variam de acordo com cada país. No ano de 2020, a capacidade média nominal dos empreendimentos eólicos *offshore* era de 8,2 MW, superando as turbinas instaladas em 2019 que continha 7,2 MW. Bélgica e Holanda dispuseram da maior potência média classificada, atingindo 8,7 MW. Se tratando de média, o setor *offshore* atingiu 10,4 MW em 2020 (WINDEUROPE, 2020).

2.4.4 Energia Eólica *Offshore* no Brasil

De acordo com dados coletados por meio de satélite, entre 1999 e 2009 Ortiz e Kampel (2011), estimaram o potencial de geração de energia eólica *offshore* brasileiro. O Brasil possui bons ventos, e sua média de magnitude para ventos *offshore* demonstra uma variação entre 7 e 12 m/s, sendo os valores mínimos aproximado à costa do estado de São Paulo e os valores máximos aproximados à costa marítima de Sergipe e Alagoas. Ainda de acordo com o estudo, três localidades possuem alta magnitude de vento, com um alto potencial de exploração para a geração de energia eólica *offshore*, são eles: As margens de Sergipe e Alagoas, Rio Grande do Norte e Ceará, Rio Grande do Sul e Santa Catarina. A tabela 2.2, serão demonstrados valores do potencial eólico avaliado pelo estudo.

Por meio de estudos realizados em 2008, foi possível quantificar o potencial eólico *offshore* do Brasil (Tabela 2.2). O mesmo estudo, comprovou que em profundidades de 0 à 100 m, as regiões Sul-Sudeste do Brasil possuem um potencial de aproximadamente 215 GW. Esse resultado, demonstra que existe um enorme potencial energético no campo de ventos *offshore* na costa do país (ORTIZ, 2011).

DISTÂNCIA DA COSTA (km)	POTENCIAL (GW)
0 a 10 km	57 GW
0 a 50 km	259 GW
0 a 100 km	514 GW
0 a 200 M ZEE	1.780 GW
Intervalo batimétrico	
0 a 20 m	176 GW
0 a 50 m	399 GW
0 a 100 m	606 GW

Tabela 2. 2 - Potencial de geração de energia eólica em diferentes regiões da margem brasileira

Fonte: Adaptado de ORTIZ, 2011

Ainda de acordo com (Ortiz, 2011), o estudo foi efetivado, utilizando turbinas AREVA Wind M5000 de 5 MW (Tabela 2.3). Os valores encontrados por meio do satélite são referentes a uma altitude de 10 metros acima do nível do mar. Contudo, é válido que, para estudos relacionados a energia eólica, é considerável que os dados referentes a altitude sejam aproximados ao eixo do rotor da turbina que possui uma altura aproximada de 80 m (Tabela 2.3).

Potência nominal	5 MW
Velocidade mínima	4 ms ⁻¹
Velocidade máxima	25 ms ⁻¹
Velocidade nominal	12,5 ms ⁻¹
Diâmetro do rotor	116 m
Área do rotor	10.568 m ²
Eficiência de conversão	39,55%

Tabela 2. 3 - Características técnicas da turbina eólica AREVA Wind M5000

Fonte: Adaptado de ORTIZ, 2011

Para PINTO (2017), o Brasil ainda não deu início as explorações do recurso eólico *offshore* disponível em seu território marítimo, pelo fato de que ainda não concluiu a exploração do potencial eólico *onshore* disponível. Outro ponto que se deve avaliar, é que para realizar instalações de turbinas eólicas *offshore* necessita-se de um maior investimento.

Em 2016, o parque eólico *offshore* Caucaia Parazinho em Ipanema, localizado no estado do Ceará, foi um dos primeiros a conseguir licenciamento através do governo Federal. O empreendimento terá a capacidade de produzir 310 MW, por meio da combinação de um parque *offshore* (228MW) composto de 48 aerogeradores de 6 MW cada e um parque semi-*offshore* de (22MW) composto por 11 aerogeradores de 2 GW, sendo associados a 11 espigões fixados na linha costa (VAICBERG *et al.*, 2021).

O IBAMA (Instituto Brasileiro de Meio Ambiente), é responsável por autorizar a construção de empreendimentos eólicos *offshore*. O litoral brasileiro possui em média 9.650 km e o país possui aproximadamente 3,6 milhões de km² em sua zona ZEE (zona de economia exclusiva) (PINTO, 2017).

3 MATERIAIS E METODOLOGIA

Este capítulo possui como foco a descrição dos métodos e materiais utilizados para a realização deste trabalho, como sua descrição e caracterização dos procedimentos realizados durante a pesquisa.

3.1 Materiais Utilizados

Este trabalho foi realizado através de uma pesquisa descritiva e exploratória. A pesquisa de caráter exploratório, está relacionada a busca e a descoberta de ideias, para que seja possível adquirir conhecimentos sobre o tema para que haja a criação de hipótese. Já a pesquisa descritiva, visou caracterizar o fenômeno estudado.

Desta forma, a etapa inicial da pesquisa foi realizada afim de ilustrar o crescimento da energia eólica globalmente. Demonstrando dados do seu potencial, como também a caracterização dos ventos na região pesquisada. Os procedimentos técnicos utilizados neste documento foram coletados através de referências bibliográficas encontradas em livros, artigos ou trabalhos com temática semelhante já publicadas anteriormente.

A fonte de dados escolhida para fundamentar este trabalho foi o Atlas do Potencia Eólico Brasileiro, na qual realizou um estudo em 2013 através de simuladores, de modo que, foi possível confeccionar mapas temáticos, com metodologia de cálculo através de interpolação dos dados referentes a velocidade para alturas que variam entre 30 a 200 metros de altura.

De acordo com o próprio Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, para a coleta de dados realizada por meio do novo Atlas do potencial eólico brasileiro, onde foi utilizado o modelo numérico mesoescala Brams (*Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System*), este modelo possui uma resolução horizontal de km x 5 km, que visa captar a intensidade e direção do vento no território brasileiro. O Brams é denominado como um modelo numérico especializado em previsões numéricas relacionadas a tempo e clima, e seu desenvolvimento foi elaborado pelo INPE. Segundo o Atlas, a alimentação do Brams é provinda da base de reanálise ERAInterim do ECMWF2 (o Centro de Previsão de Tempo de Médio Prazo da Comunidade Europeia). Onde esse agrupamento de dados foi empregado para originar as condições de contorno a cada seis horas. Munido por esses dados, o modelo foi programado às 00:00 horas durante todos os dias do ano de 2013. De forma que, o método de aplicação do modelo gera as saídas horárias para as futuras 36 horas, posteriormente as primeiras 12 horas de integração são desprezadas e as previsões para a janela das 13 até as 36 horas de integração

serão recolhidas. Com isso, os dados que são prejudicados em função da iniciação do modelo não são coletados, portanto, esses dados coletados entre as 13 e 36 horas, foram considerados como base para o estudo do Atlas.

3.2 Metodologia

A metodologia utilizada para contatar a estimativa da produção de energia eólica *offshore* no estado do Rio Grande do Norte fundamenta-se nos seguintes estágios:

Estágio 1: Verificação por meio de mapas Eólicos a velocidade média anual dos ventos na costa marítima do Rio Grande do Norte.

Estágio 2: Selecionar aerogerador e sua curva de potência.

Estágio 3: A determinação da distribuição da frequência de Weibull é calculada por meio da equação 3.1, e calcula por meio da obtenção dos parâmetros c e k , onde k e c são obtidos por meio de dados fornecidos pelo Atlas do Potencial Eólico Brasileiro.

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp^{-(v/c)^k} \quad (3.1)$$

Estágio 4: Encontra-se a produção anual de energia a (PAE), utilizando como base as potências estabelecidas no estágio 2, e distribuição de frequência de Weibull $f(v)$, apresentada no estágio 4, por meio da equação 3.1, calculando primeiramente a produção de energia (PE), por meio da equação 3.2, e por conseguinte calcula-se a (PAE), com a equação 3.3.

$$PE = P \times f(v) \quad (3.2)$$

Onde: 8760 é o número total de horas de um ano.

$$PAE = \sum P \times 8760 \quad (3.3)$$

Estágio 5: Tendo posse da produção anual de energia (PAE), a quantidade de horas existente em um ano (8760 hs) e a potência nominal do vento P_n , pode-se calcular o fator de capacidade, por meio da equação 3.4.

$$Fc = \frac{PAE}{P_n \times 8760} \quad (3.4)$$

A Figura 3,1, ilustrar de forma mais clara os procedimentos e parâmetros utilizados para a realização da metodologia deste estudo.

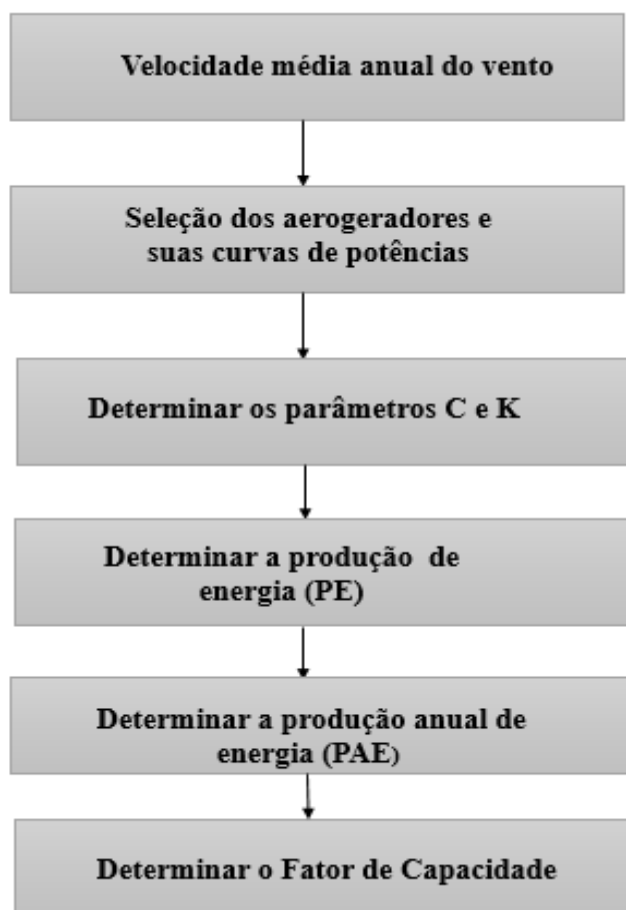


Figura 3.1 - Procedimentos utilizados para a realização deste trabalho

Fonte: Autoria própria, 2021

3.3 Caracterização da Área de Estudo

O objetivo deste estudo foi estimar o potencial eólico *offshore* na costa marítima do estado do Rio Grande do Norte. O litoral norte Rio-grandense foi escolhido como base deste estudo, por possuir um vasto litoral com um enorme potencial *offshore* a ser explorado, a metodologia deste estudo, será fundamentada na metodologia descrita por meio do capítulo 3.

O estado está localizado ao extremo nordeste do Brasil. Encontra-se situado entre os paralelos 6°58'57" S e 4°49'53" S e os meridianos 38°34'54"W e 34°58'08"W, sua extensão territorial é de 53.307 km², representando 0,62% de todo território nacional. Como já citado

anteriormente, o estado do Rio Grande do Norte é pioneiro na geração de energia eólica *onshore*. Possui um litoral com uma extensão territorial de 400 km, contendo uma área extensa composta de dunas e formações arenosas, nordestado segundo a direção dos ventos alísios, intensos e constantes na região costeira do Brasil (AMARANTE *et al.*, 2003).

De acordo com Atlas do Potencial Eólico do Rio Grande do Norte publicado em 2003, o litoral do Rio Grande do Norte está situado na área 2 (Figura 4.1), localidade promissa em relação a geração de energia eólica. A região apresenta velocidades médias anuais dos ventos acima de entre 7 e 8,5 m/s para alturas de 100 m. Vale ressaltar que, esses dados são prioritariamente para torres *onshore*.

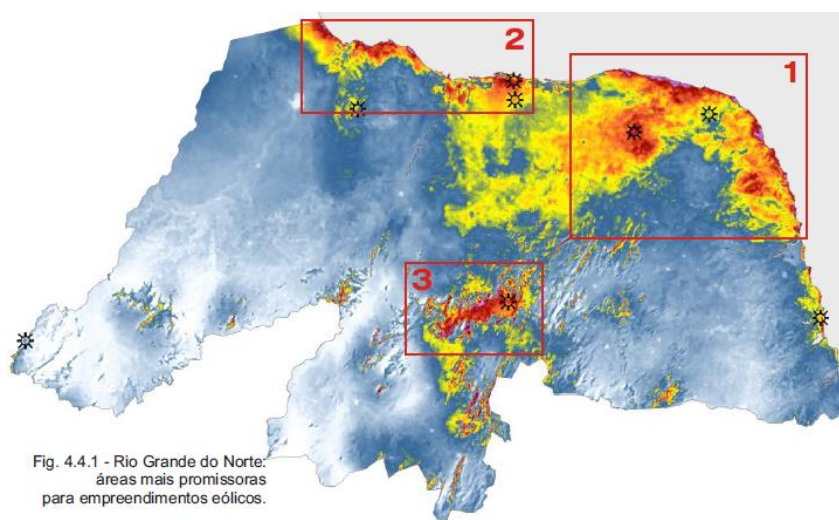


Figura 3.2 - Áreas mais promissoras para empreendimentos eólicos no RN

Fonte: Atlas eólico do Rio Grande do Norte 2003

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esse capítulo é destinado para demonstrar o estudo de caso realizado por meio deste trabalho, como seus respectivos resultados encontrados por meio dos estágios descritos no capítulo 3.

4.1 Análises e resultados

A metodologia utilizada neste capítulo será pautada por meio dos estágios listados no capítulo 3.

Estágio 1: Seleção do aerogerador e sua curva de potência

Para a realização deste estudo, foi selecionado um aerogerador da Vestas. A empresa foi escolhida por ser uma empresa renomada no mercado do setor eólico. Se tratando do setor *offshore* a empresa possui mais de 25 anos de experiência, fornecendo desempenho elevado. Atualmente, a Vestas está inserida dentro do setor eólico do Rio Grande do Norte, 19,22% das torres instaladas em solo potiguar são da Vestas, o que corresponde a 439 torres instaladas por meio da fonte *onshore*. De acordo com a própria vestas, o Brasil possui 977 torres instaladas, produzindo mais ou menos 2.440 MW de potência.

O aerogerador utilizado foi o V164- 9,5 MW, a escolha desta máquina se deu pela sua elevada potência e por ser adequada para utilização em parques eólicos *offshore*. Segundo a vestas, existem 103 máquinas deste modelo instaladas em todo o mundo, gerando cerca de 980 MW de potência. As características do aerogerador utilizado estão descritas por meio da Tabela 4.1, a Figura 4.2 demonstra a curva de potência do aerogerador escolhido e a Tabela 4.2 expressa a potência gerada em (kW) por meio das velocidades do vento (m/s).

V164-9,5 MW	
Potência nominal (MW)	9,5
Velocidade de <i>Cut in</i> (m/s)	3
Velocidade Nominal (m/s)	14
Velocidade <i>Cut out</i> (m/s)	25
Diâmetro do Rotor (m)	164
Área do Rotor (m ²)	21.124

Tabela 4.1 - Característica da turbina V164-9,5 MW

Fonte: Adaptado da VESTAS

Para o cálculo da curva de potência o fabricante do aerogerador utiliza uma massa específica de $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ para uma temperatura de 15°C .

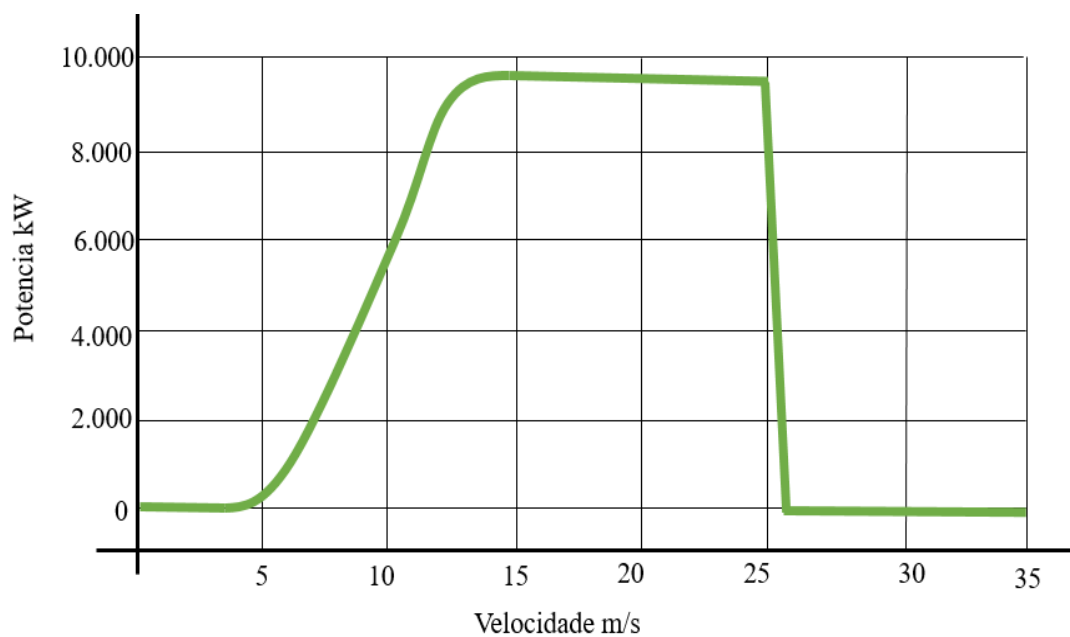


Figura 4. 1 - Curva de potência do aerogerador V164-9,5 MW

Fonte: Adaptado da Vestas

Velocidade do vento (m/s)	Potência Gerada (kW)
0	0
1	0
2	0
3	0
4	249

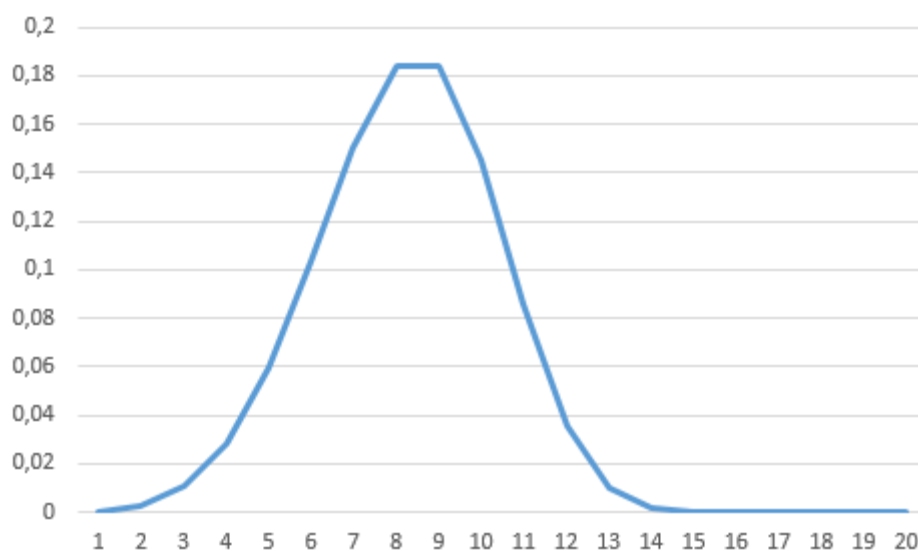
5	613
6	1226
7	2030
8	3123
9	4444
10	5900
11	7299
12	8601
13	9272
14 - 25	9500

Tabela 4. 2 - Curva de potência do aerogerador V164-9,5 MW

Fonte: Adaptado da Vestas, 2021

Estágio 2: Determinar a Distribuição do vento

Como o parâmetro de forma k e o parâmetro de escala c , são disponibilizados por meio da Atlas do Potencial Eólico Brasileiro onde k é aproximadamente 4,5 e c é 9,0 m/s, pode-se calcular a distribuição da frequência de Weibull por meio da equação 3.1, para as devidas faixas de velocidade de (0 a 25), mostradas na tabela 4.2 e calculados são feitos por meio do Excel.

Figura 4. 2 - Distribuição de Weibull para $k = 4,5$ e $c = 9,0$ m/s

Fonte: Autoria própria, 2021

Estágio 3: Determinar a Produção de Energia Anual (PAE)

Para calcular a produção de energia anual, precisa-se inicialmente calcular a produção de energia por meio sua curva de potência, realizados no estágio 1 por meio da Tabela 4.1 e na distribuição do vento explícita por meio do estágio 4, na Figura 4.3.

De acordo com o aerogerador utilizado (Vestas v-164-9,5 MW), tomando como base uma velocidade do vento de 4.0 m/s e sabendo que 8760 corresponde o total de horas em um ano, calcula-se a PE por meio da equação 3.2.

$$PE = P \times f(v) = 249 \times 0,028512428 = 7,099 \text{ kW}$$

Realizando o cálculo para os demais valores correspondentes as velocidades, onde são demonstrados na Tabela 4.3 e em seguida calcula-se o valor correspondente a Produção Anual de Energia (PAE), através da Equação 3.3.

Velocidade do vento (m/s)	Potência Gerada (MW)	Possibilidade do vento (P(v))	W x V
1	0	0,0002	0
2	0	0,0025	0
3	0	0,0106	0
4	249	0,0285	7,0995
5	613	0,0595	36,4872
6	1226	0,1029	126,2108
7	2030	0,1502	304,9981
8	3123	0,1837	573,9661
9	4444	0,1839	817,4281
10	5900	0,1450	855,5279
11	7299	0,0856	624,9396
12	8601	0,0355	306,1116
13	9272	0,0096	89,7306
14	9500	0,0001	15,0231
15	9500	0,0001	1,3396
16	9500	$6,1585 \times 10^{-6}$	0,0585
17	9500	$1,1680 \times 10^{-7}$	0,0011

18	9500	$8,4258 \times 10^{-10}$	$8,004510^{-6}$
19	9500	$1,9994 \times 10^{-12}$	$1,8895 \times 10^{-8}$
20	9500	$1,3325 \times 10^{-15}$	$1,2659 \times 10^{-11}$
21	9500	$2,1014 \times 10^{-19}$	$1,9964 \times 10^{-15}$
22	9500	$6,5179 \times 10^{-24}$	$6,1920 \times 10^{-20}$
23	9500	$3,2593 \times 10^{-29}$	$3,0963 \times 10^{-25}$
24	9500	$2,1237 \times 10^{-35}$	$2,0175 \times 10^{-31}$
25	9500	$1,4364 \times 10^{-42}$	$1,3646 \times 10^{-38}$
SOMA			3758,922365

Tabela 4. 3 - Produção de Energia para cada valor de velocidade

Fonte: Autoria própria, 2021

Tendo posse de todos os valores da Produção de Energia (PE), pode-se realizar o cálculo da Produção de Energia Anual (PAE), utilizando os dados da Tabela 4.3, por intermédio da Equação 3.3

$$PAE = \sum PE \times 8760 (\text{kWh/ano})$$

$$PAE = 3758,922365 \times 8760 = 32.928.159,91 \text{ kWh/ano}$$

Estágio 4: Determinar o Fator de Capacidade (Fc)

De acordo com Pinto (2013), o fator de capacidade, Fc, de uma turbina, pode ser definido como a taxa percentual que explana a relação entre energia elétrica gerada e sua capacidade de produção, analisando o período de 1 ano.

Para determinar o Fator de capacidade (Fc), utiliza-se a produção de energia anual calculada por meio do estágio 3, a potência nominal do vento, juntamente com o número de horas correspondente há um ano. Este cálculo é realizado por meio da Equação 3.4.

$$Fc = \frac{32928159,91}{9.500 \times 8760} = 0,39567$$

De acordo com a Tabela 4.4, pode-se observar um breve resumo da análise do aerogerador da vestas V164-9.5 MW.

Aerogerador	Potência Nominal (MW)	Produção de Energia Anual (MWh)	Fator de Capacidade (%)
V164-9.5 MW	9.500	32928159,91	39.57

Tabela 4. 4 - Analise do aerogerador V164-9.5 MW

Fonte: Autoria própria, 2021

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Com base em todos os levantamentos dos de feitos durante este trabalho, esse capítulo possui como objetivo evidências as conclusões e sugestões para trabalhos futuros que possuam temáticas semelhantes.

5.1 Conclusões

Esse trabalho teve como objetivo analisar o potencial eólico *offshore* na costa marítima do estado do Rio Grande do Norte, demonstrando dados da energia eólica, prioritariamente nos países que possuem uma maior geração desta fonte de energia, dando ênfase a energia eólica *offshore* e suas peculiaridades. Mediante a alta demanda energética dos últimos anos, juntamente com o aumento das agressões ao meio ambiente, tornou-se necessário a utilização de fontes de energias renováveis que fosse capaz de diversificar a matriz energética brasileira, onde a energia eólica se torna uma fonte de energia preferível de acordo com essas necessidades.

Diante da análise deste estudo, é possível perceber que a energia eólica vez crescendo de forma exponencial nos últimos anos. Aos poucos a energia eólica *offshore* vem ganhando seu espaço no mercado, principalmente em países do continente europeu e asiático, como foi citado neste anteriormente. O planeta terra dispõe de um vasto potencial eólico *offshore*, porém, ainda não está sendo totalmente explorado como é o caso do Brasil e principalmente do estado do Rio Grande do Norte que, através de levantamentos realizados neste trabalho, foi possível comprovar que a costa marítima do estado possui um elevado potencial *offshore*.

Pode-se concluir que é viável a instalação de turbinas eólica *offshore* na costa marítima do Rio Grande do Norte, mediante ao potencial existente no Estado. Outra conclusão que pode ser tomada é que, a turbina utilizada no presente trabalho (Vestas V164-9.5 MW), pode ser utilizada em futuros empreendimento eólicos. A turbina utilizada possui uma elevada potência nominal, maiores dimensões das pás, o que possibilita gerar uma maior quantidade de potência, como ficou evidenciado neste trabalho.

5.2 Sugestões

Como é de conhecimento, a energia eólica é um tema de alta complexidade. Este estudo, buscou demonstrar o potencial eólico *offshore* do estado e suas principais características. Para futuros trabalhos, serão sugeridos alguns pontos importantes para a instalação de empreendimentos do tipo *offshore*.

- Pode-se analisar uma maior quantidade de aerogeradores, juntamente com seus respectivos custos de mercado.
- O setor eólico *offshore* não possui um elevado índice de impactos ambientais, porém, seria viável analisar os impactos ambientais relacionados a este tipo de empreendimento.
- Analisar melhor cada componente do aerogerador e seu sistema de manutenção.
- Descrever as subestações utilizadas no setor eólico *offshore*.
- O Rio Grande do Norte é um estado que possui poucos portos marítimos. E para a realização de instalações do tipo *offshore* esse é um fator determinante, visto que mediante a falta desta logística os custos relacionados a instalação de fazendas eólicas se elevam consideravelmente. Esse trabalho não analisou esta problemática, portanto, seria importante que os trabalhos futuros pudessem analisar essa questão.

REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA. **ANNUAL WIND ENERGY REPOR 2020**. Brasil: Abeeólica, 2020. 11 p.

ABEEÓLICA. **Dia Mundial do Vento: Brasil completa 19 GW de capacidade instalada de energia eólica**. Brasil: Abeeólica, 2021.

AMARANTE, OD, et al. "Atlas do potencial eólico do estado do Rio Grande do Norte." *Camargo Schubert Engenharia Eólica, COSERN/Iberdrola Empreendimentos do Brasil* 47 (2003).

ANEEL. **Capacidade instalada por estado**. Brasil: Aneel, 2021. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWZmM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOiR9>. Acesso em: 13 ago. 2021

ANTONIO CARLOS DE BARROS NEIVA (Rio de Janeiro). **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Rio de Janeiro: Cepel, 2017. 52 p.

BENTO COSTA LIMA LEITE DE ALBUQUERQUE JUNIOR (Brasil). **Perspectivas e caminhos para energia eólica marítima**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2019. 140 p.

EL-SHARKAWI, Mohamed A.. **ENERGY AN INTRODUCTION**. Flórida: Crc, 2015. 345 p.

FADIGAS, Eliana A Faria Amaral. **Energia Eólica**. Barueri: Manole Ltda, 2011. 288 p.

GWEC. **GWEC - GLOBAL WIND REPORT 2021**. Bruxelas: Gwec, 2021. 80 p

KOMUSANAC, I. et al. Wind Energy in Europe—2020 Statistics and the Outlook for 2021–2025. **WindEurope: Brussels, Belgium**, 2021.

LONDON ARRAY. **London Array The World's largest offshore wind farm**. Disponível em: <https://londonarray.com/>. Acesso em: 09 set 2021.

MASTERS, Gilbert M.. **Renewable and Efficient Electric Power Systems**. Canadá: Published By John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004. 95 p.

MHI Vestas offshore Wind. **V164-9.5 MW breaks world record wind energy production**. Disponível em: https://www.vestas.com/en/products/offshore-platforms/v164_9_5_mw#!grid_0_content_0_Container Acesso em: 19 out 2021.

MOREIRA, José Roberto Simões. **Energia renováveis, geração distribuída e eficiência energética**. Rio de Janeiro: O Gen, 2017. 385 p.

NASCIMENTO, Wallisson da Silva. TIPIFICAÇÃO DE FUNDAÇÕES DE TURBINAS EÓLICAS DE PARQUES EÓLICOS OFF-SHORE. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Piauí, v. 1, p. 1-19, 05 jul. 2018. Disponível em:

<https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/11969/209209209891>. Acesso em: 04 set. 2021.

NUNES, João Paulo Costa e Silva. **ENERGIA EÓLICA OFFSHORE: UM ESTUDO DE CASO PARA ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DE UMA USINA PRÓXIMA À COSTA DO RIO GRANDE DO NORTE**. 2020. 219 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia da Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020

OLIVEIRA, Clóvis; DE ARAÚJO, Renato SB. Guia do setor eólico do Rio Grande do Norte. 2015.

Ortiz, G. P., and M. Kampel. "Potencial de energia eólica *offshore* na margem do Brasil." *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. V simpósio Brasileiro de Oceanografia, Santos* (2011).

PINTO, Milton de Oliveira. **ESTUDO ESTIMATIVO BÁSICO PARA IMPLANTAÇÃO DE TURBINAS EÓLICA OFFSHORE NO LITORAL DO RIO GRANDE DO NORTE**. 2017. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

PINTO, Milton de Oliveira. **Fundamentos da energia eólica**. Rio de Janeiro: Gen, 2013. 362 p.

Pires, C. H. M., Pimenta, F. M., D'Aquino, C. A., Saavedra, O. R., Mao, X., & Assireu, A. T. (2020). Coastal Wind Power in Southern Santa Catarina, Brazil. *Energies*, 13(19), 5197.

SILVA, Amanda Jorge Vinhoza de Carvalho. **POTENCIAL EÓLICO OFFSHORE NO BRASIL: LOCALIZAÇÃO DE ÁREAS NOBRES ATRAVÉS DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO**. 2019. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

SILVA, Rozana Maiara Pereira. **A EVOLUÇÃO DO SETOR DE ENERGIA EÓLICA NOS MUNICÍPIOS DA COSTA BRANCA POTIGUAR (2014-2018)**. 2020. 66 f. Monografia (Especialização) - Curso de Bacharel em Ciências Econômicas, Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, Pau dos Ferros, 2020

VAICBERG, Henrique; VALIATT, Gian; FERREIRA, Matheus. Energia eólica *offshore*: Um overview do cenário global e o contexto brasileiro. **Revista de Direito e Negócios Internacionais da Maritime Law Academy-International Law and Business Review**, v. 1, n. 1, p. 114-143, 2021.