



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE CARAÚBAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

OSIAN MEYKSON BEZERRA SOARES

**ANÁLISE DE DADOS DOS VENTOS NA UFERSA CARAÚBAS UTILIZANDO A
LINGUAGEM PYTHON**

CARAÚBAS

2024

OSIAN MEYKSON BEZERRA SOARES

**ANÁLISE DE DADOS DOS VENTOS NA UFERSA CARAÚBAS UTILIZANDO A
LINGUAGEM PYTHON**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Antônio Alisson Alencar Freitas – UFERSA, Prof. Me.

Co-orientador: Rafael Luz Espindola – UFERSA, Prof. Dr.

CARAÚBAS

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.

S676a Soares, Osian Meykson Bezerra.
Análise de dados dos ventos na UFERSA Caraúbas
utilizando a linguagem python / Osian Meykson
Bezerra Soares. - 2024.
77 f. : il.

Orientador: Antônio Alisson Alencar Freitas.
Coorientador: Rafael Luz Espindola.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Elétrica, 2024.

1. energia eólica. 2. potência. 3. aerogerador.
4. vento. I. Alencar Freitas, Antônio Alisson,
orient. II. Luz Espindola, Rafael, co-orient.
III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

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.

OSIAN MEYKSON BEZERRA SOARES

**ANÁLISE DE DADOS DOS VENTOS NA UFERSA CARAÚBAS UTILIZANDO A
LINGUAGEM PYTHON**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Defendida em: 03/ 04 / 2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



ANTONIO ALISSON ALENCAR FREITAS

Data: 18/04/2024 15:03:18-0300

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

Antônio Alisson Alencar Freitas, Prof. Me. (UFERSA)

Documento assinado digitalmente



RAFAEL LUZ ESPINDOLA

Data: 10/04/2024 22:02:25-0300

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

Rafael Luz Espindola, Prof. Dr. (UFERSA)

Membro Examinador

Érica Mangueira Lima

Assinado de forma digital por Érica

Mangueira Lima

Dados: 2024.04.09 22:01:54 -03'00'

Érica Mangueira Lima, Prof. Dr. (UFERSA)

Membro Examinador

Documento assinado digitalmente



RODRIGO DE ALMEIDA COELHO

Data: 10/04/2024 19:40:50-0300

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

Rodrigo de Almeida Coelho, Prof. Dr. (UFERSA)

Membro Examinador

DEDICATÓRIA

*CASSIANA BEZERRA DA SILVA (In
Memoriam).*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre prover a força e a coragem necessária, para que eu pudesse continuar seguindo firme nesta jornada e completa-la. E que em meio as circunstâncias e adversidades sempre me manteve de pé, com uma fé inabalável.

Aos meus pais, Osami Ferreira Soares e Maria de Fátima Bezerra da Silva que sempre me incentivaram na busca pela educação e formação profissional, além de sempre garantirem os meios para a continuidade na minha vida acadêmica.

A minha irmã, Ozianny que sempre esteve ao meu lado, fazendo o possível para me ajudar em toda essa jornada.

A todos os meus familiares, por sempre torcerem e estarem junto comigo, em cada conquista da minha vida.

A todos os meus amigos, da residência universitária de Caraúbas, que se tornaram irmãos ao logo de todos esses anos de convívio, sempre me apoiando e ajudando.

A todos os meus professores da UFRSA, profissionais que impactaram diretamente na minha formação. Principalmente ao meu orientador Antônio Alisson e ao meu co-orientador Rafael Espindola, que aceitaram me orientar nesta jornada, agradeço pela disponibilidade em cada etapa desta jornada e por todo ensinamento conferido. E aos técnicos Alex Albert, Charles Augusto e Allyson Filgueira, por todos os ensinamentos e vivências passadas durante este período de experiência profissional e acadêmica nos laboratórios da Engenharia Elétrica.

ÉPIGRAFE

Não fui eu que lhe ordenei? Seja forte e corajoso! Não se apavore, nem se desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar".

Josué 1:9

RESUMO

Em todo o mundo o avanço das energias renováveis em substituição aos combustíveis fósseis é percebido, e em particular temos a energia eólica que em 2022 adicionou 77 GW de capacidade instalada. No Brasil, os últimos anos foram marcados pelo crescimento nos investimentos para a energia eólica, com uma capacidade instalada de 25,63 GW em 2022, o destaque é na região Nordeste, liderança em geração no país, em 2022 gerou 90,3% da energia pelos ventos. O estudo analisa os dados de vento na UFERSA Caraúbas ao longo de quatro anos, de 2020 a 2023, visando determinar a distribuição de frequência, pela extrapolação das velocidades de vento, e definir direção do vento na região. Também compara características de aerogeradores para selecionar o mais adequado ao projeto. Além disso, avalia a viabilidade econômica de instalar uma turbina eólica de pequeno porte, junto com usinas fotovoltaicas, formando um sistema híbrido eficiente e renovável. A escolha de uma turbina de 30 kW é justificada pelos resultados obtidos na análise, garantindo uma receita financeira de R\$ 14.356,02 em 2020, R\$ 23.109,09 em 2021, R\$ 14.687,41 em 2022 e R\$ 19.615,02 em 2023. Além disso, é feita uma comparação entre os sistemas eólico e solar, o aerogerador do estudo e as usinas fotovoltaicas da UFERSA Caraúbas, demonstrando que um sistema híbrido pode ser mais vantajoso financeiramente, especialmente pensando na autossuficiência energética da universidade. Dessa forma, o estudo demonstra a viabilidade da geração de energia eólica na região, destacando a importância de considerar abordagens híbridas para otimizar os benefícios financeiros e energéticos, com as usinas fotovoltaicas da universidade e um parque eólico com dez turbinas eólicas.

Palavras-chave: energia eólica; potência; aerogerador; vento.

ABSTRACT

All over the world, renewable energies are advancing to replace fossil fuels, and wind power, in particular, will add 77 GW of installed capacity in 2022. In Brazil, the last few years have been marked by growth in investment in wind energy, with an installed capacity of 25.63 GW in 2022. The highlight is the Northeast region, the country's leading generator, which in 2022 generated 90.3% of its energy from wind. The study analyzes wind data at UFERSA Caraúbas over four years, from 2020 to 2023, to determine the frequency distribution by extrapolating wind speeds and to define wind direction in the region. It also compares wind turbine characteristics to select the most suitable one for the project. It also assesses the economic viability of installing a small wind turbine alongside photovoltaic plants, forming an efficient and renewable hybrid system. The choice of a 30 kW turbine is justified by the results obtained in the analysis, guaranteeing financial revenue of R\$ 14,356.02 in 2020, R\$ 23,109.09 in 2021, R\$ 14,687.41 in 2022 and R\$ 19,615.02 in 2023. In addition, a comparison is made between wind and solar systems, the wind turbine in the study, and the photovoltaic plants at UFERSA Caraúbas, demonstrating that a hybrid system can be more financially advantageous, especially with the university's energy self-sufficiency in mind. In this way, the study evidences the viability of wind power generation in the region, highlighting the importance of considering hybrid approaches to optimize financial and energy benefits with the university's photovoltaic plants and a wind farm with ten wind turbines.

Keywords: wind energy; power; wind turbine; wind.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Adições anuais de capacidade instalada no mundo, 2013 – 2022	14
Figura 2 - Parte das adições anuais de capacidade nos países em desenvolvimento, 2013 – 2022	15
Figura 3 - Adições anuais de capacidade nos países em desenvolvimento, 2013 – 2022	15
Figura 4 - Capacidade instalada mundial de energia eólica, 2012-2022	16
Figura 5 - Dez principais geradores de energia eólica no mundo, 2022	17
Figura 6 - Matriz energética brasileira em 2022.....	18
Figura 7 - Matriz elétrica brasileira em 2022	18
Figura 8 - Capacidade instalada da geração eólica no Brasil, 2022	19
Figura 9 - Aerogerador de eixo horizontal	26
Figura 10 - Aerogerador de eixo vertical Darrieus.....	27
Figura 11 - Aerogerador de eixo vertical H-Darrieus.....	27
Figura 12 - Aerogerador de eixo vertical Savonius.....	28
Figura 13 - Diagrama de uma rosa dos ventos	31
Figura 14 - Alta Subtropical do Atlântico Sul e Norte.....	32
Figura 15 - Sazonalidade e velocidade do vento durante as quatro estações do ano	33
Figura 16 - Mapa de rugosidade aerodinâmica anual média do Rio Grande do Norte	34
Figura 17 - Estação Meteorológica Automática (EMA) - UFRSA campus Caraúbas.....	35
Figura 18 - Distribuição de frequência janeiro-março, 2020 (A), 2021 (B), 2022 (C) e 2023 (D)	37
Figura 19 - Distribuição de frequência abril-junho, 2020 (A), 2021 (B), 2022 (C) e 2023 (D)	38
Figura 20 - Distribuição de frequência julho-setembro, 2020 (A), 2021 (B), 2022 (C) e 2023 (D).....	39
Figura 21 - Distribuição de frequência outubro-dezembro, 2020 (A), 2021 (B), 2022 (C) e 2023 (D).....	40
Figura 22 - Distribuição de frequência anual, 2020 (A), 2021 (B), 2022 (C) e 2023 (D).....	41
Figura 23 - Curvas de potência dos aerogeradores.....	43
Figura 24 - Potência gerada anualmente por cada aerogerador.....	44
Figura 25 - Rosa dos ventos nos anos analisados.....	48
Figura 26 - Rosas dos ventos anual, velocidade x direção	49
Figura 27 - Análise financeira do sistema eólico	55

Figura 28 - Usina Caraúbas 01	56
Figura 29 - Usina Caraúbas 04	57
Figura 30 - Análise financeira das usinas fotovoltaicas	58
Figura 31 - Análise comparativa dos sistemas eólico e fotovoltaico	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos aerogeradores de pequeno porte	42
Tabela 2 - Geração de energia na ponta	43
Tabela 3 - Geração de energia fora da ponta	44
Tabela 4 - Fator de capacidade anual na ponta.....	46
Tabela 5 - Fator de capacidade anual fora de ponta	46
Tabela 6 - Tarifas TE e TUSD da UFERSA em 2020.....	50
Tabela 7 - Tarifas TE e TUSD da UFERSA em 2021.....	51
Tabela 8 - Tarifas TE e TUSD da UFERSA em 2022.....	51
Tabela 9 - Tarifas TE e TUSD da UFERSA em 2023.....	52
Tabela 10 - Balanço financeiro da geração eólica em 2020	53
Tabela 11 - Balanço financeiro da geração eólica em 2021	53
Tabela 12 - Balanço financeiro da geração eólica em 2022	54
Tabela 13 - Balanço financeiro da geração eólica em 2023	54
Tabela 14 - Especificações das usinas fotovoltaicas	56
Tabela 15 - Avaliação financeira das usinas em 2020 e 2021	57
Tabela 16 - Avaliação financeira das usinas em 2022 e 2023	58
Tabela 17 - Análise comparativa dos sistemas eólico e fotovoltaico	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo geral	19
1.2	Objetivos específicos.....	20
1.3	Resumo dos Capítulos	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1	O Vento e a Energia Eólica.....	22
2.2	Normalização	23
2.3	Tipos de Aerogeradores	24
2.3.1	Aerogeradores	24
2.3.2	Aerogeradores de Eixo Horizontal.....	25
2.3.3	Aerogeradores de Eixo Vertical.....	26
2.3.4	Aerogeradores de Pequeno Porte	28
2.4	Aplicações de sistemas eólicos	28
2.5	Análise das características do vento	29
2.5.1	Extrapolação da velocidade do vento	29
2.5.2	Direção do vento	30
3	ANÁLISE DO VENTO	32
3.1	Perfil do vento no Rio Grande do Norte.....	32
3.2	Análise dos dados dos ventos na UFERSA Caraúbas	34
3.3	Determinação da extrapolação da velocidade do vento e Distribuição de Frequência.....	35
3.4	Características dos Aerogeradores	41
3.5	Análise da Geração de Energia	43
3.6	Escolha do Aerogerador	45
3.7	Análise da Direção do Vento	47
4	ANÁLISE ECONÔMICA E FINANCEIRA	50
4.1	Balanço Financeiro da Geração Eólica	50
4.2	Balanço Financeiro da Geração Solar	55
4.3	Comparação entre os Sistemas Eólico e Fotovoltaico	59
5	CONCLUSÕES	61
5.1	Conclusões do Trabalho.....	61
5.2	Trabalhos Futuros.....	62

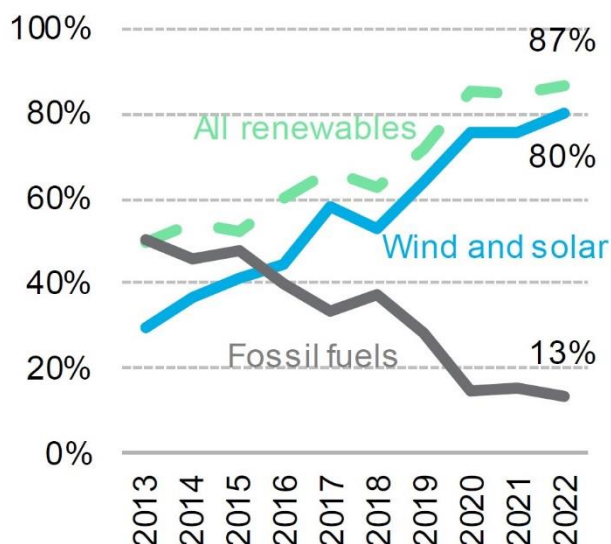
5.3	Agradecimentos	62
	REFERÊNCIAS	63
	APÊNDICE A – CÓDIGO EM PYTHON PARA A ANÁLISE DO VENTO E GERAÇÃO DE ENERGIA	66
	APÊNDICE B – CÓDIGO EM PYTHON PARA A ROSA DOS VENTO.....	76

1 INTRODUÇÃO

O ser humano vive em constante evolução e adaptação. No cenário atual, de efeito estufa com o aquecimento do planeta, ocasionado pelo crescimento exponencial de gases tóxicos na atmosfera terrestre. O nível desses gases e a temperatura da terra mantiveram-se equilibrados até a era industrial. Porém, com a emissão desenfreada de carvão, petróleo e do gás natural, ocasionaram os efeitos sentidos pela sociedade atual. Diante desse cenário, a energia eólica se torna uma fonte alternativa, renovável e limpa de energia (Lopez, 2012, p. 19-20).

O avanço das energias renováveis em todo o mundo tem sido significativo e, enquanto que os combustíveis fósseis mostram uma queda acentuada em suas adições de capacidade. Por consequência, em 2022 as fontes não renováveis registraram uma adição de apenas 13%, atingindo seu menor nível, quando comparado aos 50% atingidos no ano de 2013. Por sua vez, as energias renováveis corresponderam a 87% da capacidade adicionada em 2022, sendo lideradas pela energia eólica e solar, que juntas somaram 80% de capacidade. A Figura 1 ilustra um gráfico demonstrando o crescimento das energias renováveis de 2013 a 2022 (BloombergNEF, 2023, p. 17).

Figura 1 - Adições anuais de capacidade instalada no mundo, 2013 – 2022

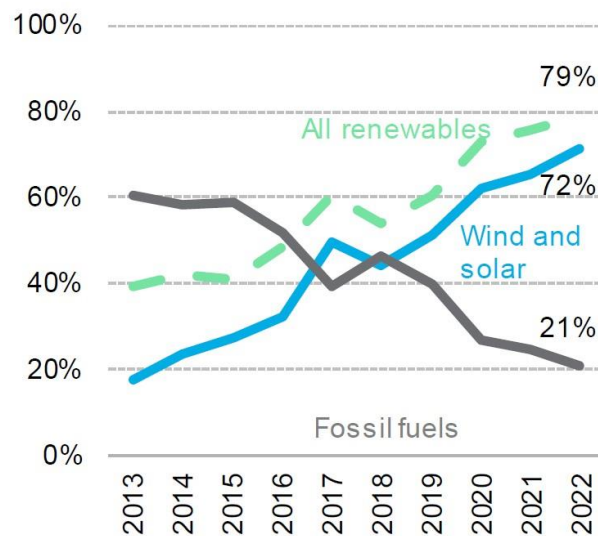


Fonte: BloombergNEF, 2023

Em 2022, os países em desenvolvimento adicionaram às suas redes cerca de 59 GW de capacidade a partir de combustíveis fósseis. Só o carvão foi responsável por cerca de 40 GW, um crescimento significativo, quando comparado com 2019 quando houve uma adição de 60

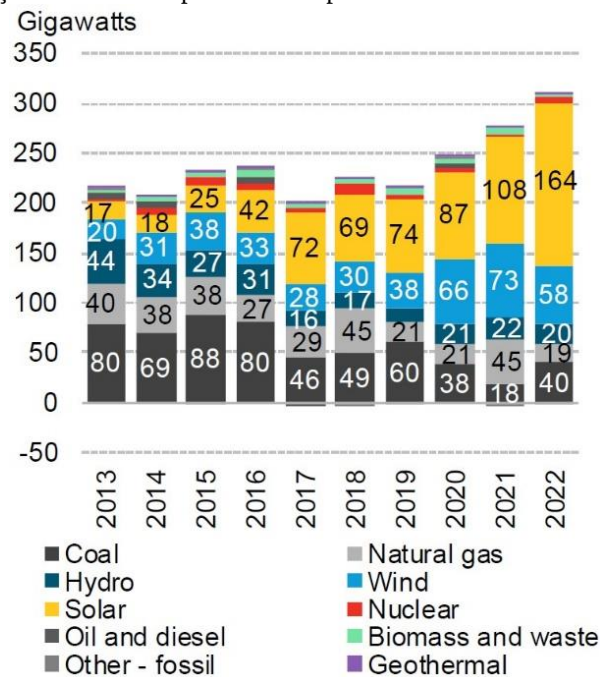
GW. Em um ano o aumento foi de 13% na capacidade dos países em desenvolvimento, atingindo em 2022 um acréscimo de 310 GW. No entanto, a energia solar e eólica são líderes nas adições, em que a energia solar adicionou cerca de 164 GW, 57% a mais quando comparado com 2021, e a energia eólica instalou 58 GW de capacidade em 2022 registrando queda, onde adicionou 73 GW no ano de 2021. As Figuras 2 e 3 expressam os dados apresentados (BloombergNEF, 2023, p. 19).

Figura 2 - Parte das adições anuais de capacidade nos países em desenvolvimento, 2013 – 2022



Fonte: BloombergNEF, 2023

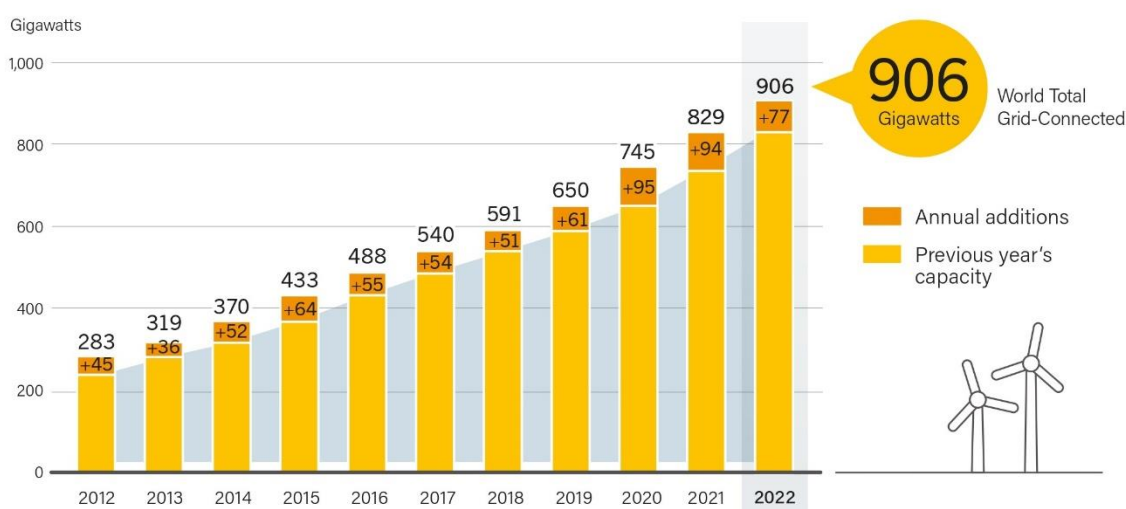
Figura 3 - Adições anuais de capacidade nos países em desenvolvimento, 2013 – 2022



Fonte: BloombergNEF, 2023

No mundo todo, o mercado de energia eólica continua a crescer consideravelmente. Em 2022, foi adicionado às redes de energia elétrica cerca de 77 GW de capacidade instalada, como visto na Figura 4 em que desse valor, 68,4 GW corresponde à geração *onshore* e 8,8 GW à *offshore*. Um aumento de 9% que levou a capacidade instalada mundial a 906 GW. Foi estimado que cerca de 89 GW foram instalados mecanicamente, ou seja, as máquinas foram montadas e testadas, mas nem todos os sistemas foram comissionados em 2022 (REN21, 2023, p. 77).

Figura 4 - Capacidade instalada mundial de energia eólica, 2012-2022



Fonte: REN21, 2023

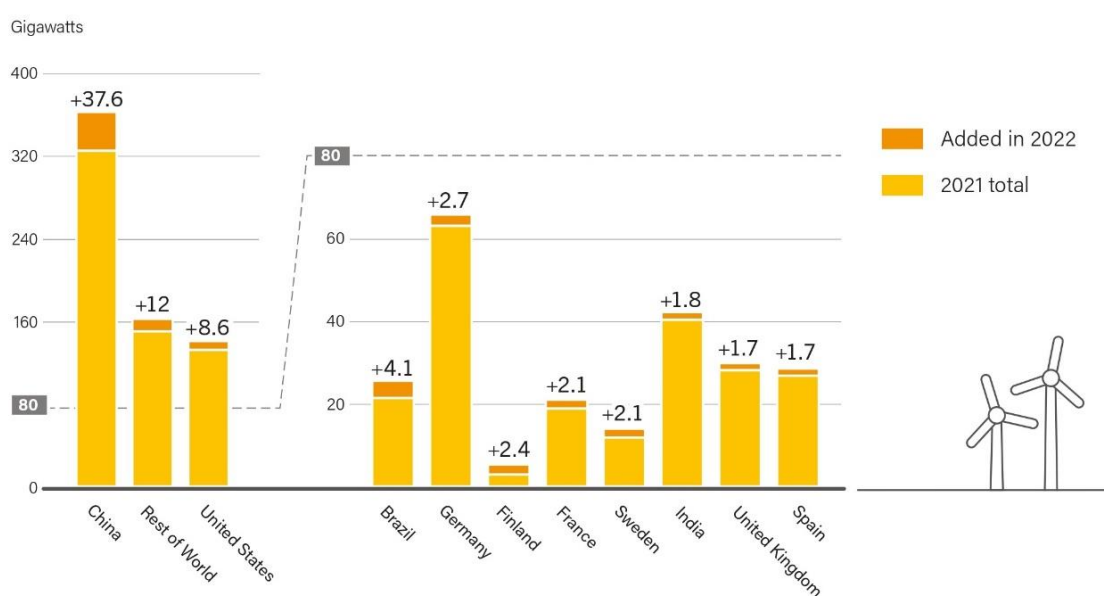
Segundo o relatório *Renewables Global Status Report* (REN21, 2023), houve um crescimento contínuo na capacidade instalada de energia renovável em 2022, marcando o terceiro ano consecutivo com adições acima de 70 GW. No entanto, em comparação com 2021, observa-se uma queda de cerca de 17% nas adições, principalmente devido à redução nas instalações na China e nos Estados Unidos. Por outro lado, na Europa, houve um aumento nas instalações durante o mesmo período. Os investimentos em novos projetos eólicos também registraram declínio em várias regiões, exceto na Ásia-Pacífico. Contudo, diversos países estão demonstrando interesse na instalação de energia eólica, e com o aumento nos preços dos combustíveis fósseis, estão contribuindo para o fortalecimento da competição no mercado de energias renováveis, gerando crescimento nesta indústria.

A pandemia de COVID-19, que teve início em 2020 e afetou globalmente diversos setores, também impactou negativamente o setor eólico. A paralisação das operações de fornecedores resultou em desafios logísticos significativos, aumentando os custos de envio de

dispositivos e equipamentos, causando atrasos nos projetos. Essas dificuldades também persistiram ao longo do ano de 2022 (REN21, 2023, p. 77).

No ano de 2022, novos parques eólicos foram colocados em operação em 45 países, em comparação com 52 países em 2021. Entre os países que lideram a produção de energia eólica estão China, Estados Unidos, Brasil, Alemanha, Finlândia, França, Suécia, Índia, Reino Unido e Espanha, a Figura 5 comprova as adições destas nações em 2022 e o total obtido em 2021 (REN21, 2023, p. 79).

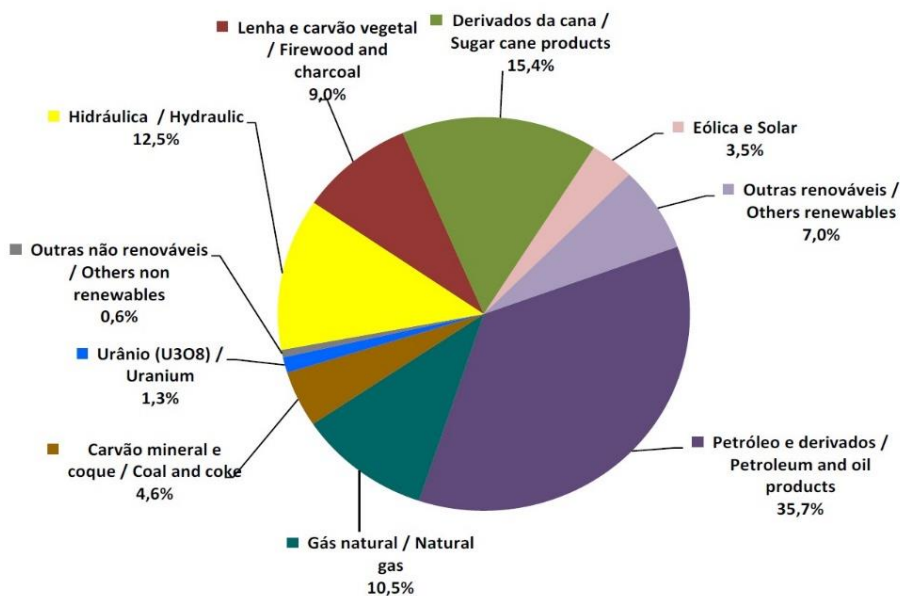
Figura 5 - Dez principais geradores de energia eólica no mundo, 2022



Fonte: REN21, 2023

De acordo com o Balanço Energético Nacional (EPE, 2023), em seu relatório referente ao ano de 2022, temos um crescimento na geração de energia elétrica por fontes renováveis no Brasil, chegando a cerca de 47,4% de nossa matriz energética (Figura 6). Através desses dados é visto o potencial brasileiro para a geração de energia a partir de fontes renováveis.

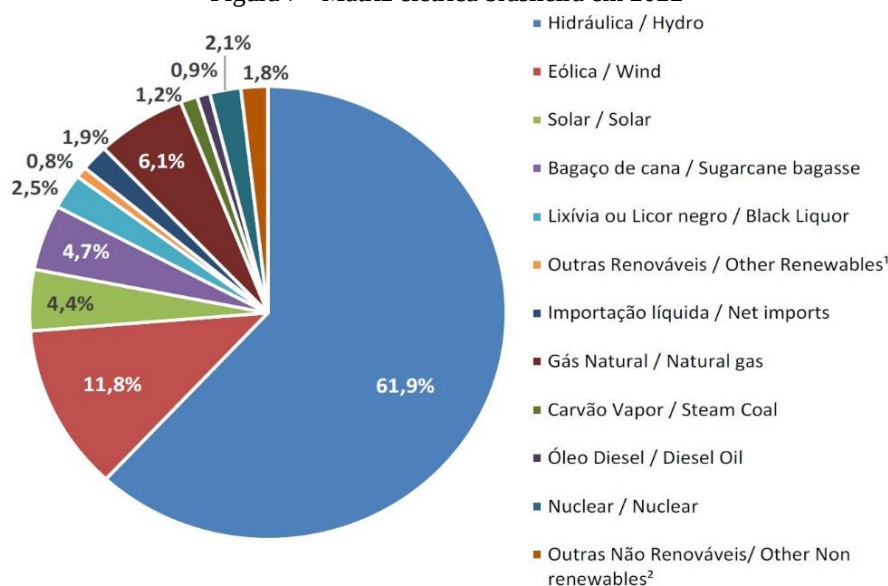
Figura 6 - Matriz energética brasileira em 2022



Fonte: EPE, 2023

No Brasil, as fontes renováveis de energia foram responsáveis por 88% da oferta interna de energia elétrica em 2022, tornando nossa matriz elétrica majoritariamente renovável. A energia hidrelétrica continua sendo a maior parcela da geração de energia com 61,9%, seguida pela energia eólica com 11,8%, como esclarece a Figura 7. No ano de 2022 a capacidade instalada total de produção de eletricidade do Brasil chegou a marca dos 189.127 MW, um aumento de 7.517 MW, contando com uma contribuição da energia eólica referente a 2.973 MW, que representa cerca de 40% do total de adições (EPE, 2023, p. 13-15).

Figura 7 - Matriz elétrica brasileira em 2022

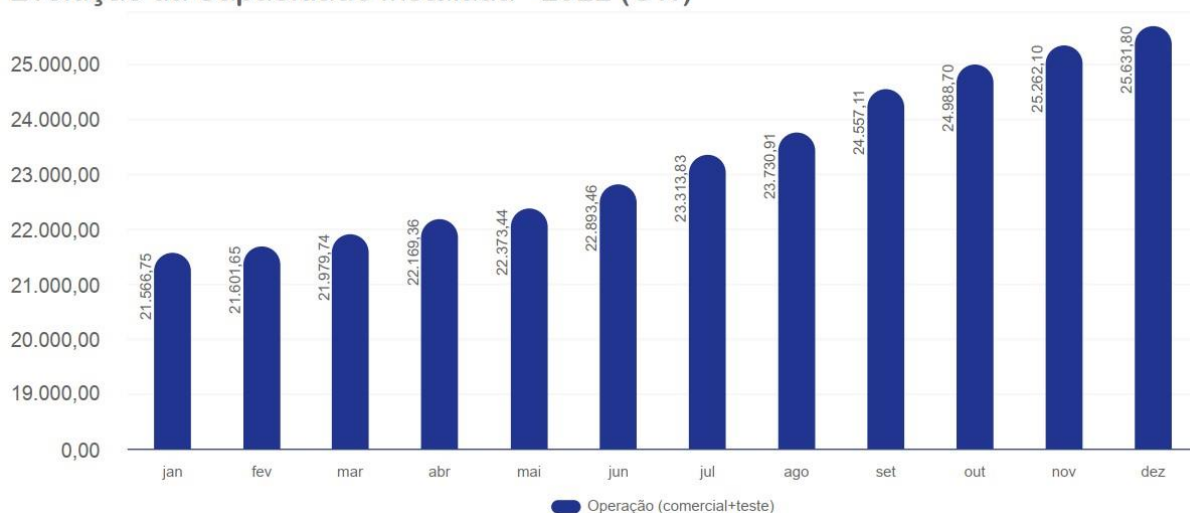


Fonte: EPE, 2023

A região nordeste brasileira tem sido o maior percentual de energia elétrica gerada por meio dos ventos no país. Em 2022, o Nordeste foi responsável por 90,3%. A geração chegou a 70,48 TWh, um aumento de aproximadamente 12% em comparação a 2021 com cerca de 63,20 TWh. Os estados brasileiros que mais geraram energia pelos ventos em 2022 foram estados nordestinos, entre eles a Bahia (24,17 TWh), o Rio Grande do Norte (23,20 TWh), o Piauí (10,29 TWh) e o Ceará (7,06 TWh) (ABEEÓLICA, 2023, p. 05-06).

Ao final de 2022 a capacidade total instalada, por fontes eólicas chegou a marca dos 25,63 GW, em que 24,12 GW (94,13%) são referentes a parques que já estão em funcionamento, e os 1,50 GW (5,87%) restantes correspondem aos que estão operando em fase de teste, a Figura 8 é um exemplo da evolução da capacidade instalada da geração eólica, ao longo de todo o ano de 2022 (ABEEÓLICA, 2023, p. 04).

Figura 8 - Capacidade instalada da geração eólica no Brasil, 2022
Evolução da Capacidade Instalada - 2022 (GW)



Fonte: ABEEÓLICA, 2023

No Brasil a micro e minigeração distribuída chegou à marca dos 18.423 GWh em 2022, isso referente a uma capacidade instalada de 17.325 MW, a energia eólica somou 46 GWh de energia gerada para máquinas de pequeno porte, desse total a região nordeste do país é responsável por 97,2% da energia gerada nessa categoria (EPE, 2023, p. 16, 112, 155).

1.1 Objetivo geral

O objetivo deste estudo é avaliar um projeto que visa implementar um microgerador eólico, utilizando os dados dos ventos da estação meteorológica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) campus Caraúbas.

1.2 Objetivos específicos

- Analisar os dados das condições de vento na universidade, que são coletados e armazenados através da estação meteorológica presente no campus;
- Definir a distribuição de frequência, a partir das velocidades de vento de quatro anos;
- Utilizar os dados da direção do vento do local. E analisar as características de aerogeradores de eixo horizontal e vertical;
- Realizar uma comparação entre máquinas com potências distintas e verificar o melhor aerogerador para o projeto proposto nesta pesquisa;
- Analisar a eficiência da geração de energia eólica no campus da UFERSA Caraúbas, considerando os dados específicos dos ventos da região;
- Com o aerogerador de pequeno porte selecionado, estimar a produção de energia elétrica no período estudado, assim como realizar uma análise financeira;
- Efetuar uma comparação entre os sistemas eólico e fotovoltaico, por meio da avaliação financeira da geração das usinas fotovoltaicas já presentes na universidade;
- E avaliar a viabilidade econômica da instalação de uma turbina eólica de pequeno porte, juntamente com as usinas fotovoltaicas, trabalhando com um sistema híbrido eficiente e renovável.

1.3 Resumo dos Capítulos

Os capítulos do presente trabalho foram separados da seguinte maneira: o capítulo 2 trata das características do vento na energia eólica, normas regulamentadoras, tipos de aerogeradores e diferentes análises pertinentes ao estudo. Também apresenta equacionamentos para análise das condições do vento para geração de energia. No capítulo 3 será conduzida a análise dos ventos, utilizando a extrapolação da velocidade do vento e a distribuição de frequência. São apresentadas as características do vento no Estado do Rio Grande do Norte e na universidade, com base nos dados do anemômetro da estação meteorológica automática. A pesquisa abrange a geração de energia em diferentes horários, na ponta e fora de ponta, a seleção do aerogerador mais adequado e uma análise da direção do vento no campus. O capítulo 4 aborda a realização de uma análise dos resultados financeiros do estudo de geração de energia na UFERSA campus Caraúbas, utilizando micro geração eólica, considerando as condições de vento para os diferentes horários do estudo. Após essa análise, é feita uma comparação entre a geração de energia das usinas fotovoltaicas da universidade e do aerogerador selecionado,

abrangendo os anos de 2020 a 2023. No capítulo 5, são expostas as conclusões alcançadas ao pelo estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo aborda as características do vento na energia eólica, a regulamentação para a instalação de Micro e Minigeradores, conforme estabelecido pelas autoridades competentes, juntamente com descrições das características dos diferentes tipos de aerogeradores, seja de eixo horizontal ou vertical, e os aerogeradores de pequeno porte. Além disso, são apresentados estudos com sistemas eólicos e fotovoltaicos e o equacionamento para a análise das condições do vento para a geração de energia.

2.1 O Vento e a Energia Eólica

As turbinas eólicas utilizam o vento como sua fonte para a geração de energia, sendo um recurso natural, essa energia é limpa e gratuita, mas não pode ser controlada nem armazenada, como acontece com a água nas barragens das usinas hidrelétricas. Além disso, a velocidade e direção do vento são imprevisíveis e dependem de vários fatores geográficos e climáticos, nas análises desse tipo de energia. Estudando a variação tanto da velocidade do vento quanto sua direção, podemos observar tal efeito de forma mais clara, a partir de uma rosa dos ventos. Cada fração da rosa dos ventos, indica com que frequência o vento se manifesta, e em qual direção específica isso acontece, revelando as direções principais (VIAN et al., 2021, p. 14).

A energia eólica hoje possui dois meios de geração de energia elétrica, ela pode ser *onshore* ou *offshore*, isso a depender das localidades de instalação dos aerogeradores. A *onshore* é caracterizada pela geração com as turbinas em terra, e na *offshore* a energia é produzida com os aerogeradores no mar (UDOP Energia que Inova, 2021).

Podemos classificar o sistema eólico em três tipos: os sistemas isolados, híbridos e interligados à rede. Os sistemas isolados são aplicados em pequena escala, são geralmente encontrados em áreas de difícil acesso para expansão da rede elétrica. Nos sistemas híbridos são utilizadas combinações de fontes de energia, como por exemplo a energia solar e a eólica. E os sistemas interligados à rede, como o próprio nome já diz, é um sistema de geração conectado diretamente a rede elétrica, o sistema mais usado por unidades geradoras (UDOP Energia que Inova, 2021).

2.2 Normalização

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) por meio da resolução normativa nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023, busca determinar as regras e exigências para a aquisição de sistemas de microgeração e minigeração de energia elétrica, assim como do sistema de compensação de energia elétrica, como exposto nos parágrafos a seguir.

XXIX-A - microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica que utilize fontes renováveis ou, conforme Resolução Normativa nº 1.031, de 26 de julho de 2022, de cogeração qualificada, conectada à rede de distribuição de energia elétrica por meio de unidade consumidora, da qual é considerada parte, que possua potência instalada em corrente alternada menor ou igual a 75 kW;”

XXIX-B - minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica que utilize fontes renováveis ou, conforme Resolução Normativa nº 1.031, de 26 de julho de 2022, de cogeração qualificada, conectada à rede de distribuição de energia elétrica por meio de unidade consumidora, da qual é considerada parte, que possua potência instalada em corrente alternada maior que 75 kW e menor ou igual a:

- a) 5 MW para as centrais geradoras de fontes despacháveis;
- b) 3 MW para as demais fontes não enquadradas como centrais geradoras de fontes despacháveis; ou
- c) 5 MW para unidades consumidoras já conectadas em 7 de janeiro de 2022 ou que protocolarem solicitação de orçamento de conexão, nos termos da Seção IX do Capítulo II do Título I, até 7 de janeiro de 2023, independentemente do enquadramento como centrais geradoras de fontes despacháveis.

XLV-A - Sistema de Compensação de Energia Elétrica - SCEE: sistema no qual a energia elétrica ativa é injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída na rede da distribuidora local, cedida a título de empréstimo gratuito e posteriormente utilizada para compensar o consumo de energia elétrica ativa ou contabilizada como crédito de energia de unidades consumidoras participantes do sistema.” (NR) (ANEEL, 2023, p. 03).

A Companhia Energética do Rio Grande do Norte (Cosern), como concessionária de energia elétrica, também traz sua regulamentação acerca dos sistemas de microgeração e minigeração no estado. Segundo a DIS-NOR-031 de Conexão de Microgeradores ao Sistema de Distribuição, temos as disposições a seguir.

6.1 Acessada

Distribuidora em cujo sistema elétrico o acessante conecta suas instalações próprias.

6.16 Microgeração distribuída

Central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de

distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (NEOENERGIA COSERN, 2020a, p. 04-05).

Segundo a DIS-NOR-033 de Conexão de Minigeradores ao Sistema de Distribuição, temos as disposições a seguir.

6.1 Rede de Distribuição Primária

Toda linha do sistema da Distribuidora que opera em média tensão;

6.8 Minigeração Distribuída

Central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para fontes com base em energia solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (NEOENERGIA COSERN, 2020b, p. 03-04).

2.3 Tipos de Aerogeradores

2.3.1 Aerogeradores

Aerogeradores são dispositivos que convertem a energia cinética dos ventos em energia elétrica. Na estrutura dessas máquinas, a turbina eólica desempenha um papel crucial ao transmitir a energia mecânica gerada pelo vento para o eixo, movimentando assim o gerador. Este último realiza a conversão da energia mecânica em energia elétrica. Além desses elementos, outros componentes essenciais incluem transmissão, controle, conversor e sistema de armazenamento (Lopez, 2012, p. 115).

O aerogerador inicia seu funcionamento quando a corrente de ar atravessa o rotor, composto pelo cubo e pelas pás, movimentando-as e convertendo a energia cinética em energia mecânica. Essa transformação ocorre no eixo da máquina, que pode ser tanto horizontal quanto vertical. A transmissão trabalha nesta máquina transferindo a energia mecânica do eixo do rotor para o gerador, onde é gerada a energia elétrica. Para garantir a velocidade ideal, a transmissão utiliza engrenagens para aumentar a velocidade angular do rotor. Sensores, como os de vento e de rotação do rotor, são empregados no controle para assegurar um funcionamento equilibrado e otimizar a eficiência da geração de energia eólica. Em sistemas conectados à rede elétrica, podem ser utilizados tanto geradores síncronos quanto assíncronos (Lopez, 2012, p. 116).

O pioneiro na automatização de turbinas eólicas foi Charles Brush (1849-1929), que desenvolveu o primeiro modelo em 1888. Essa turbina tinha um diâmetro de 17 metros, 144 pás de madeira e uma potência de 12 kW. Ficou em operação por 20 anos, conectada a um

sistema de baterias. Poul la Cour (1846-1908) contribuiu significativamente para a modernização dos modelos aerodinâmicos de turbinas eólicas. Ele construiu um túnel de vento para realizar experimentos e observou que reduzir o número de pás do rotor tornava a máquina mais rápida e eficiente na geração de energia elétrica. Atualmente, os aerogeradores são fabricados em modelos de eixo horizontal e vertical, podendo ter duas, três ou mais pás (Lopez, 2012, p. 67).

No Brasil a geração de energia eólica teve seu marco inicial no ano de 1992, com a instalação da primeira turbina eólica na ilha de Fernando de Noronha, caracterizado como um sistema isolado, mas o país não conduziu conforme o restante do mundo na geração por meio das turbinas eólicas. Foi através do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA) em 2002, que essa fonte de energia passou a receber a atenção significativa para sua concretização. Embora o programa tenha enfrentado desafios, como preços altos e com as prorrogações nos prazos das instalações, ele obteve êxito possibilitando a introdução desse tipo de tecnologia no Brasil, e estimulando o desenvolvimento dos fornecedores, fabricantes, instaladores e outros agentes da indústria (VIAN et al., 2021, p. 13).

Entre os aerogeradores, há dois tipos no mercado para diferentes aplicações: os de eixo horizontal e de eixo vertical. Essas máquinas são diferentes quanto a seus rotores: em relação ao custo de fabricação, suas respectivas eficiências, e em relação a velocidade do vento para a geração de energia (Neoenergia, 2021).

2.3.2 Aerogeradores de Eixo Horizontal

Os aerogeradores de eixo horizontal (Figura 9) são os modelos mais utilizados no mercado, isso devido à sua eficiência superior, o que compensa seu alto custo. São caracterizados por seus rotores de multipás, os de 2 e de 3 pás. Os que possuem 3 pás são rotores empregados na produção em larga escala de energia, estas máquinas são impulsionadas pela força de sustentação e destacam-se por possuírem uma maior resistência ao ar, contribuindo para aumentar sua eficácia (Neoenergia, 2021).

Figura 9 - Aerogerador de eixo horizontal



Fonte: Neoenergia, 2021

O aerogerador de eixo horizontal opera com base em uma premissa aerodinâmica essencial. O fluxo de vento percorre a superfície de sustentação da pá, onde a velocidade na parte superior é maior, criando uma região de pressão mais baixa nessa área. A diferença de pressão entre as superfícies superior e inferior resulta em uma força denominada elevação. Com os avanços tecnológicos na indústria eólica, as turbinas se tornaram mais eficientes na captação da energia do vento. Nesse sentido, duas forças principais atuam no rotor: o arrasto, que é perpendicular à força de elevação e paralelo ao fluxo de vento, e o empuxo, que é perpendicular ao fluxo de vento (Lopez, 2012, p. 71).

2.3.3 Aerogeradores de Eixo Vertical

As turbinas eólicas verticais são preferencialmente empregadas devido ao seu desempenho superior em ventos turbulentos e à emissão reduzida de ruído quando comparadas às turbinas de eixo horizontal. Além disso, a estética dessas turbinas pode ser mais atraente, tornando-as mais adequadas para áreas urbanas ou semiurbanas. Essas razões tornam os aerogeradores verticais mais apropriados para esses ambientes (EÓLICA FÁCIL, 2023).

2.3.3.1 Aerogerador Darrieus

As turbinas Darrieus são caracterizadas por sua aerodinâmica equivalente às das asas dos aviões. Essa tecnologia permite o suporte que faz as pás girarem produzindo energia. Este tipo de aerogerador possui mais eficiência quando comparado com o modelo Savonius, as Figuras 10 e 11 mostra o aerogerador de eixo vertical Darrieus (EÓLICA FÁCIL, 2023).

Figura 10 - Aerogerador de eixo vertical Darrieus



Fonte: EÓLICA FÁCIL, 2023

Figura 11 - Aerogerador de eixo vertical H-Darrieus



Fonte: OAK Energia, 2020

2.3.3.2 Aerogerador Savonius

As máquinas do tipo Savonius (Figura 12) funcionam através da força de arrasto, com isso esses aerogeradores se movimentam com a pressão do ar sobreposta em suas pás. Esse modelo se destaca por ser mais barato e por possuir uma velocidade inicial mais baixa para o funcionamento, mas quando comparada com outros aerogeradores, este tem uma eficiência menor (EÓLICA FÁCIL, 2023).

Figura 12 - Aerogerador de eixo vertical Savonius



Fonte: EÓLICA FÁCIL, 2023

2.3.4 Aerogeradores de Pequeno Porte

As turbinas de pequeno porte, sofreram modificações ao longo do tempo, isso devido ao avanço tecnológico, especialmente com a chegada das grandes turbinas *off-shore*, a serem instaladas no mar. De acordo com o padrão IEC, os aerogeradores de pequeno porte têm potência inferior a 100 kW, e são aplicados sobretudo em sistemas de energia isolados e também na geração distribuída. Nos sistemas isolados, possui aplicações no fornecimento de energia elétrica para fazendas e comunidades, se destacando por ser um substituto a forma tipicamente usada da geração a diesel. Na geração distribuída, esses tipos de aerogeradores não são tão comuns, pois hoje em dia os custos com essa tecnologia ainda são bastante altos (VIAN et al., 2021, p. 22).

2.4 Aplicações de sistemas eólicos

Foi conduzida uma avaliação de um sistema híbrido em uma comunidade localizada no município de Touros-RN, que integra fontes renováveis de energia eólica e solar. Este sistema está conectado à rede de distribuição e conta com módulos fotovoltaicos com capacidade de geração de 50 kW e um aerogerador de 24 metros, com potência de 10 kW, proporcionando eficiência e economia (MATEUS; TAPIA, 2020, p. 4-9).

Na Revista Inovação, Tecnologia e Sustentabilidade na Engenharia Elétrica, é descrita uma análise de um sistema que inclui um protótipo de aerogerador e módulos fotovoltaicos. Este sistema foi concebido para operar *off-grid*, atendendo a necessidades energéticas de uma residência. Além disso, o sistema é composto por baterias e um controlador responsável por administrar a geração de energia, supervisionando o carregamento das baterias e injetando energia na rede de distribuição conforme necessário (LIMA; GOUVEIA; OLIVEIRA, 2018, p. 188-198).

Em outro estudo foi avaliado, a viabilidade da instalação de um micro aerogerador na cidade de Curitiba/PR, visando a complementação do consumo de energia elétrica do campus Ecoville da UTFPR Curitiba a partir de uma pesquisa bibliográfica sobre a fonte eólica e a geração distribuída. Em seguida, um estudo para a implementação dos aerogeradores de pequeno porte. E uma análise da viabilidade da instalação desse micro aerogerador no campus do Ecoville da UTFPR, avaliando os aspectos técnicos, econômicos e ambientais (FONSECA; RAMALHO, 2018, p. 17).

2.5 Análise das características do vento

Na análise das características do vento é observado a velocidade do vento para a realização do dimensionamento do aerogerador, assim como os dados referentes a direção do vento no local estudado, técnicas para se conseguir resultados efetivos na geração de energia, como proposto por este trabalho.

2.5.1 Extrapolação da velocidade do vento

Apesar da existência de diversas abordagens para se prever um perfil de vento logarítmico, temos como exemplo a teoria do comprimento de mistura, teoria da viscosidade de Foucault ou a teoria da similaridade. Considerando o comprimento de mistura dado por Wortman (1982) e utilizando a teoria do comprimento de mistura de Prandtl, é traçada uma equação frequentemente chamada de perfil logarítmico do vento. A lei logarítmica é o princípio mais utilizado para se extrapolar a velocidade do vento de uma determinada altura tida como referência, para outra altura desejada, empregando a seguinte relação da Equação (1) (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009, p. 45-46).

$$\frac{V(z)}{V(z_r)} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)} \quad (1)$$

Isolando o $V(z)$ ao se passar o $V(z_r)$ para o outro lado da Equação (1), teremos a Equação (2) como mostrado a seguir.

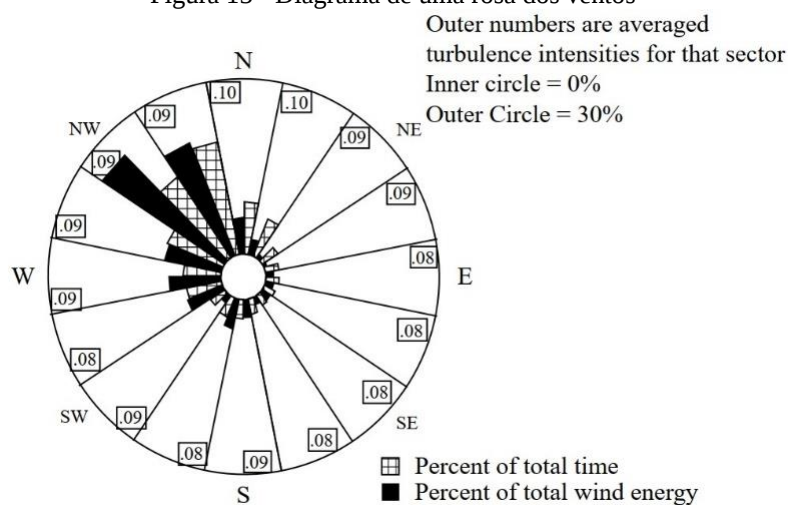
$$V(z) = V(z_r) \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)} [m/s] \quad (2)$$

Nas equações acima temos alguns parâmetros a entender, o $V(z_r)$ é a velocidade encontrada na altura de referência em metros por segundo, essa altura de referência é representada por Z_r em metros, e Z representa a altura que será submetida a extrapolação em metros e Z_0 o comprimento da rugosidade em metros, um valor tabelado e já conhecido de acordo com o terreno da análise. Esses parâmetros vão esboçar o valor da velocidade extrapolada, sendo representada por $V(z)$.

2.5.2 Direção do vento

A rosa dos ventos é um diagrama bastante utilizado na análise dos ventos, ela mostra a distribuição temporal da direção e velocidade do vento para um local específico, uma ótima ferramenta para estudos com dados de um anemômetro. Ela consiste em círculos concêntricos espaçados de forma equivalente, possui 16 linhas radiais também espaçados de forma equivalente, representando pontos da bússola (Figura 13). As linhas são proporcionais à frequência do vento em cada direção, com as mais longas indicando direções predominantes. Esse diagrama é comumente utilizado para representar dados anuais, sazonais ou mensais do vento (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009, p. 83).

Figura 13 - Diagrama de uma rosa dos ventos



Fonte: MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009

O diagrama da rosa dos ventos é formado por alguns elementos que explicam as características da região de estudo, determinadas rosas possuem oito direções: norte, sul, leste, oeste, nordeste, noroeste, sudeste e sudoeste, por outro lado temos rosas dos ventos com 16 direções também. O gráfico possui pequenas barras que partem do centro do círculo em direção as bordas, indicando a direção das rajadas de vento e de onde elas vêm. Cada barra possui uma cor diferente, representando uma velocidade específica do vento, geralmente essa variação da velocidade é representada na legenda, na ponta da barra estão caracterizadas as maiores velocidades registradas, em contrapartida no meio ao centro do círculo estão retratadas as menores velocidades (WIKIHOW, 2024).

Os círculos concêntricos presentes no diagrama da rosa dos ventos, ajudam a estabelecer a duração da corrente de vento sob as condições específicas do local. À medida que esses círculos se movem do centro do diagrama, eles desempenham um papel semelhante ao de uma fita métrica, onde cada círculo representa uma porcentagem ou período de tempo distinto. Dessa forma, o comprimento gerado entre os anéis, indica a duração de tempo em que a corrente de vento agiu para uma faixa específica de velocidade (WIKIHOW, 2024).

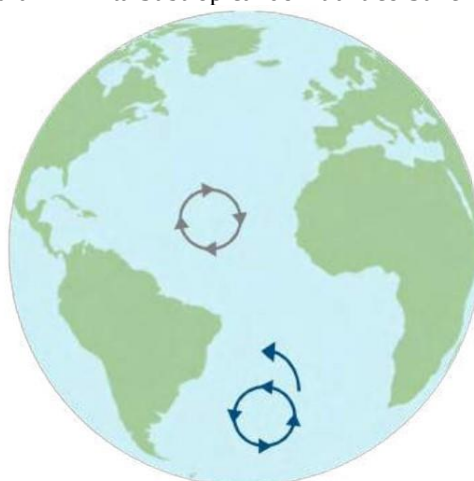
3 ANÁLISE DO VENTO

Neste capítulo será apresentado a análise dos ventos a partir da metodologia da extrapolação da velocidade do vento e a distribuição de frequência. As Características das condições de vento no Estado do Rio Grande do Norte e da UFERSA campus Caraúbas, por meio dos dados de velocidade e direção do vento, que são armazenados pelo anemômetro da estação meteorológica automática da universidade. A pesquisa para a geração de energia foi realizada para horários fora de ponta, em que a tarifa elétrica é cobrada com um preço normal devido a demanda ser regular, e na ponta quando a tarifa tem um valor mais alto, que é o resultado da concentração de pessoas utilizando mais energia elétrica num determinado horário do dia, além do estudo para a seleção do aerogerador e uma verificação a respeito da direção do vento no campus universitário.

3.1 Perfil do vento no Rio Grande do Norte

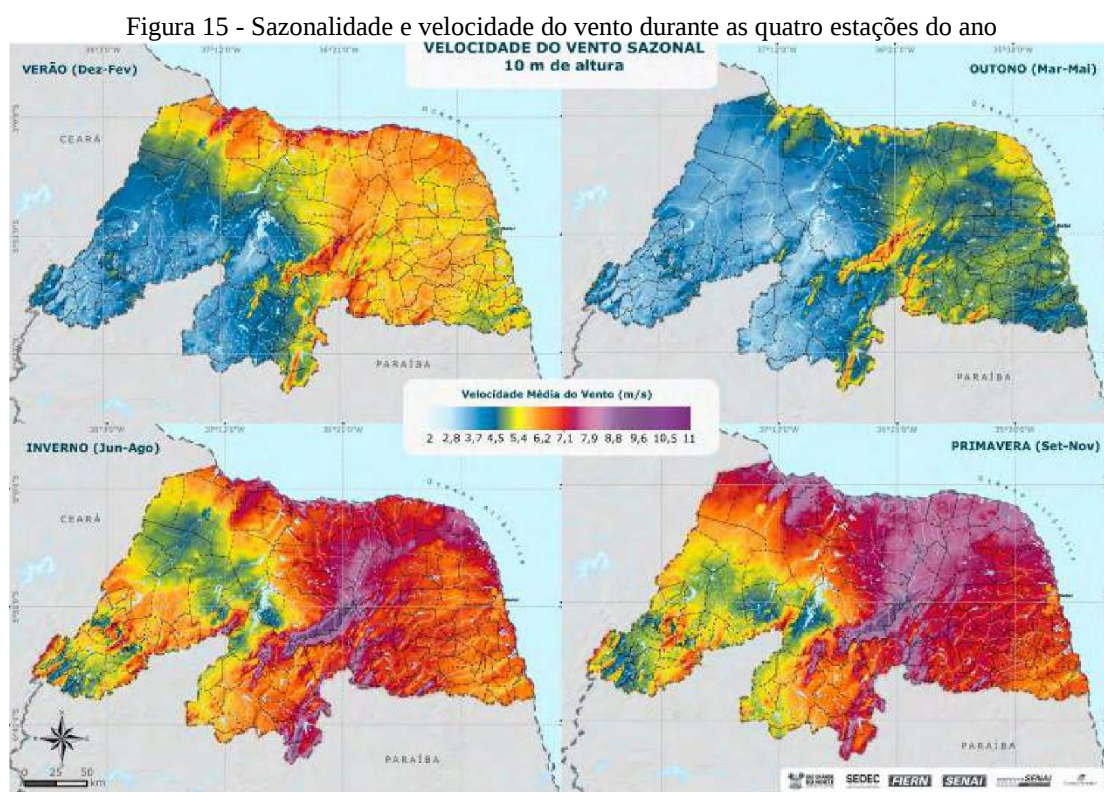
O Estado do Rio Grande do Norte, é uma das unidades federativas do Brasil com uma posição territorial privilegiada para a utilização da energia eólica. Por fazer parte da região Nordeste do país e estar próximo da linha do equador, este Estado se encontra em uma área de concentração dos ventos alísios, ventos que são fortes e intensos, o que os torna ideais para a geração de energia eólica em grande escala. Na Figura 14 está representado a alta subtropical do Atlântico Sul (em azul) e a alta subtropical do Atlântico Norte (em cinza), revelando o movimento e as direções dos ventos que chegam ao Estado (RIO GRANDE DO NORTE, 2022, p. 57).

Figura 14 - Alta Subtropical do Atlântico Sul e Norte



Fonte: RIO GRANDE DO NORTE, 2022

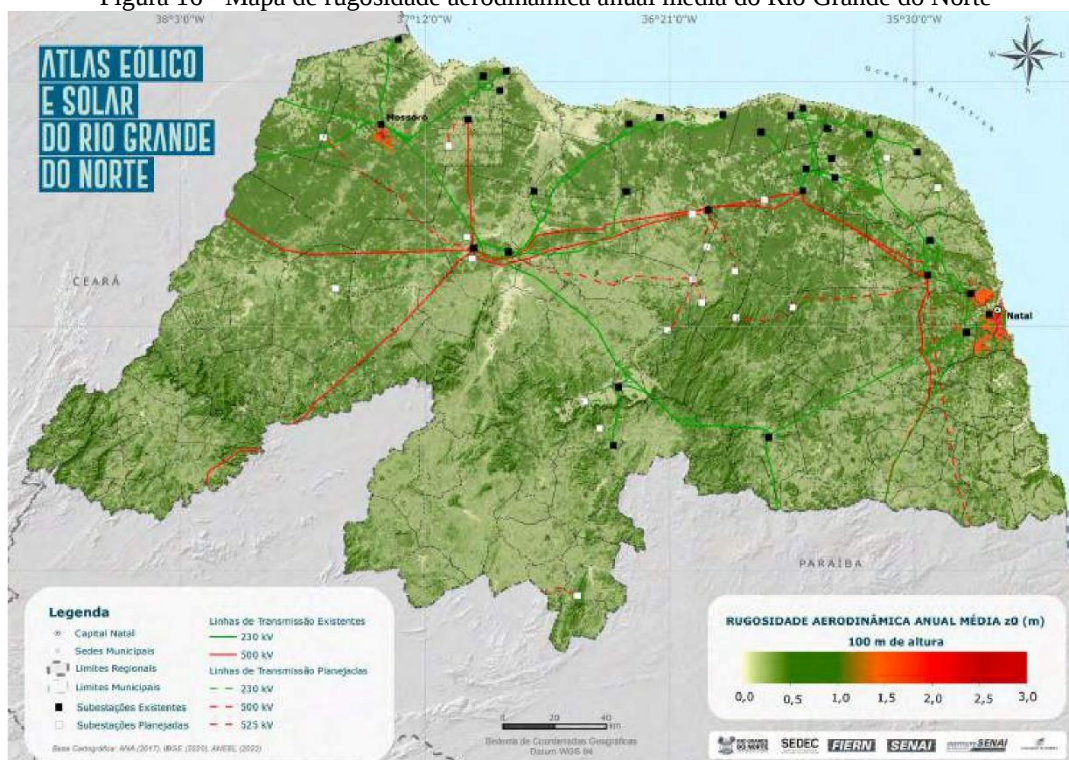
No Rio Grande do Norte, os ventos exibem uma sazonalidade bem estabelecida. Os ventos com mais intensidade são vistos durante as estações de inverno e primavera, que ocorrem de agosto a novembro. Por outro lado, entre as estações do verão e outono, nos meses de fevereiro a maio, os ventos possuem baixa intensidade. Durante o outono, que é um período chuvoso no estado em virtude da aproximação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), são observados os menores valores de velocidade do vento (RIO GRANDE DO NORTE, 2022, p. 57). A Figura 15 caracteriza as 4 estações do ano no Rio Grande do Norte, detalhando a sazonalidade dos ventos e a variação da velocidade média do vento ao longo do ano.



Fonte: RIO GRANDE DO NORTE, 2022

A rugosidade do terreno é uma característica essencial na modelagem em microescala. Também pode ser chamada de rugosidade aerodinâmica. Esse parâmetro foi desenvolvido a partir de condições de contorno, aspectos termodinâmicos da atmosfera e sua interação com a superfície. A rugosidade é estabelecida por meio da altura, espaçamento e características dos componentes situados na superfície terrestre (RIO GRANDE DO NORTE, 2022, p. 105-106). A Figura 16 retrata o mapa de rugosidade aerodinâmica anual média do Rio Grande do Norte.

Figura 16 - Mapa de rugosidade aerodinâmica anual média do Rio Grande do Norte



Fonte: RIO GRANDE DO NORTE, 2022

A rugosidade aerodinâmica para uma determinada localidade, é constituída por espécies de vegetações rasteiras, árvores, arbustos e construções de pequeno porte no terreno, esses elementos contribuem para a formação de uma resistência ao fluxo do vento, desviando sua direção e gerando agitação na região. A rugosidade pode ser definida a partir da altura e de como os componentes da região estão distribuídos, no qual sua densidade e a altura impactam diretamente na determinação deste parâmetro (DUTRA, 2001, p. 171).

3.2 Análise dos dados dos ventos na UFERSA Caraúbas

Para este estudo os dados utilizados, são o resultado do trabalho da Estação Meteorológica Automática (EMA) da UFERSA Caraúbas, que se encontra em funcionamento desde 2019, instalada próxima de uma das usinas fotovoltaicas do campus, entre as centrais de aulas 1 e 2 (UFERSA, 2019). A EMA registra diversos dados climáticos, entre eles podemos citar: temperatura do ar, velocidade do vento, radiação solar, direção do vento, umidade relativa e chuva. O anemômetro presente na estação é responsável pela medição da velocidade do vento, registrando os dados coletados sempre em intervalos de 5 minutos, todas as informações medidas são direcionadas a uma plataforma da universidade, para o armazenamento e

disponibilidades desses dados (HOBOLINK, 2024). A Figura 17 apresenta a EMA do campus Caraúbas.

Figura 17 - Estação Meteorológica Automática (EMA) - UFERSA campus Caraúbas



Fonte: Autoria própria, 2024

No presente trabalho foram utilizadas medições do anemômetro, para a observação das características do vento por um período de 4 anos, dessa forma a pesquisa abrange os anos de 2020, 2021, 2022 e 2023. Foram elaboradas análises mensais, trimestrais e anuais, por meio das condições de vento, determinar a geração de energia eólica.

3.3 Determinação da extrapolação da velocidade do vento e Distribuição de Frequência

A partir dos dados registrados pelo anemômetro, referente a velocidades de vento nos anos de 2020, 2021, 2022 e 2023, foi possível dar início à análise dos ventos. A determinação da extrapolação de velocidade do vento foi executada segundo a lei logarítmica (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009). Considerando o anemômetro a aproximadamente 2 metros de altura como referência, a extrapolação foi realizada para uma altura de 25 metros, em que tal altura foi definida para a torre da máquina deste estudo. A rugosidade do terreno foi estipulada conforme o mapa da Figura 16, que expressa a rugosidade para todo o Estado do Rio Grande do Norte, para a região do município de Caraúbas chegou-se a uma rugosidade de 0,03 metros.

Com base nos dados, deu-se a execução dos cálculos de extrapolação. Levando em conta as velocidades extrapoladas, foi realizado a determinação da distribuição de frequência, definindo os intervalos das velocidades extrapoladas de 0 até 15 metros por segundo, cada intervalo de velocidade registrada possui uma quantidade específica de dados, assim foi dividido cada intervalo pela quantidade total dos dados.

A análise foi determinada em horários de ponta, intervalo de tempo no nosso dia a dia das 17:30 às 20:29:59 horas (NEOENERGIA COSERN, 2024), em que a tarifa de energia elétrica é mais alta, isso devido à alta demanda energética nesse período do dia, quando as pessoas estão voltando pra casa, depois de um dia de trabalho, ou outras atividades, além de vários setores da indústria que permanecem operando. E em horários fora de ponta, das 20:30 às 17:29:59 horas (NEOENERGIA COSERN, 2024), em que essa tarifa é mais barata, são horas do dia com uma demanda de energia regular. Todos os cálculos realizados neste trabalho foram executados com o auxílio da IDLE Python 3.11, utilizando a linguagem de programação Python para a modelagem, o Apêndice A expressa o código desenvolvido para os cálculos e gráficos.

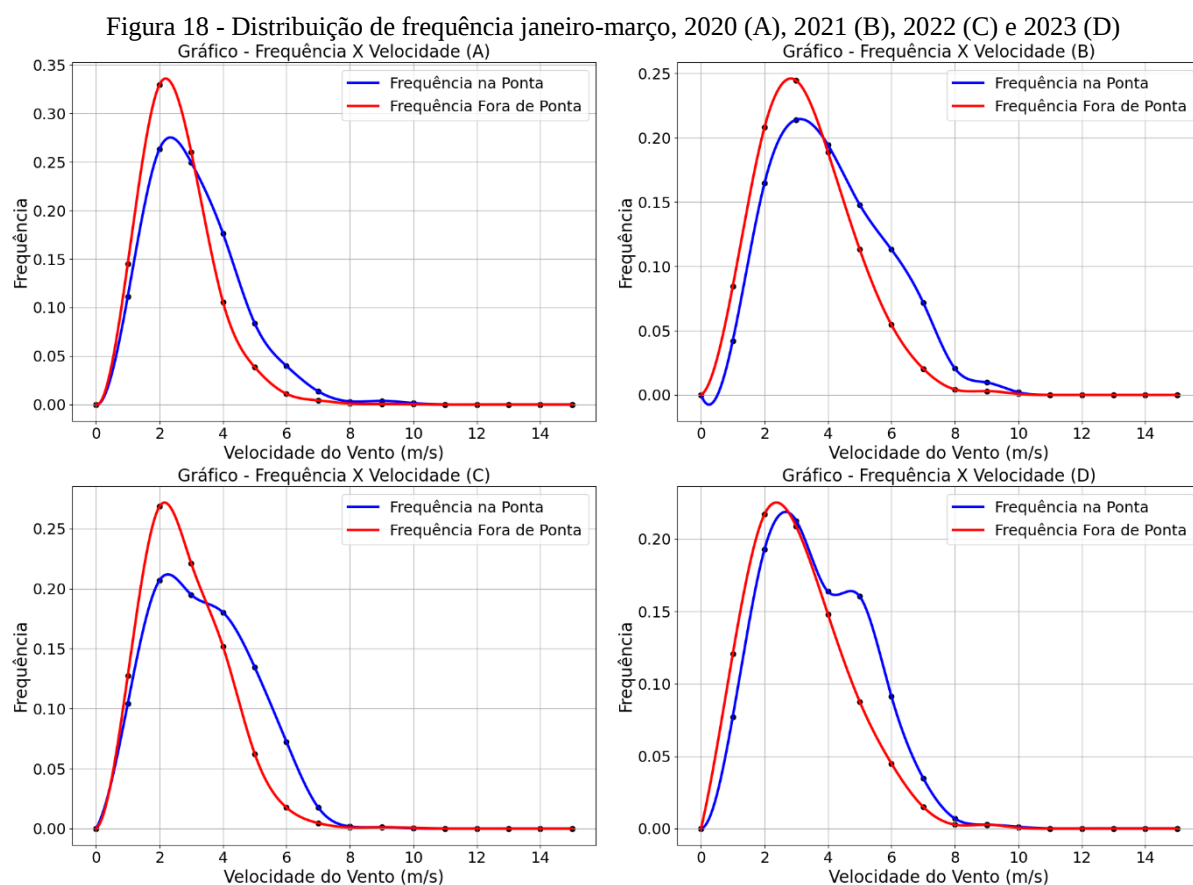
A linguagem de programação Python se destaca por sua interpretação acessível, a interatividade com o programador e sua orientação a objetos. Além disso, ela apresenta recursos diversos como: tipagem dinâmica, módulos, exceções e tipos de dados dinâmicos de alto nível. A linguagem possui uma sintaxe simples, o que facilita o processo de desenvolvimento e proporciona aos desenvolvedores mais eficiência no momento de criação dos códigos para diferentes aplicações (PYTHON, 2024).

O Python dispõe de interfaces que disponibilizam uma variedade de chamadas e bibliotecas do seu sistema, bem como para diversos sistemas de janelas, sendo capaz de se estender utilizando linguagens como C ou C++. A linguagem Python também é frequentemente aplicada como uma linguagem de extensão, com a finalidade de dar suporte a aplicativos que necessitam de uma interface programável, podendo ser executado em diversas no Linux, Mac e também no Windows, o que o torna altamente portátil (PYTHON, 2024).

A linguagem Python possui uma biblioteca consideravelmente abrangente, possibilitando uma diversidade de recursos para o desenvolvedor programar. Esta biblioteca possui módulos escritos em C permitindo acesso as diferentes funcionalidades do sistema, entre elas as operações de entrada e saída de arquivos, o que geralmente seria um problema para programar no Python, ela também dispõe de módulos escritos em Python que oferecem uma resolução padronizada de diversos problemas que possam surgir no cotidiano de muitos programadores, no desenvolvimento dos projetos em que estejam trabalhando (PYTHON, 2024).

Considerando os dados alcançados, a distribuição de frequência pôde ser representada graficamente, com a distribuição de frequência para horários de ponta e para horários fora de ponta, dados levantados para os quatro anos estudados, sendo mostrado resultados da distribuição de frequência trimestralmente e anualmente.

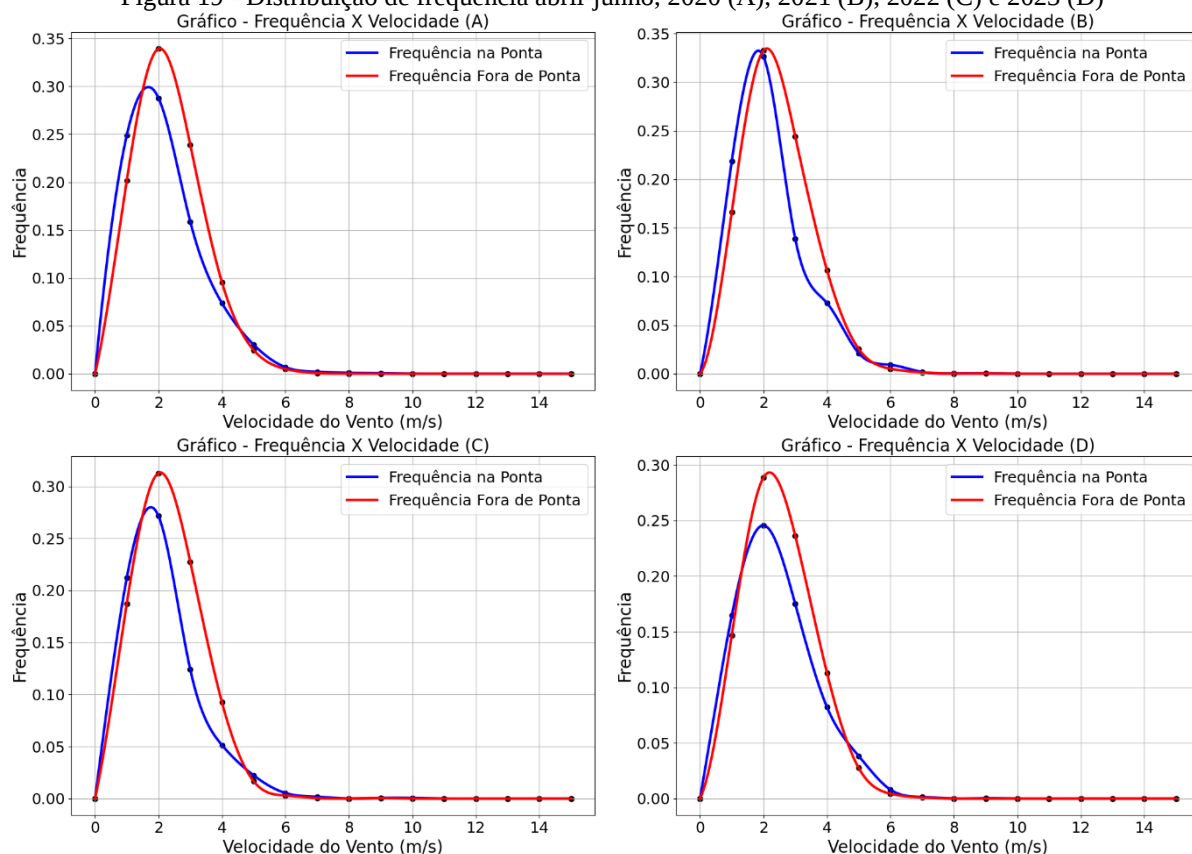
A Figura 18 esboça a distribuição de frequência de janeiro a março, nos gráficos vemos o efeito sazonal entre os anos estudados, na qual as curvas de 2020 e 2022 se assemelham bastante, mas com valores distintos, fato também visto para 2021 e 2023. Os horários fora da ponta concentram os picos de frequência, mas por sua vez a frequência na ponta se distribui atingindo uma faixa de altas velocidades favorecendo a geração.



Fonte: Autoria própria, 2024

Na Figura 19 encontramos dados a respeito do segundo trimestre, nesse período acontece um recuo nas curvas dos gráficos, mostrando que a distribuição de frequência diminui, ou seja, ventos menos intensos. Esse efeito é explicado pela sazonalidade dos ventos na região para o outono, época do ano com concentração de chuvas devido o Estado estar próximo a ZCIT, provocando a diminuição da velocidade dos ventos conforme mostra o mapa da Figura 15.

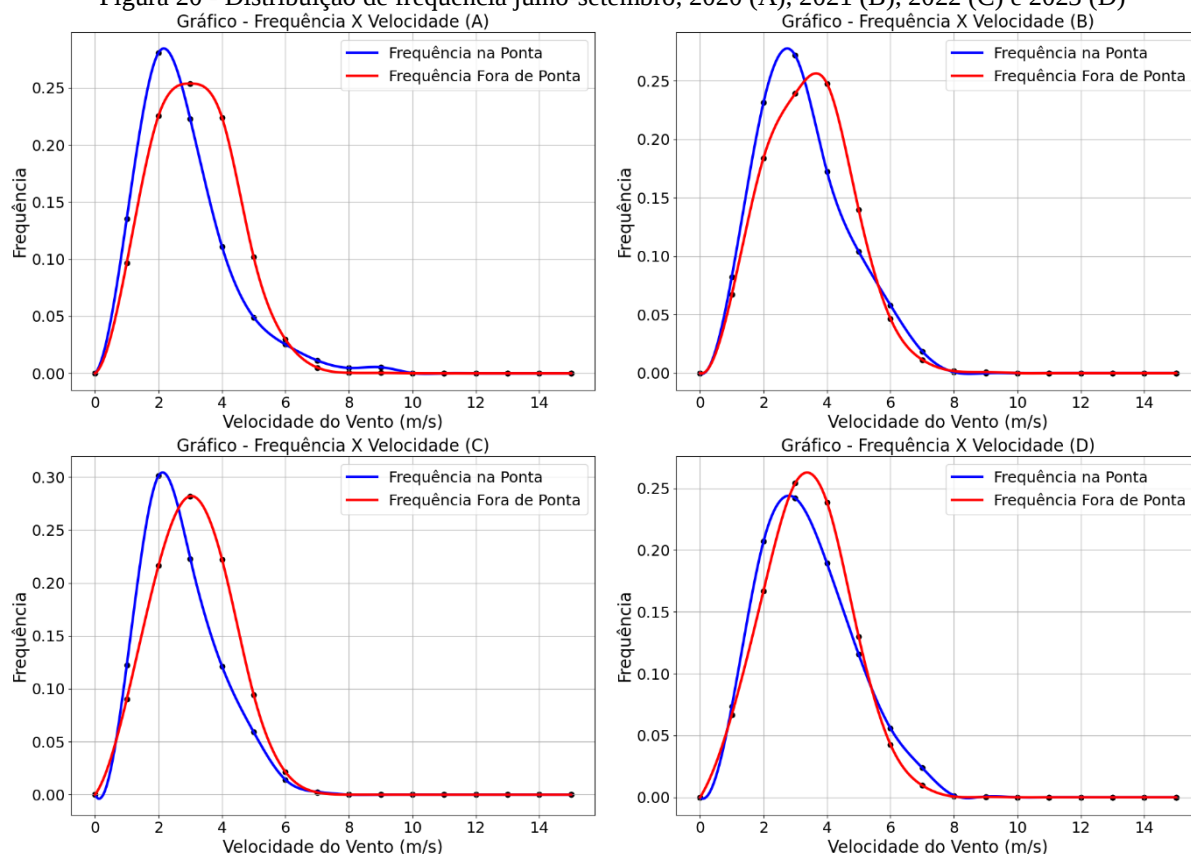
Figura 19 - Distribuição de frequência abril-junho, 2020 (A), 2021 (B), 2022 (C) e 2023 (D)



Fonte: Autoria própria, 2024

O terceiro trimestre demonstra como os picos de frequência na ponta se sobrepõem aos picos da distribuição de frequência fora da ponta, conforme a Figura 20 demonstra isso para os três primeiros anos de estudo, em 2023 não se repetiu este fato. Observa-se através dos gráficos um aumento da frequência de ventos para velocidades maiores, quando comparado com o trimestre anterior, isso devido a chegada o inverno, que para a região é período de ventos fortes.

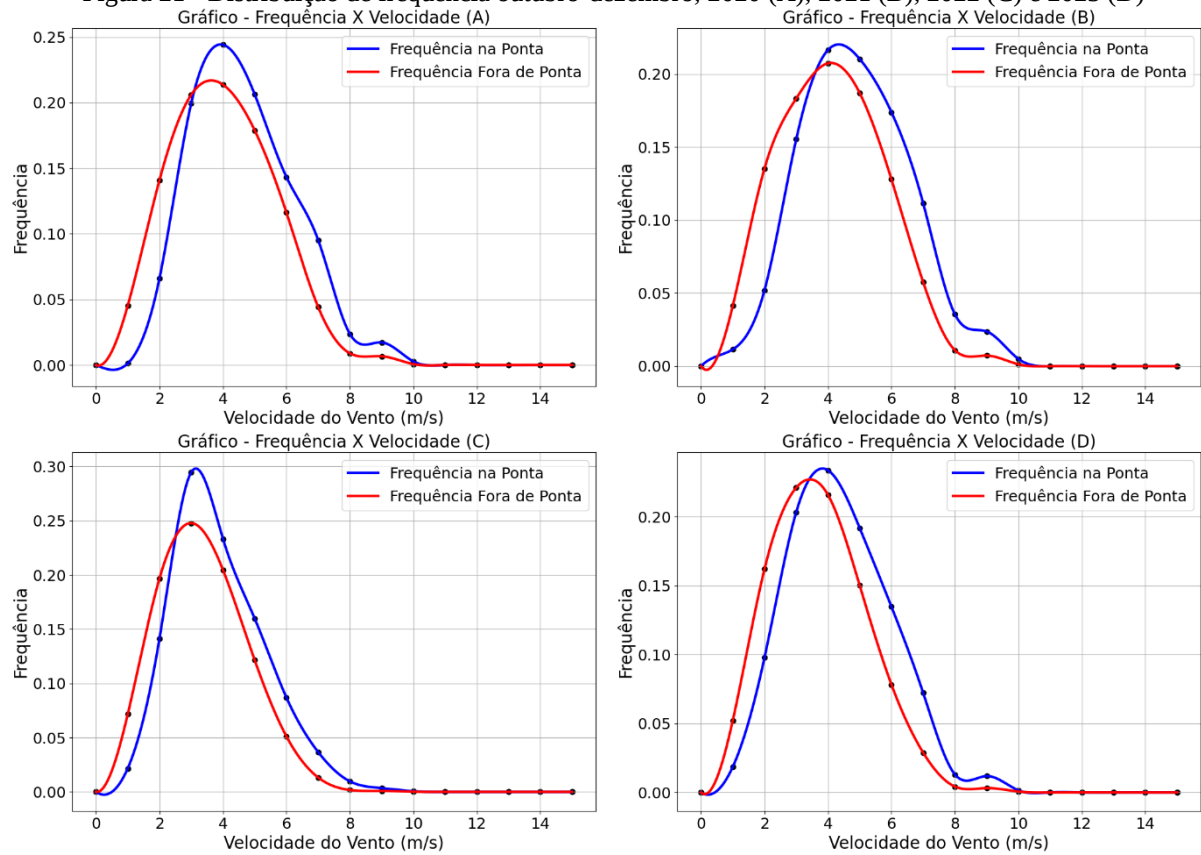
Figura 20 - Distribuição de frequência julho-setembro, 2020 (A), 2021 (B), 2022 (C) e 2023 (D)



Fonte: Autoria própria, 2024

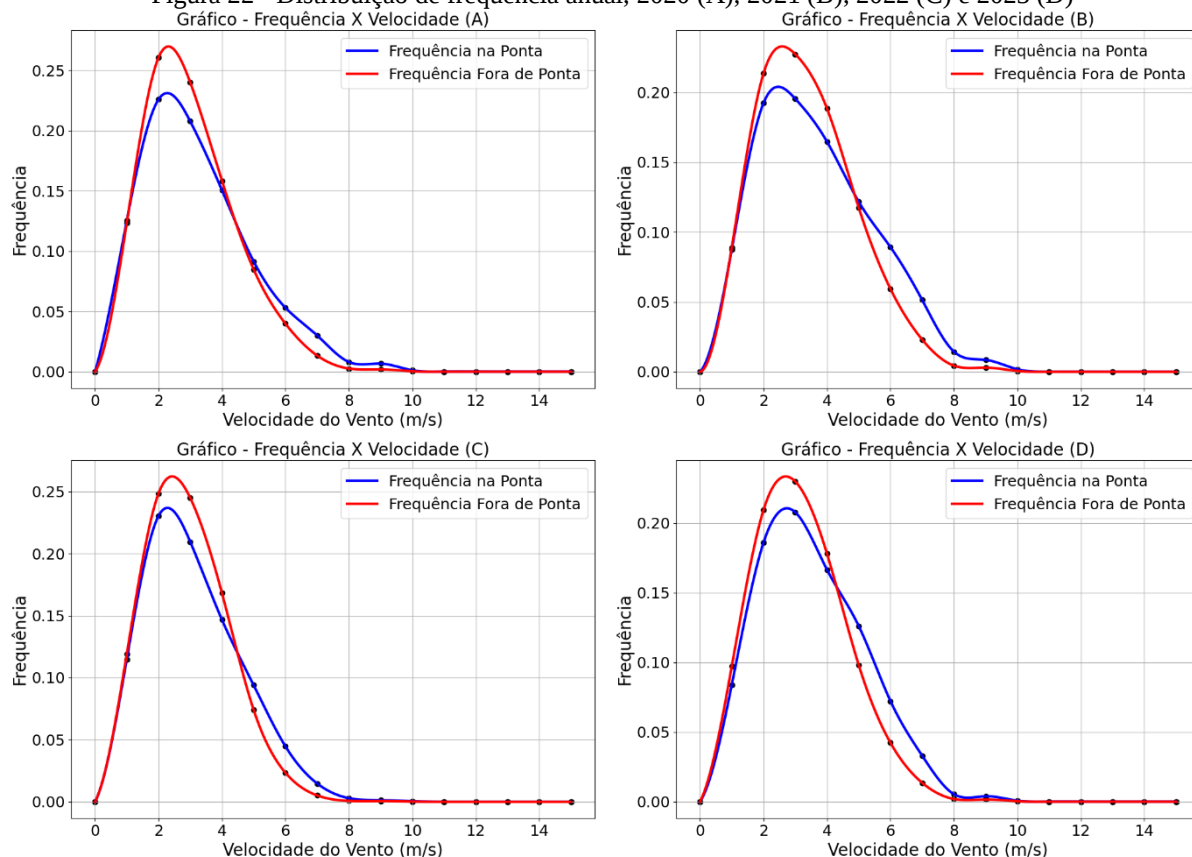
Nos meses de outubro a dezembro, o desempenho da distribuição de frequência é superior quando comparado com os outros trimestres. A Figura 21 possui um fator importante a ser analisado, no qual o pico de frequência na ponta é maior em relação aos horários fora da ponta, nos quatro anos da pesquisa, mostrando velocidades mais intensas num horário do dia com alta tarifa. Isso revela o potencial de geração em relação ao retorno financeiro, vale ressaltar que esse é o período de primavera, possuindo ventos mais fortes.

Figura 21 - Distribuição de frequência outubro-dezembro, 2020 (A), 2021 (B), 2022 (C) e 2023 (D)



Além das análises trimestrais realizadas, a distribuição de frequência anual foi representada graficamente conforme a Figura 22.

Figura 22 - Distribuição de frequência anual, 2020 (A), 2021 (B), 2022 (C) e 2023 (D)



Fonte: Autoria própria, 2024

Na Figura 22, está apresentado a distribuição de frequência dos ventos para os anos pesquisados, sendo característica a superação dos picos em horários fora de ponta, em comparação com os picos de frequência na ponta. É importante ressaltar o padrão que as curvas nos gráficos adotam ao longo da faixa de velocidades, para os anos de 2020 e 2022 foi demonstrado que a frequência de ventos teve velocidades mais baixas, quando comparado com os anos de 2021 e 2023, período que mostrou ventos mais fortes e com velocidades mais altas para a geração de energia, evidenciando um efeito sazonal dos ventos na região da UFERSA Caraúbas.

3.4 Características dos Aero geradores

Considerando a regulamentação através da resolução normativa nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023 - (ANEEL), para a utilização de aerogeradores de pequeno porte no Brasil, foram aplicadas cinco máquinas de distintas potências para a análise de geração de energia, e com isso determinar o aerogerador para este projeto. Os modelos ELV-H16.5– 50kW, ELV-H13.2 – 30 kW, ELV-H13.2– 20kW, ELV-H8.0– 10kW (ELETROVENTO ENERGIA

ALTERNATIVA, 2024) e a máquina Nordtank 65 kW (ANJOS, 2004). Na Tabela 1, estão representados os valores referentes a especificações técnicas das turbinas eólicas utilizadas neste estudo.

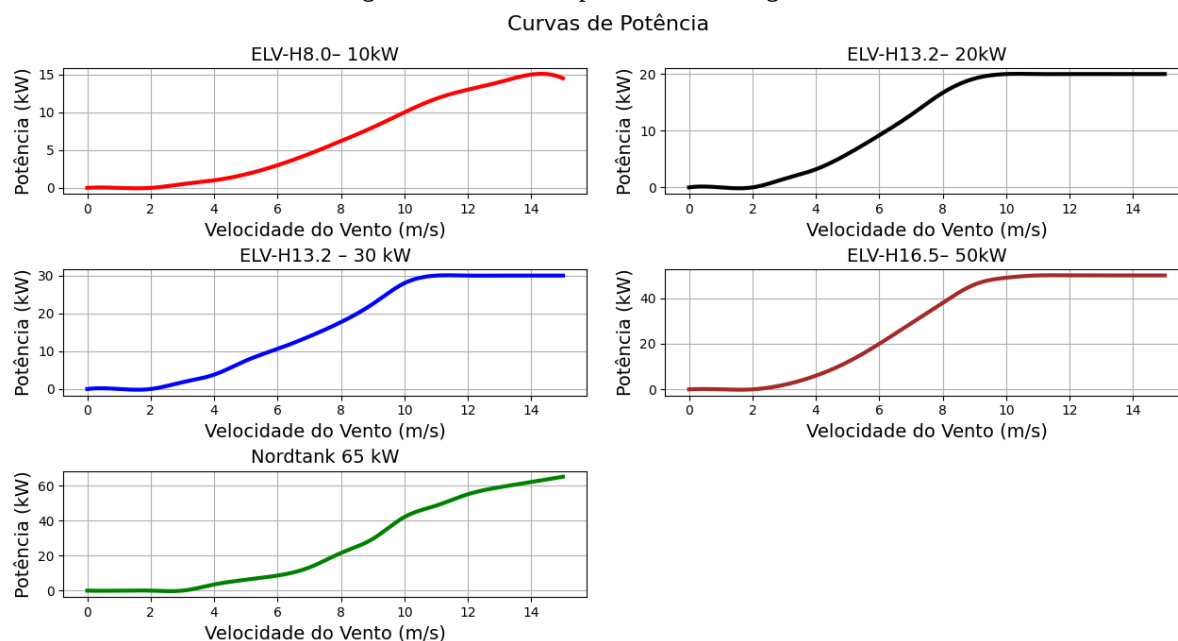
Tabela 1 - Características dos aerogeradores de pequeno porte

Características	Aerogeradores				
	ELV-H8.0– 10kW	ELV-H13.2– 20kW	ELV-H13.2 – 30 kW	ELV-H16.5– 50kW	Nordtank 65 kW
Diâmetro do Rotor (m)	8	13,2	13,2	17	16,45
Potência Nominal (kW)	10	20	30	50	65
Potência Máxima (kW)	15	20	30	50	68
Velocidade de Partida (m/s)	3	3	3	3	4
Velocidade Nominal (m/s)	10	10	11	11	15
Faixa da Velocidade de Operação (m/s)	3-25	3-25	3-25	3-25	4-25
Peso no Topo da Torre (kg)	708	940	940	4.000	5.706

Fonte: ELETROVENTO ENERGIA ALTERNATIVA, 2024 e ANJOS, 2004

Cada turbina eólica estudada possui uma potência específica numa faixa de velocidade de funcionamento, determinando a geração a partir das condições de evento. Para os modelos ELV-H16.5– 50kW, ELV-H13.2 – 30 kW, ELV-H13.2– 20kW, ELV-H8.0– 10kW da empresa Eletrovento Energia Alternativa, as curvas de potência foram determinadas com base nos gráficos disponibilizados através do site da empresa, considerando esses gráficos foram estimados os valores referentes as curvas de potência dessas máquinas conforme a velocidade. Por meio do trabalho de Anjos (2004) foi definida a curva de potência do modelo Nordtank 65 kW, utilizando assim os dados que foram encontrados nesta pesquisa. Na Figura 23 estão esboçados os gráficos referentes as curvas de potência dos aerogeradores de pequeno porte analisados neste trabalho, variando sob uma velocidade de vento de 0 a 15 m/s.

Figura 23 - Curvas de potência dos aerogeradores



Fonte: Autoria própria, 2024

3.5 Análise da Geração de Energia

Para a escolha da turbina eólica deste projeto, a análise da geração de energia é fundamental, é por meio dela que será possível comparar os modelos selecionados e indicar qual o mais pertinente. A produção de energia elétrica por meio destas máquinas pode ser calculada pelo produto entre a curva de potência de cada aerogerador pela distribuição de frequência dos ventos que foi determinada. Esse procedimento possibilita a determinação do quanto de energia pode ser gerada levando em conta os dados acerca dos ventos examinados, e em relação aos anos de pesquisa. A execução dos cálculos ocorreu para horários de pico e fora de pico, variando a velocidade do vento entre 0 e 15 metros por segundo, conforme o código do Apêndice A. As soluções encontradas estão dispostas de forma anual e para cada aerogerador, como exposto pelas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Geração de energia na ponta

Aerogeradores	Potência gerada em 2020 (kWh/ano)	Potência gerada em 2021 (kWh/ano)	Potência gerada em 2022 (kWh/ano)	Potência gerada em 2023 (kWh/ano)
Nordtank 65 kW	2.594,319	3.740,118	1.960,840	2.935,925
ELV-H16.5- 50kW	5.505,796	7.825,280	4.308,648	6.294,530
ELV-H13.2- 30kW	3.222,497	4.434,729	2.636,708	3.701,289
ELV-H13.2- 20kW	2.733,638	3.787,784	2.209,654	3.126,018
ELV-H8.0- 10kW	908,684	1.266,481	714,908	1.022,945

Fonte: Autoria própria, 2024

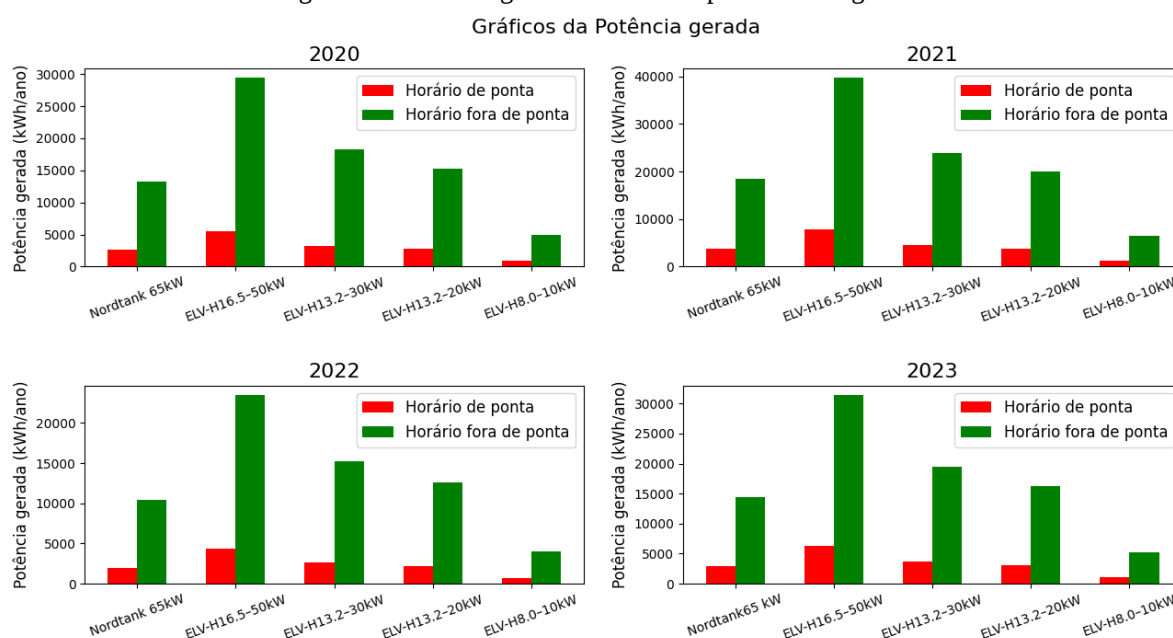
Tabela 3 - Geração de energia fora da ponta

Aerogeradores	Potência gerada em 2020 (kWh/ano)	Potência gerada em 2021 (kWh/ano)	Potência gerada em 2022 (kWh/ano)	Potência gerada em 2023 (kWh/ano)
Nordtank 65 kW	13.228,486	18.454,837	10.401,890	14.354,760
ELV-H16.5– 50kW	29.428,056	39.710,202	23.504,945	31.442,443
ELV-H13.2– 30kW	18.236,987	23.884,077	15.213,336	19.468,532
ELV-H13.2– 20kW	15.284,983	20.078,935	12.644,121	16.276,929
ELV-H8.0– 10kW	4.951,831	6.529,200	4.047,580	5.247,141

Fonte: Autoria própria, 2024

Por meio da Figura 24, temos uma análise gráfica da potência gerada no período de tempo estudado, nela encontramos de forma didática e visual o desempenho de cada turbina eólica de pequeno porte, sendo demonstrada para os horários de ponta e fora da ponta.

Figura 24 - Potência gerada anualmente por cada aerogerador



Fonte: Autoria própria, 2024

Na Figura 24 vemos a geração de energia anual para cada aerogerador, esse resultado foi encontrado realizando a multiplicação do total gerado pelas horas do dia e pelos dias de cada ano respectivamente e examinando os gráficos, a turbina ELV-H16.5– 50kW se destaca por gerar mais energia em relação as outras, a segunda com maior geração é a ELV-H13.2– 30kW, os aerogeradores ELV-H13.2– 20kW e Nordtank 65 kW estão em terceiro e quarto lugar de geração respectivamente, em que seus saldos se assemelham bastante. O modelo ELV-H8.0– 10kW possui a menor potência gerada. Os resultados que mostram como as condições de vento influenciam diretamente para se escolher o aerogerador, não basta apenas pensar na máquina com mais potência, mas analisar características específicas para encontrar o melhor custo benefício ao projeto.

3.6 Escolha do Aerogerador

Diante da pesquisa realizada acerca destas turbinas eólicas de pequeno porte, quanto a suas características técnicas, e em relação à geração de energia para as condições de vento impostas pelos anos de estudo, pode-se realizar comparações entre elas com o intuito de identificar a máquina mais adequada para este projeto. Uma análise comparativa foi elaborada, e nela são apresentados pontos específicos a respeito dos aerogeradores estudados para verificação do modelo escolhido.

A Nordtank 65 kW, é a turbina com maior potência nominal do trabalho, e possui uma geração de energia modesta levando em consideração seu porte, outra característica que a diferencia das outras máquinas, é sua velocidade de partida que inicia a 4 metros por segundo, além de um peso no topo da torre de 5.706 kg. O modelo ELV-H16.5– 50kW tem apenas 15 kW de diferença na potência nominal, em relação com a turbina anterior, se destaca por ser o maior produtor de energia, e também possui uma torre pesada com 4.000 kg. A turbina ELV-H13.2– 30kW possui uma potência nominal mediana em comparação com as anteriores, apresenta uma geração maior que a Nordtank 65 kW, e tem a mesma velocidade nominal que a ELV-H16.5– 50kW, sua torre pesa 940 kg. O modelo ELV-H13.2– 20kW tem diferença de apenas 10 kW do aerogerador anterior, eles compartilham do mesmo peso na torre e diâmetro do rotor, a geração desta máquina também ultrapassa a potência gerada pela Nordtank 65 kW. O último aerogerador do trabalho é o ELV-H8.0– 10kW, é o que possui menor potência entre os demais, e se caracteriza por ser o modelo com a menor geração de energia.

Além desta análise comparativa, foi utilizado o método do fator de capacidade. Segundo Lopez (2012), o fator de capacidade para uma turbina eólica pode ser calculado por meio da divisão da energia elétrica gerada anualmente (kWh) pelo produto da potência nominal e o número de horas no ano. Esse parâmetro auxilia diretamente na seleção do aerogerador mais conveniente para as condições de vento propostas com a análise feita. As Tabelas 4 e 5 expressam os valores encontrados do fator de capacidade em relação ao período de dados, nos horários de pico e fora de pico.

Tabela 4 - Fator de capacidade anual na ponta

	Nordtank 65 kW	ELV-H16.5– 50kW	ELV-H13.2– 30kW	ELV-H13.2– 20kW	ELV-H8.0– 10kW
Fator de Capacidade 2020	4%	10%	10%	12%	8%
Fator de Capacidade 2021	5%	14%	13%	17%	12%
Fator de Capacidade 2022	3%	8%	8%	10%	7%
Fator de Capacidade 2023	4%	11%	11%	14%	9%
Fator de Capacidade Médio	4%	11%	11%	14%	9%

Fonte: Autoria própria, 2024

Tabela 5 - Fator de capacidade anual fora de ponta

	Nordtank 65 kW	ELV-H16.5– 50kW	ELV-H13.2– 30kW	ELV-H13.2– 20kW	ELV-H8.0– 10kW
Fator de Capacidade 2020	3%	8%	8%	10%	6%
Fator de Capacidade 2021	4%	10%	10%	13%	9%
Fator de Capacidade 2022	2%	6%	7%	8%	5%
Fator de Capacidade 2023	3%	8%	8%	11%	7%
Fator de Capacidade Médio	3%	8%	8%	10%	7%

Fonte: Autoria própria, 2024

O fator de capacidade na ponta e fora de ponta foi calculado pela divisão da geração anual de cada máquina conforme as Tabelas 2 e 3, pelo produto entre a potência nominal da respectiva turbina e a quantidade de dias do ano e de horas, isso para cada horário específico, na ponta são 3 horas diárias e fora da ponta 21 horas, em relação aos anos estudados, 2020 teve 366 dias e os anos de 2021, 2022 e 2023 tiveram 365 dias. Para uma melhor compreensão foi realizado uma média entre esses 4 anos, deixando um fator de capacidade mais específico para o estudo.

Entre os aerogeradores analisados temos três com os melhores fatores de capacidade, conforme as Tabelas 4 e 5, são eles:

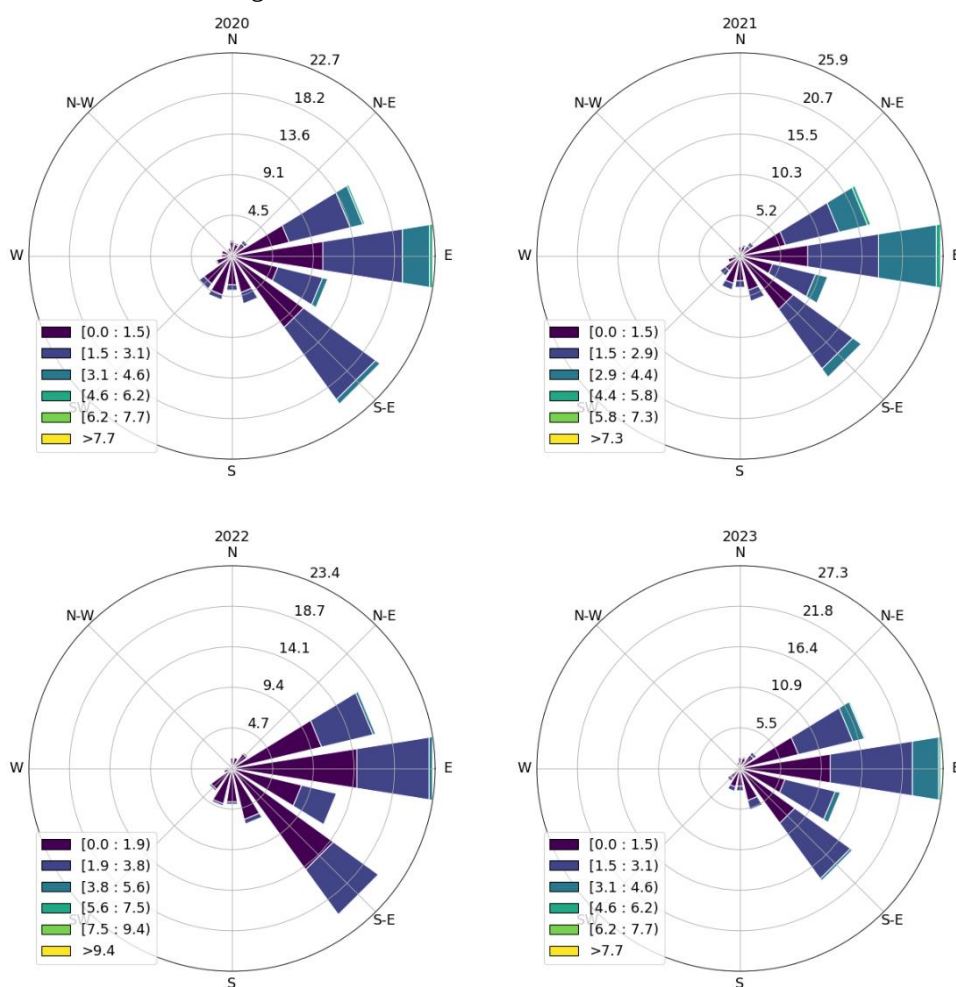
- Com um fator de capacidade de 8% fora da ponta e 11% na ponta, a máquina ELV-H16.5– 50kW, se destaca por possuir a geração mais alta entre os aerogeradores, mas é um modelo com alto custo, tendo em vista seu alto peso da torre e diâmetro das pás;
- Também com um fator de capacidade de 8% fora da ponta e 11% na ponta, o modelo ELV-H13.2– 30kW, aerogerador com características equivalentes ao ELV-H16.5– 50kW, como faixa de velocidade e a velocidade nominal, e é a segunda turbina que mais gera energia conforme a pesquisa;

- O fator de capacidade da máquina ELV-H13.2– 20kW, foi de 10% fora da ponta e 14% na ponta, com uma geração bem considerável se aproxima do ELV-H13.2– 30kW, ambos tem o mesmo peso do topo da torre de 940 kg e diâmetro das pás, além disso duas máquinas desse modelo de 20 kW conseguem gerar o equivalente a um ELV-H16.5– 50kW.
- Diante dos dados, características examinadas e testes realizados, o aerogerador de pequeno porte ELV-H13.2– 30kW foi selecionado, tendo em vista seu porte para a geração nas condições de vento estudadas, em que este modelo supera a máquina de 20 kW e considerando dois aerogeradores a produção de energia também supera o modelo de 50 kW. Suas características técnicas são similares as outras duas turbinas e seu fator de capacidade é igual para o modelo ELV-H16.5– 50kW e próximo ao da turbina ELV-H13.2– 20kW.

3.7 Análise da Direção do Vento

O estudo da direção do vento foi realizado por meio dos dados da EMA. Para isso, foi utilizado uma biblioteca específica do python, a windrose, conforme o código do Apêndice B. Os dados de velocidade e direção do vento foram importados, tratados pelos comandos resultando num conjunto de rosas dos ventos para este trabalho, uma rosa dos ventos para cada ano de estudo. A Figura 25 expressa a rosa dos ventos com as respectivas direções do vento, para as condições de vento da UFERSA Caraúbas, baseado nas velocidades de vento registradas.

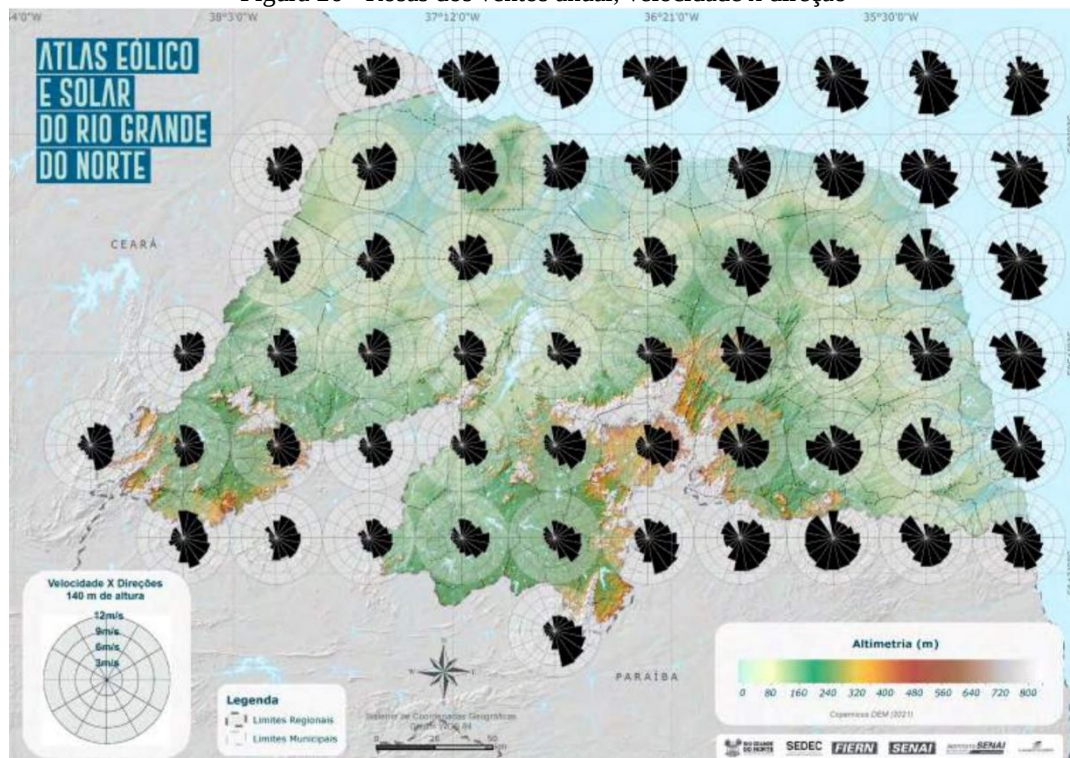
Figura 25 - Rosa dos ventos nos anos analisados



Fonte: Autoria própria, 2024

Estudando a rosa dos ventos referente aos anos de 2020, 2021, 2022 e 2023, de acordo com a Figura 25 nota-se quais são as direções características do vento caraubense. Os anos revelam como foi o desempenho do vento, revelando anos com ventos mais fortes e anos com ventos de menor velocidade, percebe uma direção predominante com maiores velocidades de vento, a direção leste. Esse fato se deve a localização do Rio Grande do Norte, a alta subtropical do Atlântico Sul e a alta subtropical do Atlântico Norte, definindo esse tipo de rosa dos ventos em Caraúbas. A Figura 26 mostra a rosa dos ventos característica da região, confirmando nossa investigação da direção do vento.

Figura 26 - Rosas dos ventos anual, velocidade x direção



Fonte: RIO GRANDE DO NORTE, 2022

4 ANÁLISE ECONÔMICA E FINANCEIRA

O conteúdo deste capítulo propõe uma avaliação a respeito dos resultados financeiros, obtidos com o estudo de geração de energia para a UFERSA campus Caraúbas, por meio da microgeração eólica, com as condições de vento analisadas para os horários fora de ponta e na ponta. E com posse desses resultados realizar uma comparação, entre a geração das usinas fotovoltaicas do campus e o aerogerador, isso para os anos de 2020, 2021, 2022 e 2023.

4.1 Balanço Financeiro da Geração Eólica

O estudo também realizou uma avaliação financeira para este aerogerador, baseada no produto da energia gerada pela tarifa de energia estabelecida pela companhia energética do Rio Grande do Norte, a Neoenergia Cosern. É importante destacar que, como este estudo é puramente teórico, os custos de aquisição do aerogerador não foram incluídos na análise financeira. Utilizando as faturas de energia elétrica da UFERSA para os anos de 2020, 2021, 2022 e 2023, a receita financeira foi calculada considerando a soma da tarifa de energia (TE) e da tarifa de uso do sistema de distribuição (TUSD) para se determinar a tarifa total, na Tabela 6 encontramos os valores referentes as tarifas e a soma delas para o ano de 2020, conforme os horários específicos das tarifas de pico e fora de pico.

Tabela 6 - Tarifas TE e TUSD da UFERSA em 2020

Meses	Tarifa TE na Ponta (R\$)	Tarifa TUSD na Ponta (R\$)	Valor Total na Ponta (R\$)	Tarifa TE Fora da Ponta (R\$)	Tarifa TUSD Fora da Ponta (R\$)	Valor Total Fora da Ponta (R\$)
Janeiro	0,53153736	1,67623364	2,207771	0,32511332	0,05685791	0,38197123
Fevereiro	0,51155927	1,66780927	2,17936854	0,30617268	0,05657216	0,36274484
Março	0,52047987	1,69689261	2,21737248	0,31151173	0,05755867	0,3690704
Abril	0,52020705	1,69600314	2,21621019	0,31134844	0,0575285	0,36887694
Mai	0,51810232	1,68914121	2,20724353	0,31008874	0,05729574	0,36738448
Junho	0,520958	1,69845144	2,21940944	0,3117979	0,05761154	0,36940944
Julho	0,50845787	1,80078292	2,30924079	0,30094744	0,06302703	0,36397447
Agosto	0,51477287	1,86655121	2,38132408	0,30366324	0,06587185	0,36953509
Setembro	0,50947923	1,84735662	2,35683585	0,30054054	0,06519446	0,365735
Outubro	0,50350488	1,82569381	2,32919869	0,29701628	0,06442996	0,36144624
Novembro	0,50787225	1,84152976	2,34940201	0,29959258	0,06498882	0,3645814
Dezembro	0,51794665	1,87805924	2,39600589	0,30553545	0,06627797	0,37181342

Fonte: Autoria própria, 2024

As tarifas TE e TUSD do ano de 2021 para horários de ponta e fora de ponta, foram apresentadas conforme a Tabela 7.

Tabela 7 - Tarifas TE e TUSD da UFERSA em 2021

Meses	Tarifa TE na Ponta (R\$)	Tarifa TUSD na Ponta (R\$)	Valor Total na Ponta (R\$)	Tarifa TE Fora da Ponta (R\$)	Tarifa TUSD Fora da Ponta (R\$)	Valor Total Fora da Ponta (R\$)
Janeiro	0,60405059	1,88564123	2,48969182	0,31636959	0,06480996	0,38117955
Fevereiro	0,52407601	1,83646133	2,36053734	0,31636959	0,06480996	0,38117955
Março	0,52229623	1,83022466	2,35252089	0,31529519	0,06458986	0,37988505
Abril	0,5059084	1,77279858	2,27870698	0,30540232	0,06256325	0,36796557
Mai	0,51716707	1,89714507	2,41431214	0,31431991	0,06541736	0,37973727
Junho	0,55555844	2,10232739	2,65788583	0,35704069	0,06905473	0,42609542
Julho	0,59167987	2,13536714	2,72704701	0,39004226	0,07013998	0,46018224
Agosto	0,63982689	2,152996	2,79282289	0,43652463	0,07071904	0,50724367
Setembro	0,63458795	2,13536714	2,76995509	0,43295034	0,07013998	0,50309032
Outubro	0,67591389	2,07146682	2,74738071	0,48031023	0,06804106	0,54835129
Novembro	0,68229314	2,09101725	2,77331039	0,48484339	0,06868323	0,55352662
Dezembro	0,68798378	2,1084573	2,79644108	0,4888872	0,06925608	0,55814328

Fonte: Autoria própria, 2024

A soma referente as tarifas TE e TUSD para a definição da tarifa total em 2022, pode ser observada por meio da Tabela 8, na ponta e fora de ponta.

Tabela 8 - Tarifas TE e TUSD da UFERSA em 2022

Meses	Tarifa TE na Ponta (R\$)	Tarifa TUSD na Ponta (R\$)	Valor Total na Ponta (R\$)	Tarifa TE Fora da Ponta (R\$)	Tarifa TUSD Fora da Ponta (R\$)	Valor Total Fora da Ponta (R\$)
Janeiro	0,65227335	1,99901588	2,65128923	0,46351106	0,06566128	0,52917234
Fevereiro	0,66098463	2,02571324	2,68669787	0,46970137	0,06653820	0,53623957
Março	0,66687649	2,04376997	2,71064646	0,47388818	0,06713131	0,54101949
Abril	0,6409221	2,16192383	2,80284593	0,44083588	0,07429897	0,51513485
Mai	0,56500848	2,46829319	3,03330167	0,34556231	0,09211101	0,43767332
Junho	0,57137427	2,49610274	3,06747701	0,34945566	0,09314879	0,44260445
Julho	0,56422716	2,46287923	3,02710639	0,34510051	0,09195565	0,43705616
Agosto	0,56392147	2,46026294	3,02418441	0,34492384	0,09188792	0,43681176
Setembro	0,56249743	2,45405015	3,01654758	0,34405282	0,09165588	0,4357087
Outubro	0,56583145	2,46859575	3,0344272	0,34609208	0,09219914	0,43829122
Novembro	0,56667114	2,47225913	3,03893027	0,34660568	0,09233597	0,43894165
Dezembro	0,56184714	2,4512131	3,01306024	0,34365507	0,09154992	0,43520499

Fonte: Autoria própria, 2024

Na Tabela 9 estão os dados referentes a TE e a TUSD da universidade no ano de 2023, de acordo com o respectivo horário, seja de pico ou fora de pico.

Tabela 9 - Tarifas TE e TUSD da UFERSA em 2023

Meses	Tarifa TE na Ponta (R\$)	Tarifa TUSD na Ponta (R\$)	Valor Total na Ponta (R\$)	Tarifa TE Fora da Ponta (R\$)	Tarifa TUSD Fora da Ponta (R\$)	Valor Total Fora da Ponta (R\$)
Janeiro	0,56380253	2,459744	3,02354653	0,34485109	0,09186854	0,43671963
Fevereiro	0,56386199	2,46000344	3,02386543	0,34488746	0,09187823	0,43676569
Março	0,57144905	2,49310407	3,06455312	0,3495281	0,0931145	0,4426426
Abril	0,59002593	2,48790621	3,07793214	0,35835847	0,09542711	0,45378558
Mai	0,61332962	2,38833756	3,00166718	0,36670371	0,09755742	0,46426113
Junho	0,61463084	2,39340458	3,00803542	0,3674817	0,0977644	0,4652461
Julho	0,60856265	2,3697747	2,97833735	0,36385358	0,09679918	0,46065276
Agosto	0,61216323	2,38379556	2,99595879	0,36600633	0,09737189	0,46337822
Setembro	0,61242204	2,3848034	2,99722544	0,36616108	0,09741306	0,46357414
Outubro	0,61100126	2,3792708	2,99027206	0,36531161	0,09718707	0,46249868
Novembro	0,61593759	2,39849314	3,01443073	0,36826299	0,09797225	0,46623524
Dezembro	0,59653913	2,32295452	2,91949365	0,35666484	0,09488669	0,45155153

Fonte: Autoria própria, 2024

As bandeiras tarifárias variam mensalmente de acordo com a ANEEL e têm um impacto direto no valor da tarifa de energia. Esse sistema de bandeiras tarifárias foi implementado no Brasil em 2015 para quantificar o preço da geração de energia no país. A bandeira verde indica uma situação favorável na geração, enquanto a bandeira amarela sinaliza uma situação menos ideal, resultando em um aumento na tarifa. Já a bandeira vermelha nível 1 indica que a geração está mais cara, e a bandeira vermelha nível 2 indica custos ainda mais altos com a geração de energia (BRASIL, 2022).

Além do sistema de bandeiras tarifárias, o Brasil também implementou o sistema de compensação de energia elétrica, conhecido como *Net Metering*. Esse sistema é aplicado em unidades geradoras de pequeno porte, geralmente em residências ou estabelecimentos comerciais, que produzem energia. A eletricidade gerada é injetada na rede elétrica da distribuidora, e a empresa distribuidora compensa o valor gerado na conta de energia da unidade geradora, efetuando a compensação da energia. No caso de uma geração excedente ao consumo da unidade geradora, são gerados créditos que podem ser abatidos em contas de energia de outras unidades consumidoras participantes do sistema de compensação de energia elétrica (ANEEL, 2023, p. 2-3).

Por meio da geração determinada com a turbina ELV-H13.2– 30kW, foi realizado o balanço financeiro de acordo com as tarifas de energia, por meio da Tabela 10 verificamos os resultados de geração fora da ponta e na ponta, assim como valor total para o ano de 2020, somando os valores referentes aos horários.

Tabela 10 - Balanço financeiro da geração eólica em 2020

Meses	Energia Gerada na Ponta (kWh/mês)	Tarifa na Ponta (R\$)	Energia Gerada Fora da Ponta (kWh/mês)	Tarifa Fora da Ponta (R\$)	Bandeira Tarifária	Valor Total (R\$)
Janeiro	357,259	2,207771	1.377,380	0,38197123	AMARELA	1.314,87
Fevereiro	220,418	2,17936854	725,577	0,36274484	AMARELA	743,57
Março	117,283	2,21737248	533,483	0,3690704	VERDE	456,95
Abril	120,616	2,21621019	508,944	0,36887694	VERDE	455,05
Mai	65,805	2,20724353	581,967	0,36738448	VERDE	359,05
Junho	65,708	2,21940944	901,678	0,36940944	VERDE	478,92
Julho	86,327	2,30924079	1.132,929	0,36397447	VERDE	611,71
Agosto	125,554	2,38132408	1.808,384	0,36953509	VERDE	967,25
Setembro	298,605	2,35683585	1.903,673	0,365735	VERDE	1.400,00
Outubro	519,809	2,32919869	2.766,989	0,36144624	VERDE	2.210,86
Novembro	613,686	2,34940201	2.998,777	0,3645814	VERDE	2.535,09
Dezembro	669,008	2,39600589	3.280,568	0,37181342	VERDE	2.822,71

Fonte: Autoria própria, 2024

O mesmo foi feito para os resultados de geração fora da ponta e na ponta com dados de 2021, para os preços cobrados neste período, conforme a Tabela 11.

Tabela 11 - Balanço financeiro da geração eólica em 2021

Meses	Energia Gerada na Ponta (kWh/mês)	Tarifa na Ponta (R\$)	Energia Gerada Fora da Ponta (kWh/mês)	Tarifa Fora da Ponta (R\$)	Bandeira Tarifária	Valor Total (R\$)
Janeiro	627,000	2,48969182	2.458,317	0,38117955	VERMELHA	2498,10
Fevereiro	496,459	2,36053734	2.178,277	0,38117955	AMARELA	2002,22
Março	250,321	2,35252089	1.105,227	0,37988505	AMARELA	1008,74
Abril	112,492	2,27870698	761,036	0,36796557	AMARELA	536,37
Mai	37,410	2,41431214	628,912	0,37973727	AMARELA	329,14
Junho	74,279	2,65788583	768,367	0,42609542	VERMELHA	524,82
Julho	128,392	2,72704701	1.514,398	0,46018224	VERMELHA	1047,03
Agosto	324,819	2,79282289	2.396,564	0,50724367	VERMELHA	2122,80
Setembro	324,527	2,76995509	2.123,794	0,50309032	VERMELHA	1967,39
Outubro	594,000	2,74738071	2.994,826	0,54835129	VERMELHA	3274,16
Novembro	793,281	2,77331039	3.316,418	0,55352662	VERMELHA	4035,74
Dezembro	649,492	2,79644108	3.487,096	0,55814328	AMARELA	3762,57

Fonte: Autoria própria, 2024

Na Tabela 12, encontramos o balanço financeiro realizado de acordo com as tarifas de energia para o ano de 2022, assim como os valores obtidos.

Tabela 12 - Balanço financeiro da geração eólica em 2022

Meses	Energia Gerada na Ponta (kWh/mês)	Tarifa na Ponta (R\$)	Energia Gerada Fora da Ponta (kWh/mês)	Tarifa Fora da Ponta (R\$)	Bandeira Tarifária	Valor Total (R\$)
Janeiro	258,267	2,65128923	1.210,746	0,52917234	AMARELA	1.325,43
Fevereiro	378,673	2,68669787	1.319,598	0,53623957	AMARELA	1.725,00
Março	206,878	2,71064646	777,895	0,54101949	AMARELA	981,63
Abril	116,229	2,80284593	602,733	0,51513485	AMARELA	636,26
Mai	51,956	3,03330167	574,789	0,43767332	VERDE	409,17
Junho	22,151	3,06747701	615,710	0,44260445	VERDE	340,46
Julho	80,011	3,02710639	1.320,523	0,43705616	VERDE	819,34
Agosto	109,208	3,02418441	1.630,805	0,43681176	VERDE	1.042,62
Setembro	222,430	3,01654758	1.529,678	0,4357087	VERDE	1.337,46
Outubro	414,219	3,0344272	2.226,979	0,43829122	VERDE	2.232,98
Novembro	387,040	3,03893027	1.457,316	0,43894165	VERDE	1.815,86
Dezembro	389,643	3,01306024	1.946,583	0,43520499	VERDE	2.021,18

Fonte: Autoria própria, 2024

A Tabela 13 resulta da avaliação financeira referente aos dados estudados no ano de 2023, em relação a geração de energia e as respectivas tarifas, no horário de ponta e fora da ponta.

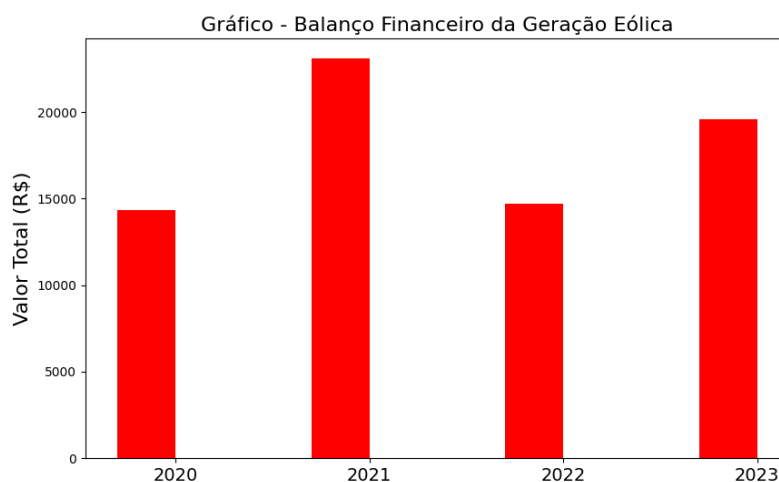
Tabela 13 - Balanço financeiro da geração eólica em 2023

Meses	Energia Gerada na Ponta (kWh/mês)	Tarifa na Ponta (R\$)	Energia Gerada Fora da Ponta (kWh/mês)	Tarifa Fora da Ponta (R\$)	Bandeira Tarifária	Valor Total (R\$)
Janeiro	566,992	3,02354653	2.121,067	0,43671963	VERDE	2.640,64
Fevereiro	243,381	3,02386543	1.169,466	0,43676569	VERDE	1.246,73
Março	236,124	3,06455312	1.249,425	0,4426426	VERDE	1.276,66
Abril	61,451	3,07793214	481,276	0,45378558	VERDE	407,54
Mai	86,068	3,00166718	665,407	0,46426113	VERDE	567,27
Junho	132,899	3,00803542	998,429	0,4652461	VERDE	864,28
Julho	113,903	2,97833735	1.577,594	0,46065276	VERDE	1.065,96
Agosto	330,381	2,99595879	1.777,495	0,46337822	VERDE	1.813,46
Setembro	348,993	2,99722544	2.090,493	0,46357414	VERDE	2.015,11
Outubro	369,081	2,99027206	1.957,911	0,46249868	VERDE	2.009,18
Novembro	580,776	3,01443073	2.958,155	0,46623524	VERDE	3.129,91
Dezembro	563,538	2,91949365	2.066,275	0,45155153	VERDE	2.578,28

Fonte: Autoria própria, 2024

De acordo com os valores obtidos mensalmente, foi realizado um somatório para a determinação da receita total anual, e assim foi construído um gráfico mostrando o desempenho do balanço financeiro, ao longo dos quatro anos de estudo de dados, demonstrando a avaliação financeira do sistema eólico por meio da Figura 27.

Figura 27 - Análise financeira do sistema eólico



Fonte: Autoria própria, 2024

A receita financeira vista na Figura 27, é resultado da geração eólica em relação com as tarifas de energia de cada período estudado, o gráfico revela uma simulação do desempenho de um aerogerador de 30 kW. Nos anos de 2020 e 2022 foram registradas receitas menores, já em 2021 e 2023 mostram um retorno financeiro alto, esse fato revela os efeitos da sazonalidade do vento na região estudada para anos específicos.

4.2 Balanço Financeiro da Geração Solar

A UFERSA campus Caraúbas dispõe de um sistema de minigeração distribuída nos arredores de suas instalações físicas. Um sistema de energia solar, com cinco usinas fotovoltaicas operando com uma capacidade instalada de 299,68 kWp. As usinas são distribuídas da seguinte forma: a primeira foi instalada num terreno do campus, e as outras nos telhados de algumas edificações, como os blocos de aulas e dos professores (UFERSA, 2023). Pelo fato de as usinas serem de propriedade da universidade, não foi possível mensurar o custo necessário para a obtenção deste sistema. Na Tabela 14 encontramos detalhadamente especificações das usinas, quanto a sua potência, local, ano de instalação entre outros, na Figura 28 observa-se a primeira usina do campus Caraúbas, que entrou em operação no ano de 2018.

Tabela 14 - Especificações das usinas fotovoltaicas

Usinas	Potência (kWp)	Inversores	Número de Módulos	Local	Ano da Instalação
Caraúbas 01	62,70	SMA Sunny Tripower 25000TL (02 unid.) + 15000TL (01 unid.)	190	Solo do Campus	2018
Caraúbas 02	38,13	GROWATT MID 33KTL3-X (01 unid.)	82	Central de Aulas I	2021
Caraúbas 03	38,13	GROWATT MID 33KTL3-X (01 unid.)	82	Central de Aulas II	2021
Caraúbas 04	80,36	GROWATT MID 25 KTL3-X (03 unid.)	196	Bloco de Docentes I	2021
Caraúbas 05	80,36	GROWATT MID 25 KTL3-X (03 unid.)	196	Bloco de Docentes II	2021

Fonte: UFERSA, 2023

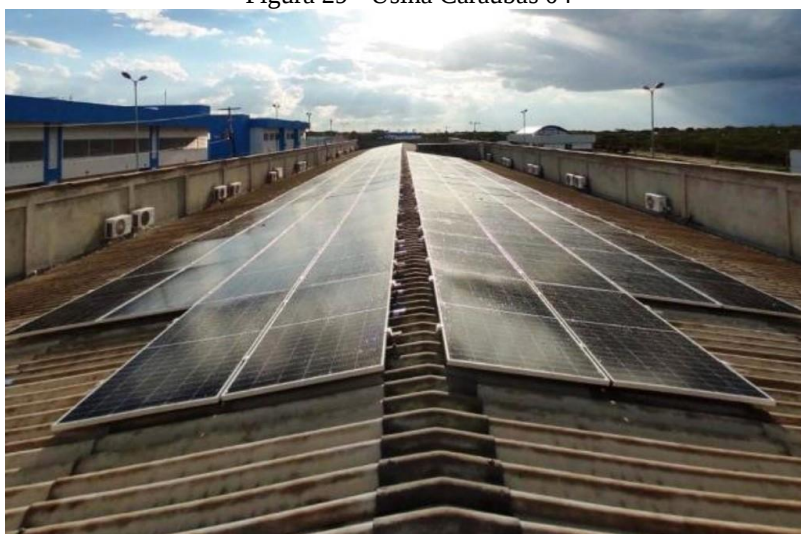
Figura 28 - Usina Caraúbas 01



Fonte: Autoria própria, 2024

Na Figura 29 é visto uma das usinas instalada nos telhados, a usina Caraúbas 04, localizada no bloco de professores I.

Figura 29 - Usina Caraúbas 04



Fonte: UFERSA, 2023

A avaliação financeira referente as usinas, foi realizada de forma semelhante a avaliação do aerogerador, por meio das faturas de energia da universidade para o mesmo período estudado, e com a geração de energia das usinas (UFERSA, 2024). Vale ressaltar que como se trata de um sistema fotovoltaico, a energia só é gerada em horário fora da ponta, dessa forma só as tarifas desse horário foram utilizadas nos cálculos. Na Tabela 15 é observada a receita financeira referente aos anos de 2020 e 2021, com o produto entre a geração de energia das usinas e o valor cobrado em horários fora de pico nestes anos.

Tabela 15 - Avaliação financeira das usinas em 2020 e 2021

Meses	Energia Gerada em 2020 (kWh/mês)	Tarifa em 2020 (R\$)	Valor Total 2020 (R\$)	Energia Gerada em 2021 (kWh/mês)	Tarifa em 2021 (R\$)	Valor Total 2021 (R\$)
Janeiro	8.532,71	0,38197123	3.259,25	3.627,58	0,38117955	1.382,76
Fevereiro	8.501,09	0,36274484	3.083,73	8.161,17	0,38117955	3.110,87
Março	5.220,71	0,3690704	1.926,81	9.575,17	0,37988505	3.637,46
Abril	4.099,23	0,36887694	1.512,11	9.148,73	0,36796557	3.366,42
Mai	1.973,26	0,36738448	724,95	8.887,80	0,37973727	3.375,03
Junho	204,59	0,36940944	75,58	8.874,08	0,42609542	3.781,21
Julho	6.660,69	0,36397447	2.424,32	8.548,90	0,46018224	3.934,05
Agosto	9.881,99	0,36953509	3.651,74	9.770,38	0,50724367	4.955,96
Setembro	8.373,72	0,365735	3.062,56	16.469,29	0,50309032	8.285,54
Outubro	6.408,93	0,36144624	2.316,48	24.287,82	0,54835129	13.318,26
Novembro	0,00	0,3645814	0,00	27.066,11	0,55352662	14.981,81
Dezembro	0,00	0,37181342	0,00	30.625,97	0,55814328	17.093,68

Fonte: Autoria própria, 2024

No ano de 2020, somente a usina Caraúbas 01 estava em pleno funcionamento, já em 2021 nos meses de setembro e outubro as demais usinas passaram a gerar energia, fato observado na Tabela 15, onde os últimos meses mostram uma alta na geração. O mesmo

procedimento foi realizado para os anos de 2022 e 2023, conforme os dados de geração de todas as usinas, para os preços cobrados neste período, conforme a Tabela 16.

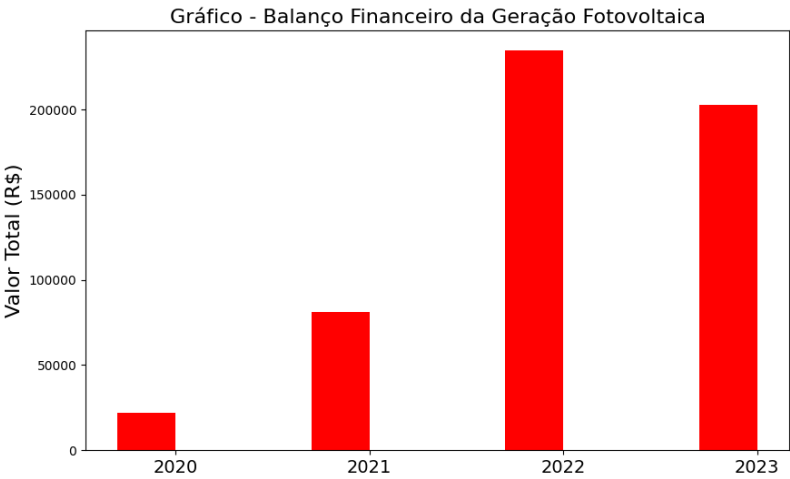
Tabela 16 - Avaliação financeira das usinas em 2022 e 2023

Meses	Energia Gerada em 2022 (kWh/mês)	Tarifa em 2022 (R\$)	Valor Total 2022 (R\$)	Energia Gerada em 2023 (kWh/mês)	Tarifa em 2023 (R\$)	Valor Total 2023 (R\$)
Janeiro	38.884,68	0,52917234	20.576,70	45.813,86	0,43671963	20.007,81
Fevereiro	45.508,52	0,53623957	24.403,47	40.617,43	0,43676569	17.740,30
Março	35.264,72	0,54101949	19.078,90	43.522,32	0,4426426	19.264,83
Abril	43.707,49	0,51513485	22.515,25	43.275,10	0,45378558	19.637,62
Maiο	40.275,61	0,43767332	17.627,56	38.631,31	0,46426113	17.935,02
Junho	36.051,63	0,44260445	15.956,61	31.239,57	0,4652461	14.534,09
Julho	36.353,69	0,43705616	15.888,60	37.305,39	0,46065276	17.184,83
Agosto	46.080,56	0,43681176	20.128,53	38.628,14	0,46337822	17.899,44
Setembro	39.779,46	0,4357087	17.332,26	31.785,94	0,46357414	14.735,14
Outubro	48.212,72	0,43829122	21.131,21	43.978,63	0,46249868	20.340,06
Novembro	46.292,80	0,43894165	20.319,84	25.760,64	0,46623524	12.010,52
Dezembro	45.637,59	0,43520499	19.861,71	25.025,10	0,45155153	11.300,12

Fonte: Autoria própria, 2024

Com base nas receitas geradas mensalmente, foi feita a soma dos valores registrados, para se estabelecer a receita referente a cada ano, um gráfico foi organizado com o intuito de se apresentar o balanço financeiro das usinas fotovoltaicas, isso para o mesmo período de estudo do aerogerador, de acordo com a Figura 30.

Figura 30 - Análise financeira das usinas fotovoltaicas



Fonte: Autoria própria, 2024

O gráfico da Figura 30 é a representação das receitas financeiras obtidas com a geração fotovoltaica das usinas do campus. O ano de 2020 mostra valores baixos, isso devido a

capacidade instalada ser de apenas 62,7 kWp. Em 2021 é visto um leve aumento, pois nos últimos meses deste ano foram comissionadas as demais usinas da universidade. Em 2022 e 2023 todas as usinas fotovoltaicas estavam em funcionamento, com a capacidade de 299,68 kWp, como comprova o gráfico acima.

4.3 Comparação entre os Sistemas Eólico e Fotovoltaico

Com base na avaliação financeira dos sistemas eólico e fotovoltaico deste trabalho. Foi realizada uma análise comparativa em relação as receitas obtidas em cada sistema, a analogia tem o intuito de elaborar um parecer quanto a eficiência deles, assim como sua pertinência para a universidade. A comparação foi detalhada pela Tabela 17.

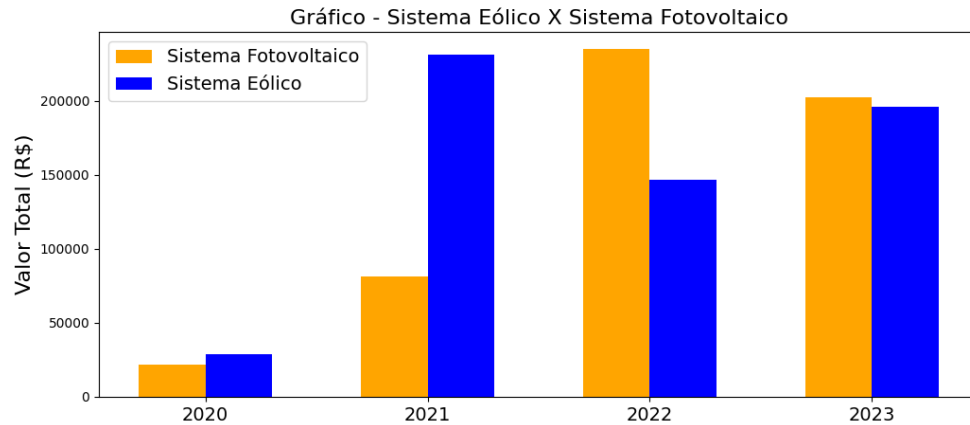
Tabela 17 - Análise comparativa dos sistemas eólico e fotovoltaico

Anos	Usinas fotovoltaicas (R\$)	Aerogerador (R\$)
2020	22.037,54	14.356,02
2021	81.223,04	23.109,09
2022	234.820,64	14.687,41
2023	202.589,77	19.615,02

Fonte: Autoria própria, 2024

A comparação da Tabela 17 foi feita em relação a uma usina de 62,7 kWp de capacidade instalada em 2020, 299,68 kWp nos últimos meses de 2021 e nos outros anos o sistema fotovoltaico operou em sua totalidade. O aerogerador possui uma potência de 30 kW, e devido a isso mostra receitas inferiores na analogia. Ajustando as capacidades instaladas dos sistemas, teremos as cinco usinas com 299,68 kWp e um pequeno parque eólico com 10 aerogeradores totalizando 300 kW de potência. Na Figura 31 é verificado a comparação entre os sistemas com essa afirmação.

Figura 31 - Análise comparativa dos sistemas eólico e fotovoltaico



Fonte: Autoria própria, 2024

No gráfico da Figura 31, foi demonstrado a comparação entre os sistemas de geração de energia. Para 2020 como o sistema fotovoltaico possuía apenas 62,7 kWp de capacidade, então ele foi comparado com 2 aerogeradores, totalizando 60 kW de potência. A partir de 2021 as usinas passaram a ter nos últimos meses do ano 299,68 kWp de capacidade, dessa forma os 10 aerogeradores foram inseridos somando 300 kW, equiparando as potências de ambos os sistemas, como a potência total do sistema fotovoltaico não foi integral durante todo o ano, as receitas estão abaixo dos valores do sistema eólico. Já em 2022 a geração solar se sobrepõe a eólica, ocasionando melhor retorno financeiro, mas mesmo com menos ventos para este período, o sistema gerou boas receitas complementando as usinas fotovoltaicas. A análise de 2023 revela uma semelhança nas receitas financeiras, para ambos os sistemas estudados, mostrando a viabilidade deles para a universidade, além de garantir a eficiência na geração de energia.

5 CONCLUSÕES

5.1 Conclusões do Trabalho

Diante do avanço das energias renováveis globalmente, vários países continuam intensificando seus investimentos em fontes limpas, e deixando gradualmente as fontes não renováveis. No Brasil acontece o mesmo, a cada ano os investimentos continuam crescendo, principalmente para a energia eólica, onde a capacidade instalada atingiu 25,63 GW em 2022, com 46 GWh de energia gerada por aerogeradores de pequeno porte. A região Nordeste foi responsável por gerar cerca de 90,3% da energia eólica no país em 2022, assegurando sua liderança na geração.

Nesse sentido uma análise referente a normas da ANEEL e da Cosern foram realizadas, além da avaliação dos principais tipos de aerogeradores, as turbinas de eixo horizontal, vertical e os de pequeno porte. Outros estudos pertinentes também foram verificados. A análise das condições do vento baseou-se na lei logarítmica para a extrapolação da velocidade do vento na UFERSA Caraúbas, e com isso a distribuição da frequência, além de fundamentos para se observar a variação da direção do vento utilizando a rosa dos ventos.

Logo, o trabalho analisou as características dos ventos no Rio Grande do Norte, e utilizou os dados da Estação Meteorológica Automática da UFERSA Caraúbas, para a extrapolação das velocidades do vento, para então determinar a distribuição de frequência dos ventos, possibilitando o cálculo da geração de energia para horários de pico e fora de pico, onde a análise apresentou resultados para os anos de 2020 a 2023, totalizando quatro anos de dados analisados. Nesse contexto foi visto o desempenho da geração de energia por cinco aerogeradores de distintas potências, resultando na seleção de uma turbina de 30 kW. A direção do vento característica da região também foi analisada, e detalhada por meio da rosa dos ventos, tendo como base os dados da EMA referentes as direções de vento registradas.

Dessa forma, levando em consideração a geração de energia pelo aerogerador escolhido, foi determinado um balanço financeiro, com R\$ 14.356,02 em 2020, R\$ 23.109,09 em 2021, R\$ 14.687,41 em 2022 e R\$ 19.615,02 em 2023. A universidade é detentora de cinco usinas fotovoltaicas em funcionamento, então foi realizado o cálculo das receitas financeiras desse sistema, por meio de sua geração para então se executar uma comparação entre os sistemas eólico e solar, levando em consideração uma igualdade entre os sistemas eólico e solar, para os anos estudados e suas respectivas capacidades instaladas. Resultando num balanço

financeiro de R\$ 28.712,05 em 2020 para dois aerogeradores, R\$ 231.090,87 em 2021, R\$ 146.874,13 em 2022 e R\$ 196.150,22 em 2023 para dez aerogeradores.

Portanto, conclui-se que, considerando as condições de vento em Caraúbas, no médio oeste potiguar, se caracteriza como uma localidade viável na geração de energia elétrica, por meio da energia eólica, com aerogeradores de pequeno porte com potência de 30 kW, proporcionando receitas financeiras relevantes. Além disso, a implementação de um sistema híbrido eficiente, combinando energia eólica e solar, pode oferecer benefícios financeiros ainda maiores para a universidade e tornar possível sua autossuficiência energética.

5.2 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros a pesquisa pode se estender por mais anos de estudo, isso com o objetivo de se compreender de forma mais conclusiva a sazonalidade dos ventos no município de Caraúbas. Assim como a adequação da descrição de código da linguagem de programação utilizada, deixando a programação mais enxuta e eficiente para a análise.

5.3 Agradecimentos

Os autores deste estudo deixam seu agradecimento a Universidade Federal Rural do Semiárido – UFERSA, que forneceu os registros, instrumentos e as informações necessárias para o desenvolvimento deste trabalho. Assim como a destinação de recursos para a apresentação desta pesquisa em diferentes congressos: congresso brasileiro de automática (CBA) em 2020 com o título análise da viabilidade para a instalação de um pequeno aerogerador na UFERSA Caraúbas, no congresso internacional IEEE Sustain 2024 com o título *Comparison between a photovoltaic system and a wind power system in the Brazilian semi-arid region* e no congresso brasileiro de energia solar (CBENS) 2024 com o título análise de dados dos ventos na UFERSA Caraúbas utilizando a linguagem Python.

REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA. **Boletim anual de geração eólica 2022**. São Paulo: ABEEólica, 2023. 19 p.

ANEEL. **Resolução Normativa Aneel Nº 1.059, de 7 de Fevereiro de 2023**. Brasília: ANEEL, 2023. 45 p.

ANJOS, Vitor Luiz Rigoti dos. **Avaliação do Potencial Eólico por Regiões do Estado do Espírito Santo**. 2004. 95 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.

BLOOMBERGNEF. **Climatescope 2023**. New York: Bloomberg Finance L.P., 2023. 80 p.

BRASIL. ANEEL. **Sobre Bandeiras Tarifárias**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/tarifas/bandeiras-tarifarias>. Acesso em: 31 out. 2023.

DUTRA, Ricardo Marques. **Viabilidade Técnico-Econômica da Energia Eólica Face Ao Novo Marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro**. 2001. 272 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências em Planejamento Energético, Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001. Cap. 06.

ELETROVENTO ENERGIA ALTERNATIVA. **Nossos produtos** | :: eletrovento ::
Disponível em: <https://www.eletrovento.com.br/site/produto/categoria/energia-eolica/>. Acesso em: 21 fev. 2024.

EÓLICA FÁCIL. **Turbinas eólicas de eixo vertical**: a turbina eólica de eixo vertical possui o eixo de rotação perpendicular ao solo. A turbina eólica de eixo vertical possui o eixo de rotação perpendicular ao solo. Disponível em: <https://www.eolicafacil.com.br/eixo-vertical>. Acesso em: 12 dez. 2023.

EPE. **Balanço energético nacional**. Rio de Janeiro: Epe, 2023. 275 p.

FONSECA, Bianca Siqueira da; RAMALHO, Hellen Franco. **Estudo de Caso: Análise da Viabilidade da Implantação de Um Micro Aerogerador no Campus Ecoville da UTFPR Curitiba**. 2018. 93 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

HOBOLINK. **Ufersa Caraubas**. Disponível em: <https://hobolink.com/p/175fc5b80720c04a02cfbdf8e0024526>. Acesso em: 05 mar. 2024.

LIMA, Matheus Santos de; GOUVEIA, Alexandre Martins; OLIVEIRA, Alexandre Vieira. **Sistema Híbrido Eólico e Solar Off Grid**. Revista Inovação, Tecnologia e Sustentabilidade na Engenharia Elétrica, Bebedouro, Sp, v. 1, n. 1, p. 180-202, jul. 2018.

LOPEZ, Ricardo Aldabó. **Energia eólica / ricardo aldabó lopez**. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2012. 366 p.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind energy explained: theory, design, and application**. 2. ed. Chichester: Wiley, 2009. 689 p.

MATEUS, Ana Geddara de Cerqueira; TAPIA, Gabriel Ivan Medina. Análise de sistema híbrido solar-eólico de geração de energia on grid em assentamento rural. In: ANAIS CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR 2020, 2020, Fortaleza. **Anais congresso brasileiro de energia solar 2020**. [S. l.]: Associação Brasileira de Energia Solar. p. 10. Disponível em: <https://doi.org/10.59627/cbens.2020.993>. Acesso em: 23 jan. 2024.

NEOENERGIA COSERN. **Composição Tarifária**: tarifas de energia. Tarifas de Energia. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/web/rn/composicao-tarifaria>. Acesso em: 11 abr. 2024.

NEOENERGIA COSERN. **DIS-NOR-031**: conexão de microgeradores ao sistema de distribuição. Natal: Neoenergia Cosern, 2020a. 35 p.

NEOENERGIA COSERN. **DIS-NOR-033**: conexão de minigeradores ao sistema de distribuição. Natal: Neoenergia Cosern, 2020b. 38 p.

NEOENERGIA COSERN. **Você sabe como funciona um aerogerador?** 22 jul. 2021. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/w/voce-sabe-como-funciona-um-aerogerador-#:~:text=Tipos%20de%20Aerogeradores,que%20têm%20sua%20maior%20eficiência>. Acesso em: 11 dez. 2023.

OAK ENERGIA. **Turbinas eólicas ou aerogeradores - oak energia**. 1 ago. 2020. Disponível em: <https://oakenergia.com.br/turbinas-eolicas/>. Acesso em: 12 dez. 2023.

PYTHON. **Python Geral**. Disponível em: <https://docs.python.org/pt-br/dev/faq/general.html#what-is-python>. Acesso em: 16 abr. 2024.

PYTHON. **A Biblioteca Padrão do Python**. Disponível em: <https://docs.python.org/pt-br/dev/library/index.html#library-index>. Acesso em: 16 abr. 2024.

REN21. **Renewables global status report 2023**. Paris: Ren21, 2023. 127 p.

RIO GRANDE DO NORTE. GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE [ET AL.]. **Atlas eólico e solar do Estado do Rio Grande do Norte**. Natal: Governo do Estado do Rio Grande do Norte, 2022. 212 p.

UDOP ENERGIA QUE INOVA. **Energia eólica: conheça a tecnologia de funcionamento por trás dos gigantes da energia renovável e não poluente.** 20 out. 2021. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2021/10/20/energia-eolica-conheca-a-tecnologia-de-funcionamento-por-tras-dos-gigantes-da-energia-renovavel-e-nao-poluente.html#:~:text=Dependendo%20do%20local%20em%20que,ventos%20produzidos%20em%20alto%20mar>. Acesso em: 12 dez. 2023.

UFERSA. **Estação meteorológica automática - EMA:** campus de caraúbas. Campus de Caraúbas. 2019. Disponível em: <https://caraubas.ufersa.edu.br/estacao-meteorologica-caraubas/>. Acesso em: 05 mar. 2024.

UFERSA. **Usinas Solares da UFERSA:** as usinas solares. As Usinas Solares. Disponível em: <https://usinasolar.ufersa.edu.br/>. Acesso em: 24 out. 2023.

UFERSA. **Usinas Solares da UFERSA:** geração de energia elétrica. Geração de Energia Elétrica. 2024. Disponível em: <https://usinasolar.ufersa.edu.br/geracao-de-energia-eletrica/>. Acesso em: 21 mar. 2024.

VIAN, Ângelo et al. **Energia eólica fundamentos tecnologia e aplicações.** [S. l.]: Editora Blucher, 2021. E-book. ISBN 9786555500585. Disponível em: <https://doi.org/10.5151/9786555500585>. Acesso em: 7 mar. 2024.

WIKIHOW (org.). **Como Interpretar a Rosa dos Ventos.** Disponível em: <https://pt.wikihow.com/Interpretar-a-Rosa-dos-Ventos#:~:text=A%20rosa%20dos%20ventos%20%C3%A9,elemento%20clim%C3%A1tico%20em%20determinada%20%C3%A1rea..> Acesso em: 27 mar. 2024.

APÊNDICE A – CÓDIGO EM PYTHON PARA A ANÁLISE DO VENTO E GERAÇÃO DE ENERGIA

```
##### TCC OSIAN SOARES
#####

import pandas as pd
import math as mt
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.interpolate import make_interp_spline
import numpy as np

#Importa os dados da planilha para a análise da velocidade do vento

Dados = pd.read_excel('analise_2022.xlsx', usecols = 'D')
Dados = Dados.loc[0:105118]

#Realiza a extrapolação da velocidade do vento para a altura desejada

Extrapolacao_velocidade = ((mt.log(25/0.03))/(mt.log(2/0.03)))*Dados

#Converte as velocidades obtidas em uma lista

velocidade = Extrapolacao_velocidade.squeeze().tolist()

#Importa os dados da planilha para a conversão de horário

horario = pd.read_excel('analise_2022.xlsx', usecols='C')
horario = horario.loc[0:105118]

#Divide a coluna "Time" em hora, minuto e segundo para a conversão de horário

horario[['hora', 'minuto', 'segundo']] = horario['Time'].str.split(':', expand=True)
```

```
#Converte as colunas em números
```

```
horario[['hora', 'minuto', 'segundo']] = horario[['hora', 'minuto', 'segundo']].astype(float)
```

```
#Calcula o valor de horário em decimal
```

```
tempo_decimal = horario['hora'] + (horario['minuto'] / 60) + (horario['segundo'] / 3600)
print(tempo_decimal)
```

```
#Cálculo da frequência em horário de ponta
```

```
valores_selecionados = []
```

```
cont_1 = 0
```

```
cont_2 = 0
```

```
cont_3 = 0
```

```
cont_4 = 0
```

```
cont_5 = 0
```

```
cont_6 = 0
```

```
cont_7 = 0
```

```
cont_8 = 0
```

```
cont_9 = 0
```

```
cont_10 = 0
```

```
cont_total = 0
```

```
for c, tempo in enumerate(tempo_decimal):
```

```
    if 17.5 <= tempo <= 20.5:
```

```
        valores_selecionados.append(velocidade[c])
```

```
        cont_total += 1
```

```
        if velocidade[c] > 0 and velocidade[c] <= 1:
```

```
            cont_1 += 1
```

```
elif velocidade[c] > 1 and velocidade[c] <= 2:
    cont_2 += 1
elif velocidade[c] > 2 and velocidade[c] <= 3:
    cont_3 += 1
elif velocidade[c] > 3 and velocidade[c] <= 4:
    cont_4 += 1
elif velocidade[c] > 4 and velocidade[c] <= 5:
    cont_5 += 1
elif velocidade[c] > 5 and velocidade[c] <= 6:
    cont_6 += 1
elif velocidade[c] > 6 and velocidade[c] <= 7:
    cont_7 += 1
elif velocidade[c] > 7 and velocidade[c] <= 8:
    cont_8 += 1
elif velocidade[c] > 8 and velocidade[c] <= 9:
    cont_9 += 1
elif velocidade[c] > 9 and velocidade[c] <= 10:
    cont_10 += 1

print(valores_seleccionados)
print(cont_1)
print(cont_2)
print(cont_3)
print(cont_4)
print(cont_5)
print(cont_6)
print(cont_7)
print(cont_8)
print(cont_9)
print(cont_10)
print(cont_total)
```

```

frequencia = [] #Inicializa a lista de frequências
velocidades = list(range(0, 16)) #Velocidades de 0 a 15
f0 = 0
f1 = (cont_1 / cont_total)
f2 = (cont_2 / cont_total)
f3 = (cont_3 / cont_total)
f4 = (cont_4 / cont_total)
f5 = (cont_5 / cont_total)
f6 = (cont_6 / cont_total)
f7 = (cont_7 / cont_total)
f8 = (cont_8 / cont_total)
f9 = (cont_9 / cont_total)
f10 = (cont_10 / cont_total)
f11 = 0
f12 = 0
f13 = 0
f14 = 0
f15 = 0

frequencia = [f0, f1, f2, f3, f4, f5, f6, f7, f8, f9, f10, f11, f12, f13, f14, f15]
print('{} {}'.format(frequencia))

ELV_H13_2_30 = [0,0,0,1.8,3.8,7.5,10.6,13.9,17.7,22.5,28,30,30,30,30,30] #Curva da
máquina

lista_resposta = []

for a in range(0, 16):
    resposta = ELV_H13_2_30[a] * frequencia[a]
    lista_resposta.append(resposta)
print(lista_resposta)
potencia = sum(lista_resposta)
print(potencia)

```

```
total = 3*30*(potencia) #Potência mensal
```

```
print(total)
```

```
#Cálculo da frequência em horário fora da ponta
```

```
valores_selecionados = []
```

```
cont_1 = 0
```

```
cont_2 = 0
```

```
cont_3 = 0
```

```
cont_4 = 0
```

```
cont_5 = 0
```

```
cont_6 = 0
```

```
cont_7 = 0
```

```
cont_8 = 0
```

```
cont_9 = 0
```

```
cont_10 = 0
```

```
cont_total = 0
```

```
for c, tempo in enumerate(tempo_decimal):
```

```
    if tempo < 17.5:
```

```
        valores_selecionados.append(velocidade[c])
```

```
        cont_total += 1
```

```
        if velocidade[c] > 0 and velocidade[c] <= 1:
```

```
            cont_1 += 1
```

```
        elif velocidade[c] > 1 and velocidade[c] <= 2:
```

```
            cont_2 += 1
```

```
        elif velocidade[c] > 2 and velocidade[c] <= 3:
```

```
            cont_3 += 1
```

```
        elif velocidade[c] > 3 and velocidade[c] <= 4:
```

```
            cont_4 += 1
```

```
elif velocidade[c] > 4 and velocidade[c] <= 5:  
    cont_5 += 1  
elif velocidade[c] > 5 and velocidade[c] <= 6:  
    cont_6 += 1  
elif velocidade[c] > 6 and velocidade[c] <= 7:  
    cont_7 += 1  
elif velocidade[c] > 7 and velocidade[c] <= 8:  
    cont_8 += 1  
elif velocidade[c] > 8 and velocidade[c] <= 9:  
    cont_9 += 1  
elif velocidade[c] > 9 and velocidade[c] <= 10:  
    cont_10 += 1
```

```
valores_seleccionados = []
```

```
cont_11 = 0  
cont_12 = 0  
cont_13 = 0  
cont_14 = 0  
cont_15 = 0  
cont_16 = 0  
cont_17 = 0  
cont_18 = 0  
cont_19 = 0  
cont_20 = 0  
cont_total1 = 0
```

```
for c, tempo in enumerate(tempo_decimal):
```

```
    if tempo > 20.5:  
        valores_seleccionados.append(velocidade[c])  
        cont_total1 += 1
```

```

if velocidad[c] > 0 and velocidad[c] <= 1:
    cont_11 += 1
elif velocidad[c] > 1 and velocidad[c] <= 2:
    cont_12 += 1
elif velocidad[c] > 2 and velocidad[c] <= 3:
    cont_13 += 1
elif velocidad[c] > 3 and velocidad[c] <= 4:
    cont_14 += 1
elif velocidad[c] > 4 and velocidad[c] <= 5:
    cont_15 += 1
elif velocidad[c] > 5 and velocidad[c] <= 6:
    cont_16 += 1
elif velocidad[c] > 6 and velocidad[c] <= 7:
    cont_17 += 1
elif velocidad[c] > 7 and velocidad[c] <= 8:
    cont_18 += 1
elif velocidad[c] > 8 and velocidad[c] <= 9:
    cont_19 += 1
elif velocidad[c] > 9 and velocidad[c] <= 10:
    cont_20 += 1

cont_21 = cont_1 + cont_11
cont_22 = cont_2 + cont_12
cont_23 = cont_3 + cont_13
cont_24 = cont_4 + cont_14
cont_25 = cont_5 + cont_15
cont_26 = cont_6 + cont_16
cont_27 = cont_7 + cont_17
cont_28 = cont_8 + cont_18
cont_29 = cont_9 + cont_19
cont_30 = cont_10 + cont_20
cont_total2 = cont_total + cont_total1

print(valores_seleccionados)

```

```

print(cont_21)
print(cont_22)
print(cont_23)
print(cont_24)
print(cont_25)
print(cont_26)
print(cont_27)
print(cont_28)
print(cont_29)
print(cont_30)
print(cont_total2)

```

```

frequencia2 = [] #Inicializa a lista de frequências
velocidades2 = list(range(0, 16)) #Velocidades de 0 a 15
f0 = 0
f1 = (cont_21 / cont_total2)
f2 = (cont_22 / cont_total2)
f3 = (cont_23 / cont_total2)
f4 = (cont_24 / cont_total2)
f5 = (cont_25 / cont_total2)
f6 = (cont_26 / cont_total2)
f7 = (cont_27 / cont_total2)
f8 = (cont_28 / cont_total2)
f9 = (cont_29 / cont_total2)
f10 = (cont_30 / cont_total2)
f11 = 0
f12 = 0
f13 = 0
f14 = 0
f15 = 0

```

```

frequencia2 = [f0, f1, f2, f3, f4, f5, f6, f7, f8, f9, f10, f11, f12, f13, f14, f15]
print('{} {}'.format(frequencia2))

```

```
ELV_H13_2_30 = [0,0,0,1.8,3.8,7.5,10.6,13.9,17.7,22.5,28,30,30,30,30,30] #Curva da
máquina
```

```
lista_resposta = []
```

```
for a in range(0, 16):
    resposta = ELV_H13_2_30[a] * frequencia2[a]
    lista_resposta.append(resposta)
print(lista_resposta)
potencia = sum(lista_resposta)
print(potencia)
```

```
total = 21*30*(potencia) #Potência mensal
print(total)
```

```
#Cria a figura
```

```
plt.figure(figsize=(10, 7))
```

```
#Curva da frequência em horário de ponta
```

```
Eixo_x = np.linspace(min(velocidades), max(velocidades), 300)
spline = make_interp_spline(velocidades, frequencia, k=3)
Eixo_y = spline(Eixo_x)
plt.plot(Eixo_x, Eixo_y, label='Frequência na Ponta', linewidth=3, color = 'blue')
x= velocidades
y= frequencia
plt.scatter(x, y, color = 'black')
```

```
#Curva da frequência em horário fora da ponta
```

```
Eixo_x2 = np.linspace(min(velocidades2), max(velocidades2), 300)
spline = make_interp_spline(velocidades2, frequencia2, k=3)
Eixo_y2 = spline(Eixo_x2)
```

```
plt.plot(Eixo_x2, Eixo_y2, label='Frequência Fora de Ponta', linewidth=3, color = 'red')
x2= velocidades2
y2= frequencia2
plt.scatter(x2, y2, color = 'black')

plt.xticks(fontsize=18)
plt.yticks(fontsize=18)

plt.xlabel('Velocidade do Vento (m/s)', fontsize=20)
plt.ylabel('Frequência', fontsize=20)
plt.title('Gráfico - Frequência X Velocidade (C)', fontsize=20)
plt.legend(fontsize=18)
plt.grid(True)
plt.subplots_adjust(left=0.106, right=0.97, top=0.95, bottom=0.106)
plt.show()
```

APÊNDICE B – CÓDIGO EM PYTHON PARA A ROSA DOS VENTO

```

import pandas as pd
import math as mt
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.interpolate import make_interp_spline
import numpy as np
from windrose import WindroseAxes
import matplotlib.cm as cm

# Carrega os dados do Excel
data = pd.read_excel('analise_2023.xlsx')
#data = data.loc[0:102574]

# Supondo que as colunas do Excel sejam 'Velocidade_Vento' e 'Direcao_Vento'
ws = data['Wind Speed (S-WCF 20526619:20519168-1), m/s, Ufersa Caraubas Velocidade do vento']
wd = data['Wind Direction (S-WCF 20526619:20519168-3), *, Ufersa Caraubas Direcao do vento']

# Configurações do gráfico da rosa dos ventos
ax = WindroseAxes.from_ax()
ax.bar(wd, ws, normed=True, opening=0.8, edgecolor='white')
ax.set_legend()

# Ajustando o tamanho da fonte para os rótulos das direções
ax.set_xticklabels(['E', 'N-E', 'N', 'N-W', 'W', 'SW', 'S', 'S-E'], fontsize=16)

# Ajustando o tamanho da fonte da legenda
plt.legend(fontsize=16)

# Ajustando o tamanho da fonte dos valores da frequência de vento
for label in ax.get_xticklabels():
    label.set_fontsize(16)

```

```
for label in ax.get_yticklabels():  
    label.set_fontsize(16)
```

```
# Exibe o gráfico  
plt.title('2023', fontsize=16)  
plt.show()
```