



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE ANGICOS
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

Erick Gabriel Coelho dos Santos

**ANÁLISE TÉCNICA DOS GERADORES EÓLICOS EM PARQUES DO RIO
GRANDE DO NORTE**

ANGICOS

2024

Erick Gabriel Coelho dos Santos

**ANÁLISE TÉCNICA DOS GERADORES EÓLICOS EM PARQUES DO RIO
GRANDE DO NORTE**

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em ciência
e tecnologia

Orientador: Marcos Vinícius Cândido
Henriques, Prof. Dr.

ANGICOS

2024

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

G237a Gabriel Coelho dos Santos, Erick.
Análise técnica dos geradores eólicos em
parques do rio grande do norte / Erick Gabriel
Coelho dos Santos. - 2024.
45 f. : il.

Orientador: Marcos Vinícius Cândido Henriques.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2024.

1. Energia eólica. 2. Aerogeradores. 3. Rio
Grande do Norte. 4. Vestas. 5. Gamesa. I. Vinícius
Cândido Henriques, Marcos, orient. II. Título.

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

Biblioteca Campus Angicos
Bibliotecário: Helder Romero Maia Duarte
CRB: 15/673

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.

Erick Gabriel Coelho dos Santos

ANÁLISE TÉCNICA DOS GERADORES EÓLICOS EM PARQUES DO RIO GRANDE DO NORTE

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em ciências e tecnologia .

Defendida em: 27 / 03/ 2024.

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente

MARCOS VINICIUS CANDIDO HENRIQUES

Data: 23/04/2024 19:28:34-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Marcos Vinícius Cândido Henriques, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente



Documento assinado digitalmente

GISLENE MICARLA BORGES DE LIMA

Data: 23/04/2024 19:13:45-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Gislene Micarla Borges de Lima, Profa. Dra. (UFERSA)
Membro Examinador



Documento assinado digitalmente

ENAI TAVEIRA DA CUNHA

Data: 23/04/2024 19:06:24-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Enai Taveira da Cunha, Profa. Dra. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida que ele me concedeu e por ter me ajudado a chegar até aqui, pois com ele tudo é possível.

Agradeço aos meus pais, José Aparecido e Maria Cristiane, por todo o apoio ao longo da minha jornada, o esforço investido em mim, à minha irmã, Gabrielle, que me ajudou com a construção do trabalho. A minha família é minha base e meu forte.

Sou grato pela confiança depositada na minha proposta de projeto pelo meu professor Marcos Vinícius, orientador do meu trabalho. Obrigado por ajudar ao longo do trabalho e me manter motivado durante todo o processo.

Obrigado a todos os meus amigos, à galera do canaã, agregados da residência, à dupla da varanda e aos demais, todos são pessoas incríveis e especiais que conheci ao longo desse tempo, foram muito importantes para suportar os dias e a distância da família.

Por último, quero agradecer também à Universidade Federal Rural do Semi-Árido e a todo o seu corpo docente.

Talvez não tenha conseguido fazer o melhor,
mas lutei para que o melhor fosse feito. Não
sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não
sou o que era antes

Marthin Luther King

RESUMO

A geração de energia eólica vem desempenhando um papel crucial na transição para um futuro mais sustentável nos últimos anos, convertendo a energia cinética do vento em eletricidade. No estado do Rio Grande do Norte, a geração de energia eólica é uma das maiores do país, detendo aproximadamente 26% das usinas em operação no Brasil, e diversos modelos de aerogeradores são utilizados nos parques eólicos do estado, destacando-se o Vestas v150-4.2 MW e o Gamesa G97. A comparação entre tais modelos revelam nuances importantes, como potência nominal, velocidade do vento, dimensões do rotor e componentes internos. O Vestas v150-4.2 MW demonstra uma faixa de potência nominal flexível e um diâmetro de rotor maior, que proporciona uma maior área de varredura, gerando uma maior capacidade de captura de energia. Já o Gamesa G97, exibe uma eficiência notável na captura de energia, apesar de ter um diâmetro de rotor menor. A escolha entre os modelos depende das necessidades específicas de cada projeto, e levando em consideração as condições de vento, espaço disponível, requisitos de potência e eficiência operacional, além de informações ambientais e orçamentárias. Tal análise demonstra a complexidade envolvida na seleção de aerogeradores e a importância de uma abordagem abrangente que garanta viabilidade e sustentabilidade de projetos com energia eólica. O principal objetivo desse trabalho é analisar tecnicamente os aerogeradores utilizados no Rio Grande do Norte, com ênfase nos modelos Vestas v150-4.2 MW e Gamesa G97. A análise compara as características como potência nominal, velocidade do vento, dimensões do rotor e componentes internos. A metodologia utilizada no trabalho envolveu a obtenção de dados por meio das fontes governamentais e institucionais, como ABEEÓLICA e a SEDEC/RN, por meio de relatórios e boletins. Foram consultados os manuais dos aerogeradores das empresas Vestas e Gamesa. Isso permitiu uma análise abrangente e detalhada dos geradores eólicos.

Palavras-chave: Energia eólica, Aerogeradores, Rio Grande do Norte, Vestas, Gamesa.

ABSTRACT

Wind power generation has been playing a crucial role in the transition to a more sustainable future in recent years, converting the kinetic energy of the wind into electricity. In the state of Rio Grande do Norte, wind energy generation is one of the largest in the country, accounting for approximately 26% of the plants in operation in Brazil, and several models of wind turbines are used in the state's wind farms, notably the Vestas v150 -4.2 MW and the Gamesa G97. Comparison between such models reveals important nuances, such as rated power, wind speed, rotor dimensions and internal components. The Vestas v150-4.2 MW demonstrates a flexible rated power range and a larger rotor diameter, which provides a larger swept area, generating greater energy capture capacity. The Gamesa G97, on the other hand, exhibits remarkable efficiency in energy capture, despite having a smaller rotor diameter. The choice between models depends on the specific needs of each project, and taking into account wind conditions, available space, power requirements and operational efficiency, as well as environmental and budgetary information. This analysis demonstrates the complexity involved in selecting wind turbines and the importance of a comprehensive approach that guarantees viability and sustainability of wind energy projects. The main objective of this work is to technically analyze the wind turbines used in Rio Grande do Norte, with emphasis on the Vestas v150-4.2 MW and Gamesa G97 models. The analysis compares characteristics such as rated power, wind speed, rotor dimensions and internal components. The methodology used in the work involved obtaining data through government and institutional sources, such as ABEEÓLICA and SEDEC/RN, through reports and bulletins. The wind turbine manuals of the companies Vestas and Gamesa were consulted. This allowed for a comprehensive and detailed analysis of wind generators.

Keywords: Wind energy, Wind turbines, Rio Grande do Norte, Vestas, Gamesa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Representação dos aerogeradores verticais.....	20
Figura 2	–	Gerador eólico de eixo horizontal.....	21
Figura 3	–	Modelo do aerogerador Vestas v150-4.2MW.....	37
Figura 4	–	Gerador eólico Gamesa G97.....	39

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	– Evolução da capacidade instalada em 2022 (GW).....	22
Gráfico 2	– Evolução da capacidade instalada até 2026	22
Gráfico 3	– Fator de capacidade ao longo de 2022	23
Gráfico 4	– Representação da curva de potência do Gamesa G97	24
Gráfico 5	– Mostra a potência e quantitativo de empreendimentos eólicos em operação por município.....	27
Gráfico 6	– Emissões de CO2 evitadas por mês em 2022.....	29
Gráfico 7	– Comparativo da geração distribuída entre o Rio Grande do Norte e o restante do Brasil.....	35
Gráfico 8	– Representação dos empreendimentos no estado.....	36
Gráfico 9	– Representação dos modelos de aerogeradores instalados no estado.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Capacidade instalada e números de parques por estados.....	23
Tabela 2	– Dados de Operação do aerogerador Vestas v150-4.2 MWZ	37
Tabela 3	– Rotor Vestas v150-4.2 MW	38
Tabela 4	– Gerador Vestas v150-4.2 MW	38
Tabela 5	– Gearbox Vestas v150-4.2 MW	38
Tabela 6	– Torre Vestas v150-4.2 MW	38
Tabela 7	– Sustentabilidade Vestas v150-4.2 MW	39
Tabela 8	– Dados de operação Gamesa G97	39
Tabela 9	– Rotor Gamesa G97	40
Tabela 10	– Gearbox Gamesa G97	40
Tabela 11	– Gerador Gamesa G97	40
Tabela 12	– Torre Gamesa G97	40
Tabela 13	– Sustentabilidade Gamesa G97	40

SUMÁRIO

1	Introdução	16
2	Geração eólica	19
2.1	Introdução aos geradores eólicos	19
2.2	Tipos de Geradores Eólicos	19
2.2.1	Rotores de eixo vertical	20
2.2.2	Rotores de eixo Horizontal	20
2.3	Desempenho e Eficiência Energética dos Geradores Eólicos	21
2.3.1	Capacidade instalada	21
2.3.2	Fator de capacidade	23
2.3.3	Eficiência do conversor de energia	24
2.3.4	Curva de potência	24
2.3.5	Impacto ambiental	24
2.3.6	Aerogeradores com velocidade fixa	25
2.3.7	Aerogeradores com velocidade variável	25
2.4	Fatores que influenciam o desempenho e a eficiência dos aerogeradores	25
2.4.1	Velocidade do vento	25
2.4.2	Densidade de potência	25
2.4.3	Localização	26
2.4.4	Altura da torre	27
2.4.5	Eficiência do design das pás	27
2.4.6	Manutenção e operação	27
2.4.7	Sistemas de controle e monitoramento	28
2.4.8	Condições climáticas extremas	28
2.4.9	Tecnologia e Inovação	28
2.5	Impactos Ambientais Associados à Utilização dos Geradores Eólicos ...	28
2.6	Dados Técnicos dos Aerogeradores	31
2.6.1	Potência Nominal	31
2.6.2	Diâmetro do rotor	31

2.6.3	Altura da torre	31
2.6.4	Velocidade de início de geração	31
2.6.5	Velocidade nominal	32
2.6.6	Velocidade de corte	32
2.6.7	Fator de Capacidade	32
2.6.8	Tipo de gerador	32
2.6.9	Tipo de rotor	33
2.6.10	Classe de turbulência do vento	33
3	Metodologia	34
4	Discussão sobre modelos de geradores eólicos no rio grande do norte ...	35
4.1	Levantamento e análise dos dados técnicos de cada aerogerador divulgados pelas fabricantes	37
4.1.1	Vestas v150-4.2 MW	37
4.1.2	Gamesa G97	39
5	Considerações finais	40
	Referências	44

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o Brasil vem se destacando na produção de energia eólica, em especial o Rio Grande do Norte (RN). O estado se destaca com um potencial eólico *onshore* (em terra) duas vezes maior que o estimado há alguns anos e com a capacidade de expandir a geração dessa fonte de energia em cerca de 93 gigawatts (ABEEÓLICA, 2022).

A energia eólica é uma das matrizes energéticas que ajudam na redução de gases poluentes (GRACIONAL, DE OLIVEIRA, DE MELO, 2012), por ser renovável e limpa, oriunda dos ventos em que uma enorme hélice é conectada a um gerador, transformando energia mecânica em elétrica. No Brasil a energia eólica é a segunda maior fonte energética, segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), a capacidade instalada no Brasil chegou a 16 GW em 2020.

Existem dois tipos de aerogeradores, os que possuem eixo vertical e os de eixo horizontal. Os rotores diferem em relação ao seu custo relativo de produção, eficiência, e na velocidade do vento em que tem sua maior eficiência, podendo ser utilizado dependendo do objetivo e do local em que vai ser implementado (NEOENERGIA, 2021).

Com o avanço constante no setor, alguns desafios que antes apresentavam uma dificuldade hoje vêm sendo superados. Graças à Cosern, de onde vem cumprindo seu papel como concessionária de energia elétrica, vem colocando esforços para, de um lado, conseguir viabilizar a conexão dos parques a uma rede de distribuição estável e, assim, garantir um fornecimento para seus consumidores. (DE OLIVEIRA PINTO, 2012).

A região nordeste se destaca como a região com a maior produção energética proveniente das eólicas, com o potencial de gerar mais de 85% da produção nacional, o estado do Rio Grande do Norte representa cerca de 30% dessa capacidade (ALÉM DA ENERGIA, 2023). Os aerogeradores utilizados nos parques do estado são os de eixo horizontal, por apresentarem maior eficácia pela sua resistência ao ar. A gama de potência desses aerogeradores estende-se desde os 100 W até cerca de 8 MW dependendo do tamanho das pás utilizadas.

Os geradores eólicos têm um grande papel no desempenho e na eficiência energética dos parques, de acordo com seu porte e da região que será instalado. Dependendo das suas características, onde determinará a sua rotação assim obtendo uma maior potência ao converter energia cinética em elétrica, porém com essa conversão existe uma perda ligada ao

atrito entre as engrenagens. Durante o giro assume-se que as perdas são uma porcentagem fixa da potência nominal. Essa porcentagem é em torno de 2% da potência em cada etapa de engrenamento. Como a transmissão consome uma quantidade de energia, se estiver em baixa potência o rendimento poderá ser menor (TERCIOTE, 2002).

A implementação dos parques eólicos podem gerar impactos ambientais, apesar de não estarem relacionados à emissão de gases ou resíduos, em geral, os impactos vão estar ligados a impactos visuais, sonoros e a fauna local, onde as aves podem colidir com as pás dos aerogeradores (DE OLIVEIRA PINTO, 2012).

A metodologia empregada neste trabalho se baseou na obtenção de dados confiáveis de fontes governamentais e institucionais, como a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA) e a Secretaria de Desenvolvimento Econômico do Rio Grande do Norte (SEDEC/RN). A ABEEÓLICA e a SEDEC forneceram relatórios anuais e trimestrais, respectivamente, além de dados disponíveis em seus sites oficiais. Os manuais dos aerogeradores das empresas Vestas e Gamesa foram consultados para obter informações detalhadas sobre os modelos mais utilizados nos parques eólicos do estado. Essa abordagem possibilitou uma análise abrangente e detalhada dos geradores eólicos nos parques do Rio Grande do Norte, considerando aspectos técnicos, condições locais e fontes confiáveis de informação.

A seguir descrevemos os capítulos deste trabalho. O capítulo Geração Eólica fornecerá uma base teórica sobre energia eólica, destacando seu papel na matriz energética e os principais conceitos relacionados aos aerogeradores. serão discutidas as características técnicas dos modelos em destaque, Vestas v150-4.2 MW e o Gamesa G97, incluindo potência nominal, velocidade do vento, dimensões do rotor e componentes internos, visando compreender sua influência na geração de energia. O terceiro capítulo aborda a metodologia que foi empregada na pesquisa. Serão apresentadas as fontes de dados utilizadas, incluindo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA), a Secretaria de Desenvolvimento Econômico do Rio Grande do Norte (SEDEC/RN) e os manuais dos aerogeradores Vestas e Gamesa. Será explicado como os dados foram coletados e analisados para garantir uma abordagem abrangente e detalhada. No capítulo de Resultados e Discussão são apresentados os resultados da análise técnica dos geradores, com ênfase na comparação entre os modelos em destaque, Vestas v150-4.2 e Gamesa G97. Serão discutidas as nuances encontradas nos dados e os impactos na geração de energia eólica. Além disso, serão fornecidos *insights* para a

seleção adequada de aerogeradores em projetos futuros, considerando as necessidades específicas. No último capítulo serão sintetizados os principais resultados que foram obtidos ao longo da pesquisa e apresentadas considerações finais sobre a análise técnica dos geradores eólicos nos parques do Rio Grande do Norte.

2 GERAÇÃO EÓLICA

2.1 Introdução aos Geradores Eólicos

A energia eólica é uma fonte renovável de energia, onde é obtida a partir do movimento dos ventos onde será convertida em eletricidade por meio dos aerogeradores. Essas turbinas são compostas por pás que captam a energia cinética proveniente do vento e a convertem em energia mecânica. Posteriormente, essa energia mecânica é convertida em energia elétrica utilizando um gerador ligado ao eixo do rotor. (PORTAL SOLAR, 2023)

O funcionamento do aerogerador se dá pela captura do vento com as hélices (ou pás), que vão girar com a força proveniente dos ventos, mas de forma controlada. Esse movimento faz girar o rotor e o eixo principal, no qual o mesmo está conectado a uma caixa multiplicadora (Gearbox) que vai fazer a rotação do eixo aumentar. Por fim, o eixo vai estar conectado ao gerador, que por sua vez vai iniciar o processo de indução eletromagnética para a produção de eletricidade em corrente elétrica alternada. (PORTAL SOLAR, 2023)

O estado do Rio Grande do Norte (RN) exerce uma grande importância no cenário dos parques eólicos, pois é o estado líder na produção de energia eólica no Brasil. Conforme a Secretaria de Desenvolvimento Econômico estadual, existe um total de 224 empreendimentos que estão em operação no estado, e eles possuem o potencial de produzir até 6,8 GW. Possuindo um total de 63 projetos de parques em construção e 85 já contratados. Segundo a previsão, nos próximos anos é que a produção suba para 12,2 GW em 372 parques. (ALÉM DA ENERGIA, 2023)

O Brasil, atualmente, possui a capacidade de produzir 22 GW de energia eólica, onde a região Nordeste é responsável por 20 GW, ou seja, mais de 90% da produção nacional. Além do Rio Grande do Norte, os estados brasileiros que mais geram energia eólica no último ano foram Bahia, Piauí e Ceará. Somados, eles representam aproximadamente 84% da energia total gerada por essa matriz energética. (ALÉM DA ENERGIA, 2023)

2.2 Tipos de Geradores Eólicos

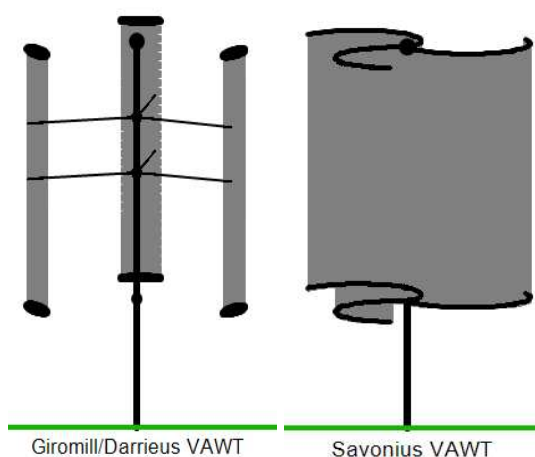
Os tipos de aerogeradores que podemos considerar vai depender da posição do eixo, onde a energia cinética será convertida em energia elétrica, os aerogeradores podem ser divididos em dois principais grupos: aerogeradores de eixo vertical (Vertical Axis Wind Turbine - VAWT) e aerogeradores de eixo horizontal (Horizontal Axis Wind Turbine - HAWT).

2.2.1 Rotores de eixo vertical

Os aerogeradores de eixo vertical - VAWT, têm a característica do eixo de rotação perpendicular ao solo, onde eles conseguem aproveitar o vento vindo de qualquer direção e podendo operar com ventos mais fracos (figura 1). Esses aerogeradores são considerados mais seguros, pois apresentam uma construção e a manutenção mais fáceis, pois possuem menos componentes na sua construção se comparados com os de eixo horizontal, fazendo assim reduzir a complexidade para a implementação do projeto. Porém, eles vão gerar menos energia. (PURIFICAÇÃO & FONTE, 2012)

Com isso, destacam-se dois modelos de aerogeradores verticais, o modelo Darrieus e o Savonius (figura 1). Os modelos *Darrieus* e *Savonius* são caracterizados por pás curvas com o formato "S" ou "C", onde eles fazem o giro em torno do eixo vertical. São geradores mais indicados para os ambientes urbanos, porém eles possuem uma baixa eficiência energética se comparados aos geradores de eixo horizontal.

Figura 1 - representação dos aerogeradores verticais



Fonte: Wikimedia Commons, 2010

2.2.2 Rotores de eixo Horizontal

Os aerogeradores com o eixo horizontal - HAWT (figura 2), são os mais difundidos pelo mundo. Eles são normalmente caracterizados com três pás, onde as mesmas são movidas pela força dos ventos fazendo o giro. Seu eixo principal está ligado a uma caixa multiplicadora (gearbox), onde ela vai aumentar a velocidade de rotação, e logo em seguida é ligada ao eixo do gerador. Embora o custo de implementação seja mais elevado se comparado

aos aerogeradores verticais, o gerador eólico apresenta uma maior eficiência energética, compensando mais a implementação em larga escala (NEOENERGIA, 2021).

Figura 2 - Gerador eólico de eixo horizontal



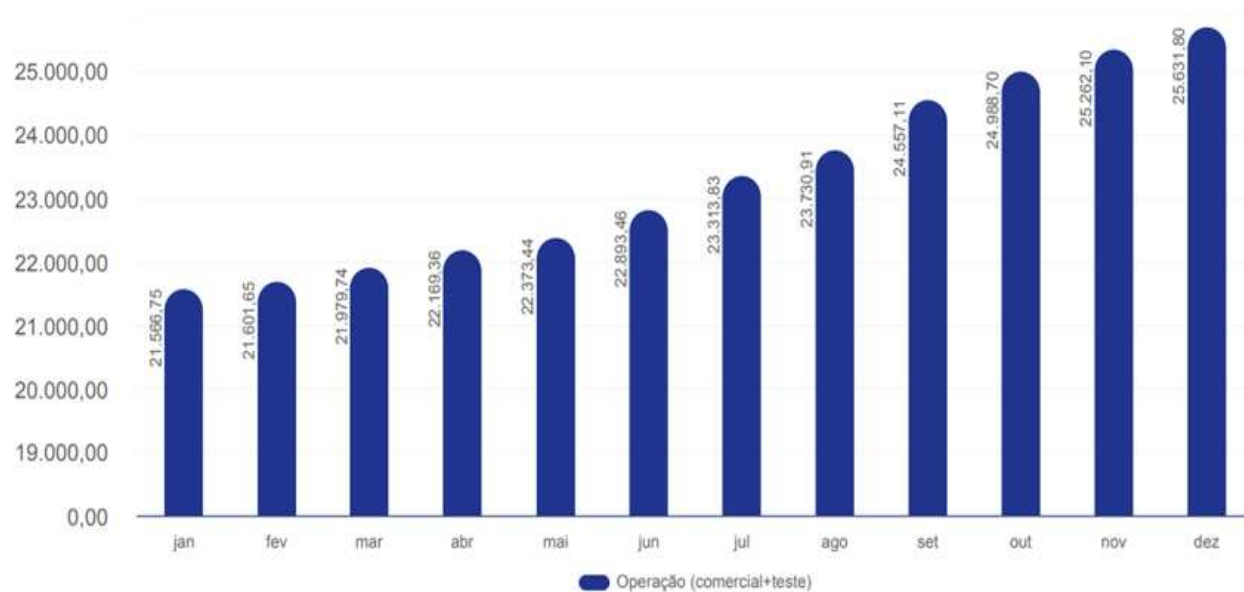
Fonte: Wikimedia Commons, 2020

2.3 Desempenho e Eficiência Energética dos Geradores Eólicos

2.3.1 Capacidade instalada

A capacidade instalada em um determinado período pode ser medida em megawatts (MW) ou em gigawatts (GW). Segundo dados levantados pela Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), em 2021 o Brasil conseguiu passar da marca de 20 GW de capacidade instalada, onde conta com cerca de 751 parques em operação e mais de 8800 aerogeradores, e ao longo de 2022, foram instalados um total de 109 novos parques, num total de 4,05 GW. Ao final de 2022, foi contada uma capacidade instalada de 25,63 GW. Segundo os dados obtidos, até o ano de 2026, o país poderá ter uma capacidade de gerar pelo menos 32 GW (ABEEÓLICA, 2022).

Gráfico 1 - Evolução da capacidade instalada em 2022 (GW)



Fonte: ANEEL/ABEEólica, 2022

Gráfico 2 - Evolução da capacidade instalada até 2026



Fonte: ANEEL/ABEEólica, 2022

Tabela 1 - Capacidade instalada e números de parques por estados

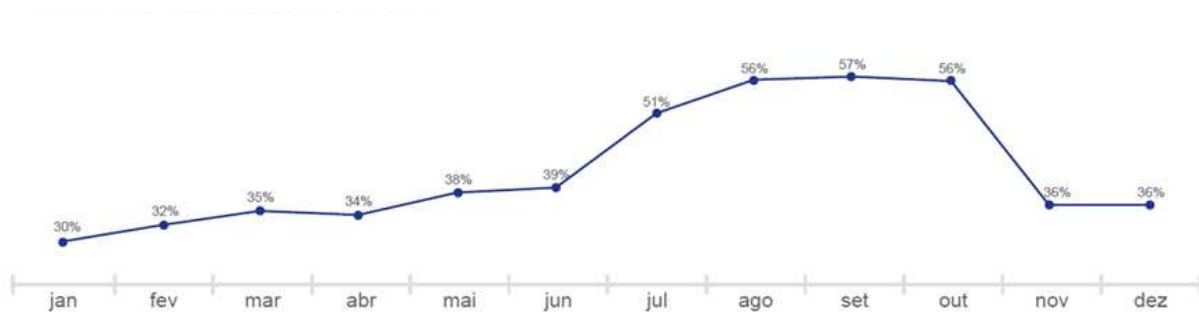
Estados	Potência Instalada (MW)	Parques	Aerogeradores
Rio Grande do Norte (RN)	6.082,83	201	2.571
Bahia (BA)	5.395,55	204	2.287
Ceará (CE)	2.438,14	94	1.107
Piauí (PI)	2.354,65	81	1.007
Rio Grande do Sul (RS)	1.835,89	80	830
Pernambuco (PE)	798,365	34	417
Maranhão (MA)	426	15	172
Paraíba (PB)	469,05	25	211
Santa Catarina (SC)	238,499	14	173
Sergipe (SE)	34,5	1	23
Rio de Janeiro (RJ)	28,05	1	17
Paraná (PR)	2,5	1	5
Total	20.104,01	751	8.820

Fonte: ANEEL/ABEEólica, 2022

2.3.2 Fator de capacidade

O fator de capacidade é a relação entre a quantidade de energia produzida por um gerador durante um determinado tempo e a quantidade máxima de energia que ele teoricamente pode produzir. Na maioria do tempo, os aerogeradores não operam em sua capacidade máxima, a justificativa é que existem ventos suficientes nos parques eólicos para poderem gerar a capacidade nominal. O valor médio para o ano de 2022 foi 41,5%, tendo atingido o máximo valor médio mensal em setembro, com 56,5% (ABEEÓLICA, 2022).

Gráfico 3 – Fator de capacidade ao longo de 2022



Fonte: ANEEL/ABEEólica, 2022

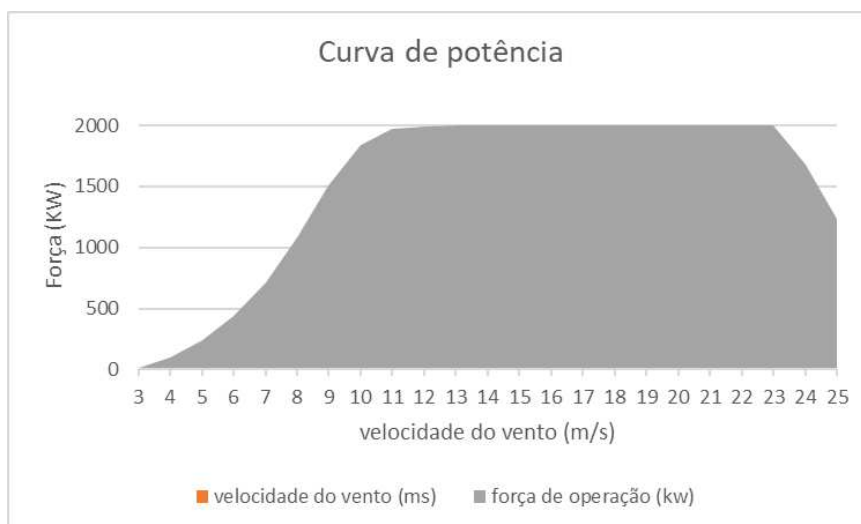
2.3.3 Eficiência do conversor de energia

A eficiência do conversor de energia avalia como o gerador fará a conversão de energia cinética que é proveniente do vento para a energia elétrica. Quanto mais eficiente for essa conversão, menor será a perda de energia e consequentemente a produção será maior. (DE OLIVEIRA PINTO, 2012).

2.3.4 Curva de potência

A curva de potência é um gráfico que tem uma representação entre a velocidade do vento e a potência elétrica que está sendo gerada pelo aerogerador (DE OLIVEIRA PINTO, 2012). Essa curva é essencial para podermos entender como o gerador vai responder a diferentes tipos de ventos provenientes da região onde o mesmo está instalado.

Gráfico 4 – Representação da curva de potência do Gamesa G97



Fonte: Gamesa G97, 2024

2.3.5 Impacto ambiental

Os impactos ambientais que estão associados à energia eólica são dependentes da região onde vão ser instalados os parques. Um estudo conduzido na Europa, onde existe uma maior experiência com a operação de parques eólicos, mostra que os impactos considerados mais críticos são: impactos visuais, ruídos acústicos e os impactos sobre a fauna local (DE OLIVEIRA PINTO, 2012).

Nos últimos anos, foram desenvolvidas várias tecnologias para os sistemas aerogeradores, onde se leva em consideração a velocidade de rotação. Os aerogeradores utilizados no Brasil geralmente podem ser enquadrados em duas categorias, podendo ser

classificados como aerogeradores de velocidade fixa e de velocidade variável com controle de velocidade (CAMPOS e FERRARI, 2021).

2.3.6 Aerogeradores com velocidade fixa

Os aerogeradores de velocidade fixa possuem geradores assíncronos com rotor em gaiola, onde neles a velocidade de rotação é mantida permanente. O projeto de construção costuma ser mais simples e econômico, mas, em contrapartida, eles são menos eficientes, especialmente quando o ambiente apresenta ventos fracos ou fortes. Os aerogeradores operam com uma faixa de vento limitada e pode haver o desperdício de energia onde as condições de vento são acima ou abaixo da velocidade ideal para a rotação (CAMPOS e FERRARI, 2021).

2.3.7 Aerogeradores com velocidade variável

Os aerogeradores com velocidade variável, se forem comparados diretamente com os de velocidade fixa, apresentam muitas vantagens operacionais. O investimento para os sistemas de velocidade variável tem um maior foco e investimentos, pois esses sistemas apresentam um maior retorno energético. Com esse tipo de aerogerador é possível um maior controle da potência que vai ser distribuída na rede elétrica, onde se consegue controlar mesmo em ventos acima da velocidade nominal (CAMPOS e FERRARI, 2021).

2.4 Fatores que influenciam o desempenho e a eficiência dos aerogeradores

2.4.1 Velocidade do vento

A velocidade do vento é um dos fatores mais importantes para o desempenho dos geradores e parques eólicos. Para a produção *onshore* no Rio Grande do Norte, segundo os dados levantados e apresentados no Atlas Eólico do estado, aponta a capacidade instalável em terra, de 56 GW, com a velocidade dos ventos acima de 7 m/s e considerando a altura de 100 metros, conforme os dados apresentados, o potencial eólico, pode aumentar dependendo da altura e podendo chegar cerca de 94 GW a 200 metros de altura, onde a velocidade dos ventos podem chegar a cerca de 8 m/s (SEDEC e ASSECOM, 2022).

2.4.2 Densidade de potência

A densidade de potência é um conceito importante para a avaliação do desempenho e eficiência dos aerogeradores. Na qual se refere à quantidade de potência que pode ser gerada pela unidade de área ou volume. Tendo em mente que locais que possuem a mesma velocidade média dos ventos podem ser detectados diferentes potências dos aerogeradores

devido à variação da massa específica do ar, onde é mais certo comparar o potencial desses locais por meio da equação, potência por unidade de área ou densidade de potência (P/A). A densidade de potência relaciona-se com a densidade do ar e com a velocidade do vento, segundo a equação (1):

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

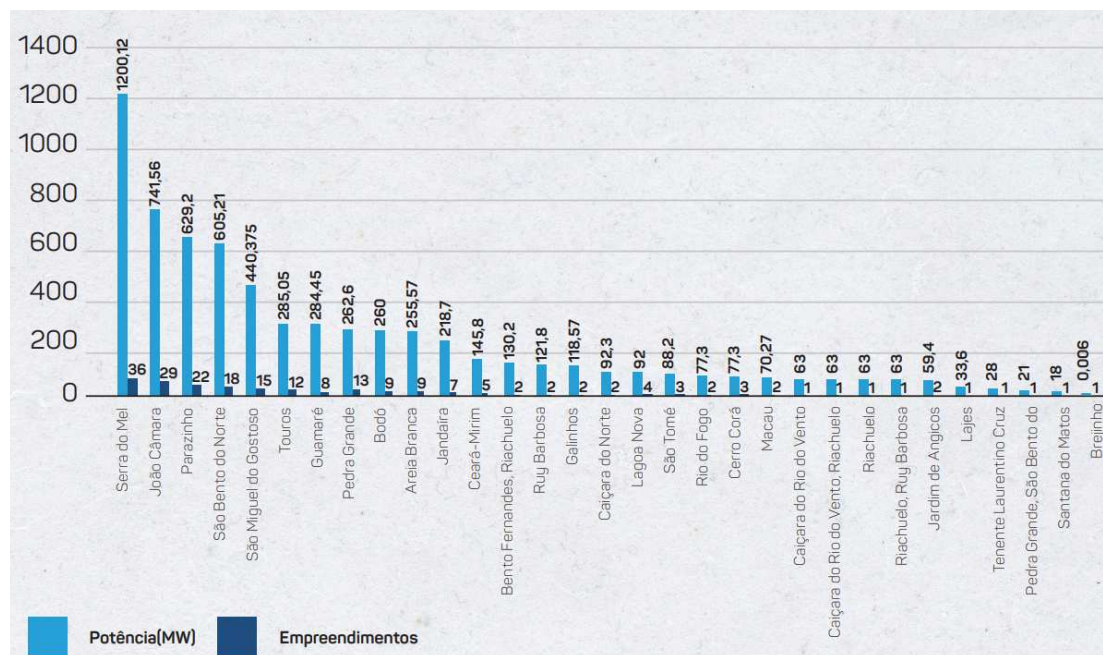
Onde P/A é a densidade de potência contida no vento que atingirá a parte frontal do aerogerador. Vai ocorrer uma variação linear com a massa do ar e com o cubo da velocidade do vento. Apenas uma pequena parte dessa potência consegue ser aproveitada pelos aerogeradores, a outra parte é levada pelo ar (DE OLIVEIRA PINTO, 2012).

A densidade de potência pode variar conforme a temperatura do ar e a pressão atmosférica, para os aerogeradores instalados em um mesmo parque eólico. Um dos aspectos que podem ser citados é que a potência do vento vai depender da área de captação, onde vai ser proporcional ao cubo de sua velocidade, onde, caso ocorra alguma variação na velocidade dos ventos, vai gerar uma grande alteração na potência. Para ventos de velocidades com a média de 8 m/s, a densidade de potência (ao nível do mar) é de 314 W/m², caso a velocidade do vento chegue à casa dos 16 m/s, a densidade de potência gerada vai para 2.509 W/m², onde ela vai aumentar oito vezes.

2.4.3 Localização

Outro fator bastante importante é a localização onde os parques vão ser instalados. As áreas com ventos consistentes e fortes são ideais para maximizar a eficiência. Atualmente, no Rio Grande do Norte, os municípios que apresentam uma maior quantidade de parques são Serra do Mel com 36 parques e potência de 1200,12 MW, seguido pelo município de João Câmara com 29 parques onde conta com a potência de 714,56 MW, e em terceiro o município de Parazinho que possui um total de 22 parques eólicos, tendo a potência de 629,2 MW, como apresentado no gráfico 5 (SEDEC, 2022).

Gráfico 5 – Mostra a potência e quantitativo de empreendimentos eólicos em operação por município



Fonte: SEDEC, 2022

2.4.4 Altura da torre

A altura da torre vai determinar a quantidade de vento que o aerogerador pode capturar. Os 224 parques que estão localizados no estado, sendo 29% de todos os aerogeradores tendo a altura total entre 101 a 130 m, e 20% atingem alturas maiores, onde podem chegar à marca de 200 m (SEDEC e ASSECOM, 2022).

2.4.5 Eficiência do design das pás

O *design* das pás é definido para poder capturar a máxima quantidade de vento. Quando o vento incidir perpendicularmente sobre as pás, vai gerar uma força de sustentação onde vai acontecer o movimento das hélices. A maioria das pás é fabricada com poliéster ou epóxi reforçado com fibra de vidro e para reforço do material é utilizada fibra de carbono (DE OLIVEIRA PINTO, 2012).

2.4.6 Manutenção e operação

Existem dois tipos de manutenção, são elas: a preventiva e a corretiva. A primeira consiste em verificações periódicas, onde vão determinar as condições do aerogerador. A verificação pode vir de diferentes técnicas, como as teleobjetivas de alta precisão, análise com drones, dentre outras. A outra é a manutenção corretiva, que vai consistir na reparação ou

reconstrução das pás e naceles, onde vão reparar possíveis danos que podem aparecer ao longo do tempo de trabalho (IBERDROLA, 2024).

2.4.7 Sistemas de controle e monitoramento

Sistemas avançados de controle e monitoramento podem melhorar o desempenho dos aerogeradores, assim podendo ser ajustados automaticamente a posição das pás por intermédio do controle de passos (pitch control), dentre outras tecnologias onde se torna possível o ajuste fino das pás, onde se pode maximizar a eficiência em diferentes condições de vento (DE OLIVEIRA PINTO, 2012).

2.4.8 Condições climáticas extremas

Ventos muito fortes ou algumas tempestades podem vir a danificar os componentes dos aerogeradores. Projetos mais robustos e sistemas de segurança são bastante importantes para ser possível lidar com as diversidades climáticas e proteger os equipamentos.

2.4.9 Tecnologia e Inovação

Os avanços tecnológicos na parte de aerodinâmica das pás, materiais mais leves e resistentes, sistemas de transmissão mais eficientes com pouca dispersão elétrica e melhores sistemas de armazenamento energético, onde o desempenho dos geradores eólicos vão melhorar significativamente.

2.5 Impactos Ambientais Associados à Utilização dos Geradores Eólicos

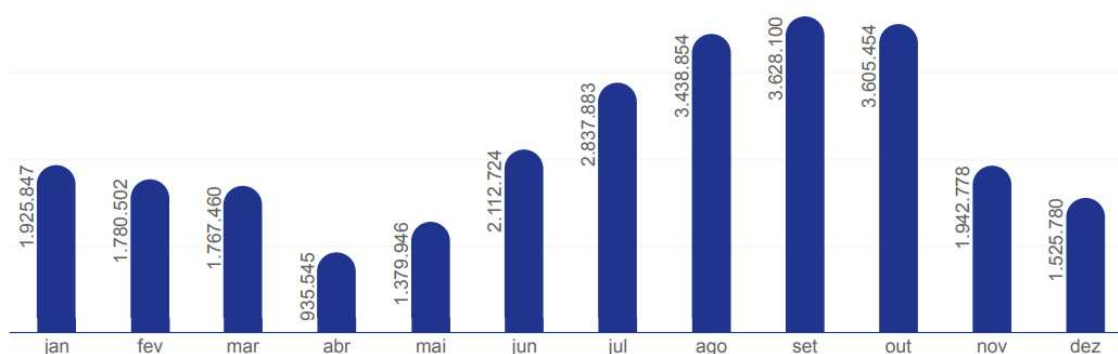
A preocupação com impactos ambientais ocasionados por aerogeradores promove discussões há décadas. A definição de impacto ambiental é bem delimitada pela Resolução CONAMA n.º 1, de 23 de janeiro de 1986:

Segundo a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA n 001, de 23 de janeiro de 1986, é considerado impacto ambiental toda e qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: a saúde, a segurança e o bem-estar da população, as atividades sociais e econômicas, a biota, as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente, a qualidade dos recursos ambientais. (CONAMA, 2024)

O desenvolvimento e fabricação das peças dos aerogeradores, tais como as pás, torres e naceles, necessitam de recursos naturais para a produção, como metais, plásticos, concreto e fibras de vidro ou carbono. Com a extração desses materiais, pode gerar uma degradação ambiental na região onde estão sendo produzidas. Outro que pode ser citado são as emissões de gases ao longo da fabricação dos componentes, que frequentemente envolvem a queima de combustíveis fósseis, fazendo assim com que ocorra a emissão de CO₂ na atmosfera. Do mesmo modo, tem a geração de resíduos, onde os componentes podem gerar resíduos sólidos, líquidos, dentre outros. O tratamento se faz necessário para poder evitar a contaminação do solo, da água e do ar.

Os impactos causados pela implementação de parques eólicos têm seus pontos positivos e negativos. Os pontos positivos que podem ser citados são na diminuição dos gases do efeito estufa, já que os geradores eólicos não emitem CO₂ durante seu funcionamento. O gráfico 6 mostra o levantamento feito pela ABEEólica e divulgado no boletim anual de 2022, onde mostra as emissões de CO₂ evitadas por mês devido à implementação das fontes de energia eólica no ano de 2022, onde ao longo do período foram evitados cerca de 26,88 milhões de toneladas de CO₂. Outro ponto que pode ser citado é no desenvolvimento local, onde são feitos projetos culturais, sociais, de saúde e ambientais. A própria empresa responsável pelo projeto do parque pode fazer capacitações para a população local, onde vai capacitar as pessoas e assim fomentar o desenvolvimento da região (ABEEÓLICA, 2022).

Gráfico 6 – Emissões de CO₂ evitadas por mês em 2022 (Toneladas)



Fonte: ABEEólica/ANEEL, 2022

Já os efeitos negativos advindos da construção dos parques eólicos devem ser analisados e qualificados, levando em conta todas as variáveis ambientais, onde possam ser estudadas as formas de minimizar os impactos. As AIA mais comuns associadas a um parque eólico são seus ruídos produzidos pelo esforço mecânico do rotor e suas engrenagens e os

ruídos aerodinâmicos. Bem como o uso do solo, a erosão e a interferência na fauna local, desmatamentos.

Nos locais próximos aos aerogeradores de 2 (MW), o ruído produzido varia entre 98 a 109db. Já com a distância de 250 m, o ruído cai para 45 dB. Esses ruídos podem causar problemas de saúde para a população que mora próximo às torres, foram apontados problemas à qualidade do sono, sintomas de estresse, dores de cabeça, dentre outros. (DE M. CONFESSOR, S. L. et al., 2018)

Um dos efeitos ambientais negativos mais significativos é da fauna e da avifauna. Com a implementação do projeto de parques e aerogeradores, vai ocorrer uma degradação do habitat, que assim vai comprometer locais de pouso, reprodução, alimentação e rotas migratórias de algumas espécies de aves da região. Com isso, é preciso estudos para poderem ser minimizados esses efeitos (DE M. CONFESSOR, S. L. et al., 2018).

As questões de desmatamento e erosão estão relacionadas com a preparação do terreno para a construção de complexos de energia eólica, durante os quais as árvores precisam ser derrubadas para alocar estruturas, e da mesma forma é necessária escavação para fixar as estruturas de suporte das turbinas eólicas. (DE M. CONFESSOR, S. L. et al., 2018).

Outros tipos de impactos que podem ser citados são os socioeconômicos, onde a utilização das propriedades para a construção do parque vai proporcionar para o dono uma indenização mensal, devido à utilização da terra. No começo do projeto, a área ficará restringida, devido ao trânsito de material e maquinário, mas logo depois da construção a área pode ser usada para a agricultura ou criação de animais (DE M. CONFESSOR, S. L. et al., 2018).

Do ponto de vista positivo temos a geração de empregos na região onde os empreendimentos eólicos estão se desenvolvendo, ampliação de projetos sociais, culturais, de saúde e ambientais, onde assim vai trazer além de renda para o município, fazendo assim com que a região se desenvolva e ajudando o comércio local. O pagamento pela utilização das terras é feito diretamente aos proprietários, fazendo assim gerar uma injeção de capital por um período mínimo de 20 anos (DE M. CONFESSOR, S. L. et al., 2018).

2.6 Dados Técnicos dos Aerogeradores

Os aerogeradores, também conhecidos como turbinas eólicas, representam uma tecnologia crucial na geração de energia renovável. Estes dispositivos convertem a energia cinética do vento em eletricidade, desempenhando um papel fundamental na transição para um futuro mais sustentável. Os dados técnicos dos aerogeradores abrangem uma variedade de parâmetros essenciais, incluindo a capacidade de geração de energia, a altura da torre, o diâmetro das pás e a velocidade do vento necessária para a operação ideal. Essas informações técnicas são vitais para o planejamento e a implementação de parques eólicos eficientes, contribuindo para a expansão da energia eólica como uma fonte confiável e ambientalmente amigável de eletricidade.

2.6.1 Potência Nominal

A potência nominal de um aerogerador é determinada pela quantidade de energia que o gerador vai conseguir produzir em condições ideais de vento. Podendo ser encontrado em Quilowatts (kW) ou em Megawatts (MW) (ACUNHA e ALMEIDA, 2005).

2.6.2 Diâmetro do rotor

O diâmetro do rotor é o tamanho da área varrida pelas hélices. Quanto maior a amplitude do rotor, maior vai ser sua capacidade de captura da energia dos ventos e consequentemente maior a produção de energia (DE OLIVEIRA PINTO, 2012).

2.6.3 Altura da torre

A altura da torre se refere justamente ao tamanho total da torre que vai sustentar o gerador eólico, onde o tamanho da torre se torna necessário, pois assim é possível ter acesso a ventos mais fortes e constantes, encontrados em altitudes elevadas (DE OLIVEIRA PINTO, 2012).

2.6.4 Velocidade de início de geração

A velocidade de início de geração é a velocidade mínima para que o aerogerador possa entrar em operação e assim possa gerar eletricidade. Para poder ser aproveitável, se torna necessário que a densidade do vento seja igual ou superior a 500 W/m^2 , a uma distância do solo de 50 m, o que vai exigir uma velocidade do vento em torno de 7 a 8 m/s (GRUBB; MEYER, 1993).

2.6.5 Velocidade nominal

A velocidade nominal é o ponto de velocidade do vento em que o aerogerador vai atingir a sua capacidade nominal de geração. Nesse ponto, ele estará gerando na sua faixa máxima de eletricidade. A velocidade pode variar de um aerogerador para o outro, mas os valores mais comuns são entre 12 a 25 m/s (DE OLIVEIRA PINTO, 2012).

2.6.6 Velocidade de corte

A velocidade de corte é um parâmetro crítico onde o sistema eólico vai determinar a velocidade máxima que o gerador consegue suportar, e caso esse valor seja ultrapassado, vai ocorrer o desligamento para evitar danos ao equipamento. Os valores típicos onde vai ser acionado o sistema podem variar, mas geralmente encontram-se na faixa de 25 a 30 m/s (DE OLIVEIRA PINTO, 2012).

2.6.7 Fator de Capacidade

O fator de capacidade é um indicativo para que se possa avaliar a eficiência e o desempenho de uma usina eólica. Ela vai ser deduzida pela porcentagem da capacidade nominal de uma usina que está gerando energia durante o período de um tempo determinado, geralmente o cálculo é feito usando o tempo de um ano. Ele é dado pela seguinte fórmula: (DE OLIVEIRA PINTO, 2012).

$$FC (\%) = \frac{Et}{P \times 8760}$$

Onde:

- FC = Fator de capacidade em porcentagem;
- Et = Energia gerada em um período de tempo (no caso um ano) ;
- P = Potência nominal;
- T = intervalo de tempo considerado (no caso um ano ou 8760 horas).

2.6.8 Tipo de gerador

O tipo de gerador é um dos componentes mais críticos, onde ele vai determinar o desempenho na conversão de energia cinética proveniente do vento em eletricidade. Existem vários tipos de geradores que podem ser utilizados em turbinas eólicas, sendo que as mais utilizadas são os geradores de indução trifásico gaiola de esquilo (GIGE), de indução com rotor bobinado (GIRB), de relutância variável e síncronos (GS). (SGUAREZI FILHO e CARDOSO, 2014)

2.6.9 Tipo de rotor

Os tipos de rotores em uma turbina eólica vão desempenhar um papel crucial para a captação da energia cinética do vento e, posteriormente, para a conversão dessa energia em um movimento rotativo, que depois vai ser utilizado para a geração de energia elétrica. Existem dois principais tipos de rotores, os de passo fixo, conhecidos também como rotores rígidos, eles possuem as pás fixas em uma posição específica em relação ao seu eixo. Outro que pode ser citado são os rotores passo variável, onde eles possuem pás que podem ter seu ângulo ajustado em respostas às mudanças do vento. Com esse mecanismo, possibilita capturar uma variedade de velocidade dos ventos de maneira mais efetiva (MARIN, 2016).

2.6.10 Classe de turbulência do vento

A classe de turbulência dos ventos é um estudo fundamental para a construção de um parque eólico. Os aerogeradores são projetados para suportar determinadas condições climáticas, durante a sua fabricação são feitas suposições sobre o clima do local onde o parque eólico vai ser construído, pois as turbinas ficaram expostas a condições variadas. As classificações dos ventos são determinadas por três parâmetros: A velocidade média do vento, rajadas extremas com o período de recorrência de 50 anos e a turbulência.

A intensidade da turbulência quantifica o quanto o vento vai variar em um período de 10 minutos. Esse estudo é bastante crucial na hora da fabricação e determina quais aerogeradores vão ser utilizados, pois vários componentes principais de uma turbina são afetados pela fadiga em decorrência da carga. (CTGÁS-ER, 2012)

3 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho baseou-se na obtenção de dados confiáveis disponibilizados por sites do governo e instituições da área. A Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA) foi uma das fontes primárias, representando uma dessas instituições de renome no setor. Os dados foram obtidos por meio de relatórios técnicos divulgados pela ABEEÓLICA, como o Boletim Anual de 2022, além de consulta a artigos científicos e informações disponíveis em sites oficiais da entidade (ABEEÓLICA, 2022).

A Secretaria de Desenvolvimento Econômico do Rio Grande do Norte (SEDEC/RN) também foi uma fonte importante de dados. A SEDEC é responsável por fornecer informações sobre o desenvolvimento econômico do estado. Os dados foram obtidos por meio de relatórios técnicos, como o Boletim Trimestral da Fonte Eólica de 2022, e por meio do Atlas Eólico do estado (SEDEC, 2022).

Os manuais dos aerogeradores, fornecidos pelas empresas Vestas e Gamesa, foram consultados para obter informações detalhadas sobre os modelos de aerogeradores mais utilizados nos parques eólicos do Rio Grande do Norte. As empresas são líderes no mercado de energia eólica e disponibilizam informações técnicas detalhadas em seus materiais de divulgação. Os dados foram obtidos por meio de relatórios técnicos disponibilizados nos *websites* das empresas e por meio de *websites* de terceiros que fornecem informações adicionais sobre os aerogeradores (BAUER, 2024).

Essa metodologia permitiu uma análise abrangente e detalhada dos geradores eólicos nos parques do Rio Grande do Norte, considerando dados técnicos, condições locais e fontes confiáveis de informação.

4 DISCUSSÃO SOBRE MODELOS DE GERADORES EÓLICOS NO RIO GRANDE DO NORTE

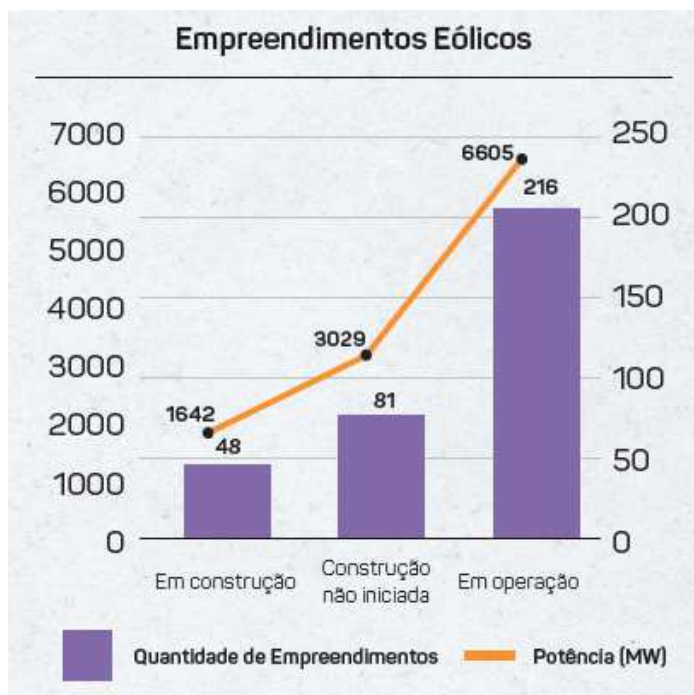
No estado do Rio Grande do Norte, a geração de energia eólica é uma das maiores do país, como foi apresentado ao longo do trabalho. Como mostrado no gráfico 7, o estado detém 26% das usinas em operação no Brasil, segundo os dados levantados no boletim do primeiro trimestre de 2022 divulgado pela secretaria de desenvolvimento econômico do estado. Junto a isso, o estado conta com vários empreendimentos eólicos mostrados no mesmo boletim representado no gráfico 8. Nos parques eólicos em operação e os que estão sendo construídos, são utilizados uma vasta gama de aerogeradores, cada um deles com sua característica, que vão ser escolhidos conforme as condições da região onde os parques eólicos serão instalados. Podem ser citados os dois modelos que mais são utilizados, o Vestas v150-4.2 MW, onde o modelo conta com a quantidade de 426 unidades instaladas, e o Gamesa G97, onde o modelo de aerogerador conta com 124 unidades, como mostrado no gráfico 9.

Gráfico 7 – Comparativo da geração distribuída entre o Rio Grande do Norte e o restante do Brasil.



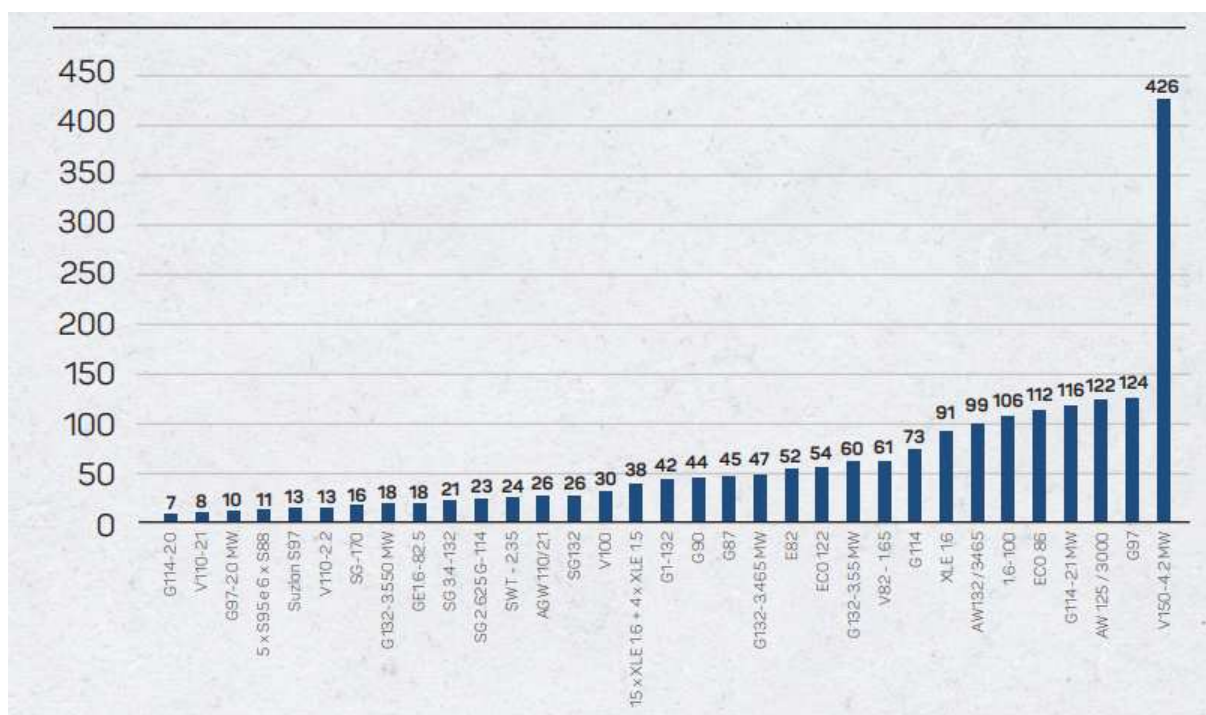
Fonte: SEDEC, 2022.

Gráfico 8 – Representação dos empreendimentos no estado.



Fonte: SEDEC, 2022.

Gráfico 9 – Representação dos modelos de aerogeradores instalados no estados



Fonte: SEDEC, 2022.

4.1 Levantamento e análise dos dados técnicos de cada aerogerador divulgados pelas fabricantes

4.1.1 Vestas v150-4.2 MW

Esses são os dados técnicos apresentados pela fabricante Vestas em seu site sobre o modelo do aerogerador Vestas v150-4.2MW.

Figura 3 - Modelo do aerogerador Vestas v150-4.2MW



Fonte: Vestas, 2024

Tabela 2 - Dados de Operação do aerogerador Vestas v150-4.2 MW

Dados de Operação	Valor
Potência nominal	4 / 4.2 MW
Velocidade mínima do vento	3.0 m/s
Velocidade Nominal do vento	10.1 m/s
Velocidade de corte do vento	24.5 m/s
Classe de vento	IEC IIIB/IEC S (Ventos de até 7,5 m/s)

Fonte: VESTAS e BAUER, 2024

Tabela 3 - Rotor Vestas v150-4.2 MW

Dados de Operação	Valor
Diâmetro	150 m
Comprimento da pá	73.7 m
Velocidade máxima do rotor	10.4 rpm
Área varrida	17.671 m^2
Densidade da potência	$237,7 \text{ W/m}^2$

Fonte: VESTAS E BAUER, 2024

Tabela 4 - Gerador Vestas v150-4.2 MW

Dados de Operação	Valor
Tipo	Indução
Rotação máxima do eixo	1,485 rpm
Tensão	800 v
Frequência	50/60 Hz
Conversor	Escala completa

Fonte: VESTAS e BAUER, 2024

Tabela 5 - Gearbox Vestas v150-4.2 MW

Dados de Operação	Valor
Tipo	Dois estágios planetários e um estágio helicoidal
Relação	1:143

Fonte: VESTAS e BAUER, 2024

Tabela 6 - Torre Vestas v150-4.2 MW

Dados de Operação	Valor
Altura do cubo	105 m

Fonte: VESTAS e BAUER, 2024

Tabela 7 - Sustentabilidade Vestas v150-4.2 MW

Dados de Operação	Valor
Pegada de carbono	7.3 g CO ₂ e/kWh
Retorno sobre o ponto de equilíbrio de energia	7.6 meses

Retorno vitalício de energia	21 vezes
Taxa de reciclabilidade	88.1%

Fonte: VESTAS e BAUER, 2024

4.1.2 Gamesa G97

Esses são os dados técnicos do Gamesa G97, disponibilizados no site da fabricante e em terceiros.

Figura 4 - Gerador eólico Gamesa G97



Fonte: Wikimedia commons, 2012

Tabela 8 - Dados de operação Gamesa G97

Dados de Operação	Valor
Potência nominal	2 MW
Velocidade inicial	3,0 m/s
Velocidade nominal	11,0 m/s
Velocidade de corte	25,0 m/s
Classe de ventos	s IEC

Fonte: BAUER, 2024

Tabela 9 - Rotor Gamesa G97

Dados de Operação	Valor
Diâmetro	97,0 m

Área varrida	7.390,0 m^2
Velocidade de rotação	17.8 rpm
Densidade de potência	270,6 W/m^2

Fonte: BAUER, 2024

Tabela 10 - Gearbox Gamesa G97

Dados de Operação	Valor
Tipo	1 estágio planetário 2 estágios paralelos
Relação	1:107

Fonte: BAUER, 2024

Tabela 11 - Gerador Gamesa G97

Dados de Operação	Valor
Tipo	Duplo Fed Asyn
Rotação máxima do eixo	1.904 rpm
Tensão	690 V
Frequência da rede	50/60 Hz

Fonte: BAUER, 2024

Tabela 12 - Torre Gamesa G97

Dados de Operação	Valor
Altura	78, 90, 100, 104 e 120 m

Fonte: BAUER, 2024

Tabela 13 - Sustentabilidade Gamesa G97

Dados de Operação	Valor
Pegada de carbono	Nao encontrada
Retorno sobre o ponto de equilíbrio de energia	10 meses
Retorno vitalício de energia	Nao encontrada
Taxa de reciclabilidade	90%

Fonte: BAUER, 2024

Nos parques eólicos implementados no estado, são utilizados uma gama de aerogeradores, dentre os modelos podemos destacar os dois mais utilizados. Tomando como base o infográfico eólico divulgado no primeiro trimestre de 2022 e apresentado pela SEDEC, os dois modelos onde apresentam uma maior utilização são o V150-4.2 MW, onde o modelo possui um total de 426 unidades instaladas, sendo o mais operado, e o modelo G97 onde possui um total de 124 unidades instaladas pelo estado.

A comparação entre os modelos Vestas v150-4.2 MW e Gamesa G97 revela diversas nuances devido ao ano de cada projeto e outros aspectos técnicos, sendo feitas considerações importantes para a escolha de um aerogerador em um determinado contexto. Discutiremos alguns pontos-chave a partir dos dados apresentados.

O primeiro ponto a ser abordado é a potência nominal, onde se pode observar que o aerogerador Vestas v150-4.2 MW exibe uma faixa de potência nominal de 4 até 4.2 MW, como demonstrado na tabela 2. Isso sugere a capacidade de variar a sua produção de energia dentro dessa faixa, o que pode ser bastante útil para otimizar a operação em diferentes condições climáticas, uma vez que a flexibilidade na potência nominal pode ser um ponto positivo ao adaptar o aerogerador a variações sazonais ou a locais com ventos variáveis.

Já o modelo Gamesa G97, tem uma potência nominal de 2 MW como visto na tabela 8, onde mostra uma quantidade significativamente menor de produção/geração em comparação com o Vestas. Isso pode indicar uma capacidade mais modesta, o que pode ser adequado para aplicações em locais com ventos mais brandos. Com a análise, é perceptível a diferença na potência nominal entre os dois modelos, onde ela se torna crucial ao considerar a capacidade total de geração do parque eólico. O aerogerador Vestas v150-4.2 MW, conta com uma faixa de potência maior, podendo ser melhor adaptável às diferentes condições de vento e oferece uma produção mais consistente.

O próximo ponto a ser discutido é em relação à velocidade dos ventos, onde ambos os modelos têm parâmetros de velocidade do vento bem definidos. O Vestas v150-4.2 MW vai contar com uma velocidade mínima de vento para iniciar a operação de 3 m/s (Tabela 2). Isso significa que o aerogerador é capaz de começar a gerar energia em ventos relativamente suaves, o que pode ser vantajoso para maximizar a produção em condições de vento variáveis. A velocidade nominal do vento, na qual o Vestas atinge sua máxima eficiência, é de 10,1 m/s (Tabela 2), o que indica a faixa de ventos em que o aerogerador opera de maneira ideal, gerando a quantidade máxima de energia possível. A velocidade de corte do vento é a

velocidade em que o aerogerador para de operar para evitar danos. No caso do Vestas v150-4.2 MW, essa velocidade é de 24,5 m/s (Tabela 2), indicando uma capacidade de resistir a ventos muito fortes antes de ser desativado.

Para o Gamesa G97 iniciar sua operação, são necessários ventos de 3,0 m/s (tabela 8), isso sugere uma capacidade de começar a gerar energia em condições de vento mais brandas. A velocidade nominal do vento para o Gamesa G97 é de 11,0 m/s (Tabela 8), indicando a faixa de ventos em que o aerogerador opera de maneira otimizada. A velocidade de corte do vento para o Gamesa G97 é de 25,0 m/s (Tabela 8), semelhante ao Vestas v150-4.2 MW, demonstrando uma capacidade semelhante de resistir a ventos extremos. Com isso, os dois modelos demonstram capacidades significativas de operar em uma variedade de condições de vento, assim, indicando uma versatilidade em ambientes diversos.

Referente às dimensões do rotor, temos que o aerogerador Vestas v150-4.2 MW possui um diâmetro de 150 metros (Tabela 3), assim implicando em uma maior área varrida, permitindo que o aerogerador possa capturar mais energia do vento. Cada pá do rotor possui um comprimento de 73,7 metros (Tabela 3), onde o tamanho das pás é crucial para determinar a área efetiva. Pás mais longas permitem ao aerogerador extrair mais energia do vento, especialmente em condições de vento mais suaves. A velocidade máxima do rotor é indicada como 10,4 rpm (Tabela 3), onde a medida vai influenciar diretamente na eficiência do aerogerador. A área varrida pelo rotor é de 17.671 m² (Tabela 3) e a densidade de potência gerada por unidade de área é de 237,7 W/m² (Tabela 3). Esses valores são referências da eficiência do rotor na captura e conversão da energia proveniente do vento em eletricidade.

Em relação ao modelo da Gamesa G97, seu rotor possui um diâmetro de 97 metros (Tabela 9), por mais que seja menor que o Vestas, ele ainda possui uma área significativa de varredura. A sua área de varredura tem 7.390,0 m² (Tabela 9), e a densidade de potência é por volta de 270,6 W/m² (Tabela 9). Como citado anteriormente, por mais que o modelo da gamesa tenha um diâmetro menor em relação ao Vestas, o mesmo demonstra uma eficiência notável na captura dos ventos. A velocidade de rotação do rotor pode chegar até 17,8 rpm (Tabela 9), onde pode influenciar a eficiência operacional e a capacidade de adaptação a diferentes condições de vento.

Com a análise dos dados, pode-se citar que o Vestas v150-4.2 MW destaca-se pelo impressionante diâmetro do rotor, e assim conseguindo ter uma maior área de varredura, onde pode ser bastante vantajoso para regiões com ventos variáveis ou com baixas velocidades.

Embora o Gamesa G97 tenha um rotor menor, ele demonstra uma eficiência notável em relação a sua densidade de potência, onde assim vai apresentar uma boa capacidade na conversão de energia.

Discutindo os dados do gerador e da gearbox utilizados nos modelos em destaque, temos que o Vestas v150-4.2 MW utiliza um gerador de indução (Tabela 4), onde é uma escolha comum e utilizada em muitos outros aerogeradores. Os geradores de indução são conhecidos por terem uma simplicidade construtiva, porém possuem uma robustez. A rotação máxima do eixo é de 1.485 rpm (Tabela 4), e a sua tensão é de 800 V (Tabela 4), sugerindo assim, uma operação eficiente na sua conversão de energia mecânica em elétrica. A gearbox do Vestas é composta de dois estágios planetários e um estágio helicoidal (Tabela 5). Sua relação é de 1:143 (Tabela 5), indicando uma redução das rotações do rotor para uma rotação adequada a ser utilizada pelo gerador. A escolha de uma configuração de estágios múltiplos sugere uma abordagem para que se possa otimizar a eficiência e a durabilidade da transmissão do aerogerador.

O Gamesa G97 utiliza um gerador Duplo Fed Asyn (Tabela 11), onde implica que parte da sua energia é alimentada diretamente para a rede (não passando pelo sistema de controle), proporcionando eficiência operacional. A sua rotação máxima do eixo é mais elevada em comparação ao Vestas, atingindo um pico máximo de 1.904 rpm (Tabela 11). Sua tensão de 690 V (Tabela 11) e a capacidade de operar em frequências de 50/60 Hz (Tabela 11) sugerem uma resiliência a diferentes sistemas elétricos. A sua gearbox é composta por um estágio planetário e dois estágios paralelos (Tabela 10), e a sua transmissão é de 1:107 (Tabela 10). A configuração de estágios paralelos pode ser adotada para otimizar a distribuição de carga e, possivelmente, melhorar a eficiência do sistema de engrenagens.

Por fim, a escolha entre os dois modelos de aerogeradores dependerá das necessidades específicas de cada projeto, considerando fatores como condições de vento do local onde o parque será implantado, o espaço disponível, requisitos de potência, eficiência operacional e o compromisso com a sustentabilidade. Com a análise dos dados fica evidente a complexidade envolvida na escolha de aerogeradores, pois diferentes modelos vão apresentar características distintas. A decisão final deve-se basear em estudos aprofundados sobre as condições específicas do local de implantação e metas na produção de energia, levar considerações ambientais e restrições orçamentárias.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo Vestas V150-4,2 MW foi submetido para ter uma faixa de potência nominal de 4 a 4,2 MW. Em contraste, o design mais antigo, Gamesa G97 é classificado na faixa de 2 MW. Estas diferenças demonstram a excelente capacidade do modelo Vesta para lidar com diferentes tipos de clima.

Ambos os modelos possuem os mesmos parâmetros de velocidade do vento. Os modelos Vestas e Gamesa partem com ventos moderados de cerca de 3 m/s e atingem eficiência máxima em torno de 10,1 m/s.

O V150-4.2MW da Vesta tem um diâmetro de rotor de 150 m, enquanto o G97 da Gamesa tem um diâmetro de rotor de aproximadamente 97 m. Por causa disso, o Vestas tem uma área de varredura maior e pode absorver mais energia do vento. No entanto, o modelo Gamesa mostra uma eficiência surpreendente em relação à densidade de potência.

Além disso, o modelo Vestas utiliza um gerador de indução e uma caixa de engrenagens planetária e helicoidal de dois estágios, enquanto o modelo Gamesa usa um gerador Double Fed Asyn e uma caixa de engrenagens planetária e de dois paralelos de estágio único. Essas diferentes configurações oferecem diferentes abordagens para máxima eficiência e durabilidade.

A escolha entre os dois modelos dependerá, portanto, dos requisitos específicos de cada projeto, tendo em conta as condições climáticas locais, o espaço disponível, as necessidades energéticas, a eficiência operacional e a sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

ACUNHA, I. C.; ALMEIDA, J. Análise do desempenho de um aerogerador de pequeno porte. **Colégio Técnico Industrial–FURG, Rio Grande, Rio Grande do Sul**, 2005.

ABEEÓLICA. **Boletim anual, 2022**. Disponível em:
<<https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2023/06/Boletim-de-Geracao-Eolica-2022.pdf>>.
Acesso em: 25, ago de 2023

Aspectos Técnicos da Energia Eólica. CTGÁS-ER, 2012. Disponível em
<http://ead2.ctgas.com.br/a_rquivos/aperfeicoamento/AspectosTecnicosEnergiaEolica/Apostila_Aspectos_Tecnicos_Daniel_Faro_v1.pdf>. Acesso em 06, Março de 2024.

BAUER, L. **Gamesa G97**. Disponível em:
<<https://en.wind-turbine-models.com/turbines/764-gamesa-g97>>. Acesso em: 11 mar. 2024.

BAUER, L. **Vestas V150-4.2**. Disponível em:
<<https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1841-vestas-v150-4.2>>. Acesso em: 20 mar. 2024b.

CAMPOS, NATÁLIA CORNÉLIA SILVA; FERRARI, Hélio Oliveira. **SISTEMAS EÓLICOS DE VELOCIDADE FIXA E VARIÁVEL: UM ESTUDO COMPARATIVO**. Intercursos Revista Científica, v. 20, n. 2, 2021.

CASTRO, Nivalde José de et al. **A importância das fontes alternativas e renováveis na evolução da matriz elétrica brasileira**. V Seminário de Geração e Desenvolvimento Sustentável. Rio de Janeiro, Brasil, p. 19-29, 2009.

DE M. CONFESSOR, S. L. et al. **AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS GERADOS EM EMPREENDIMENTO EÓLICOS**, 2018. Disponível em:
<<https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2022/04/ID-51-1551133840-AVALIACAO-DO-S-IMPACTOS-AMBIENTAIS-GERADOS-EM-EMPREENDIMENTO-EOLICOS-2.pdf>>.
Acesso em: 17 mar. 2024.

DE OLIVEIRA PINTO, Milton. **Fundamentos de energia eólica**. Grupo Gen-LTC, 2012.

ENERGIA EÓLICA: O QUE É, COMO FUNCIONA, VANTAGENS E DESVANTAGENS. Portal solar, 2023. Disponível em:
<<https://www.portalsolar.com.br/energia-eolica>>. Acesso em: 28, Jan de 2024

Energia eólica no Brasil: qual a sua importância. GNPW group, 2021. Disponível em:
<<https://www.gnpw.com.br/energia-pt/energia-eolica-no-brasil-qual-a-sua-importancia/>>.
Acesso em: 27, abril de 2023

GRACIONAL, Weidiorly; DE OLIVEIRA, Patrícia Beneti; DE MELO, Ângela Cristina Alves. **Energia renovável: desafios para sua implementação no Brasil**. Revista Terra & Cultura: Cadernos de Ensino e Pesquisa, v. 38, n. especial, p. 1226-1235, 2022.

HAWT AND VAWTS IN OPERATION MEDIUM.GIF. Wikimedia commons, 2010.
Disponível

em:<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HAWT_and_VAWTs_in_operation_medium.gif?uselang=pt-br>

IBERDROLA. **O que é uma turbina eólica e como funciona**. Disponível em: <<https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/pas-aerogeradores>>. Acesso em: 17 mar. 2024.

INATOMI, Thais Aya Hassan; UDAETA, Miguel Edgar Morales. **Análise dos impactos ambientais na produção de energia dentro do planejamento integrado de recursos**. Brasil Japão. Trabalhos, p. 189-205, 2005.

MARIN, Luiz Guilherme. **Análise integral de rotores eólicos verticais através da modelagem por tubos de corrente**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

PURIFICAÇÃO, L, S; FONTE, R, B, D. **ESTUDO DE TURBINAS EÓLICAS VERTICAIS COM EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO DE UMA TURBINA EÓLICA DARRIEUS PARA APLICAÇÃO EM EDIFÍCIOS**. 2012. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO, Vitória, 2012. Disponível em: <https://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/estudo_de_turbinas_eolicas_verticais_com_exemplo_de_dimensionamento_de_uma_turbina_eolica_darrieus_para_aplicacao_em_edificios.pdf>. Acesso em: 29 jan de 2024

Resolução CONAMA nº 001, de 23 de janeiro de 1986. Disponível em: <<https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=8902>>. Acesso em: 6 mar. 2024.

RIO GRANDE DO NORTE AVANÇA NA PRODUÇÃO DE ENERGIA EÓLICA. Além da energia, 2023. Disponível em: <<https://www.alemndaenergia.engie.com.br/rio-grande-do-norte-avanca-na-producao-de-energia-eolica/>>. Acesso em: 28, Jan de 2024

RN TEM POTENCIAL EÓLICO DUAS VEZES MAIOR QUE O ESTIMADO EM 2003. ABEEólica, 2022. disponível em: <<https://abeeolica.org.br/rn-tem-potencial-eolico-duas-vezes-maior-que-o-estimado-em-2003/>> . Acesso em: 27, abril de 2023

SEDEC. **Boletim Trimestral da Fonte Eólica, 2022**. disponível em: <<http://www.adcon.rn.gov.br/ACERVO/sedec/DOC/DOC000000000289518.PDF>>. Acesso em: 6, dez de 2023.

SEDEC, ASSECOM. **Atlas Eólico e solar do RN, 2022**. disponível em: <<http://www.adcon.rn.gov.br/ACERVO/sedec/DOC/DOC000000000298278.PDF>>. Acesso em: 15, mar de 2024

SQUAREZI FILHO, Alfeu; CARDOSO, J. C. **Energia eólica: tipos de geradores e conversores usados atualmente**. O Setor Elétrico-Espaço do IEEE, p. 160-161, 2014.

Statel Wind Turbine (8295293053). Wikimedia commons, 2012. Disponível em <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Statel_Wind_Turbine_\(8295293053\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Statel_Wind_Turbine_(8295293053).jpg)>. Acesso em: 07, fev de 2024

TERCIOTE, Ricardo. **Eficiência energética de um sistema eólico isolado**. Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural, 2002.

VOCÊ SABE COMO FUNCIONA UM AEROGERADOR. Neoenergia, 2021. Disponível em: <<https://www.neoenergia.com/w/voce-sabe-como-funciona-um-aerogerador->>. Acesso em: 27 de abril de 2023

WIND TURBINE ENERCON E-82 AT WIND PARK MAUSDORF. Wikimedia commons, 2020. Disponível em <<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=94292430>>. Acesso em: 29, jan de 2024