

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**VINICIUS AMARO FERREIRA DA SILVA**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NO RIO  
GRANDE DO SUL: MAPAS DE CALOR DE VELOCIDADE DO VENTO E  
CÁLCULO DE POTÊNCIA DE TURBINAS**

**Bagé**

**2024**

**VINICIUS AMARO FERREIRA DA SILVA**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NO RIO  
GRANDE DO SUL: MAPAS DE CALOR DE VELOCIDADE DO VENTO E  
CÁLCULO DE POTÊNCIA DE TURBINAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Carlos Sonier Cardoso do Nascimento

Coorientador: Marcelo Romero de Moraes

**Bagé**

**2024**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

S586a Silva, Vinicius Amaro Ferreira da  
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NO  
RIO GRANDE DO SUL: MAPAS DE CALOR DE VELOCIDADE DO VENTO E  
CÁLCULO DE POTÊNCIA DE TURBINAS / Vinicius Amaro Ferreira da  
Silva.  
65 p.  
  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, ENGENHARIA DE ENERGIA, 2024.  
"Orientação: Carlos Sonier Cardoso do Nascimento".  
  
1. velocidade do vento. 2. mapas de calor. 3. turbinas  
eólicas. 4. geração de energia. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal do Pampa

**VINICIUS AMARO FERREIRA DA SILVA**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NO RIO  
GRANDE DO SUL: MAPAS DE CALOR DE VELOCIDADE DO VENTO E CÁLCULO  
DE POTÊNCIA DE TURBINAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para o Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 18 de dezembro de 2024.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Carlos Sonier Cardoso do Nascimento

Orientador  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Marcelo Romero de Moraes

Coorientador  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Enoque Dutra Garcia  
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **ENOQUE DUTRA GARCIA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2024, às 11:30, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARCELO ROMERO DE MORAES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2024, às 11:35, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CARLOS SONIER CARDOSO DO NASCIMENTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2024, às 11:36, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1627354** e o código CRC **D1DD299F**.

Dedico este trabalho ao meu pai e minha mãe, que  
são meus heróis e meus alicerces.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais, Rosangela Afonso Ferreira e Aluísio José da Silva. Não tenho palavras para descrever a importância que vocês têm em minha vida, e como são os pilares da minha formação, caráter e sucesso, não só neste caminho acadêmico, mas em toda minha vida e todo meu futuro profissional. Este trabalho é nosso, essa conquista é nossa.

Gostaria de agradecer aos meus amigos que ganhei em Bagé que, sem dúvida, dividiram grande parte desta trilha comigo, Caíque Nunes, Rodrigo Buroni, Valentina Buroni, Lauro Neto e, em especial, a melhor amiga que a universidade me deu, e que será para a vida toda, com certeza minha parceira de faculdade, minha “Besto Friend” Dominnic Gomes, obrigado pelas incontáveis horas de estudo e diversão.

Quero agradecer à segunda família que ganhei em Bagé, Volnei Pacheco, Maria de Lourdes e Fernanda Muniz, ou melhor, “Seu Volnei”, “Dona Malu” e “Nanda”. Nos momentos difíceis que eu não tinha ideia do que seria o amanhã, vocês me acolheram, me ajudaram, e me trataram como mais um filho nessa família. Até o momento não arranjei palavras para descrever a imensidão da minha gratidão, nem tampouco pretendo encontrar, irei continuar almejando uma vida de muitas conquistas, e quero que saibam que todas elas serão partes suas também.

Gostaria de agradecer a todos os professores que me ajudaram durante essa jornada acadêmica, meu orientador e coorientador, Carlos Sonier e Marcelo Romero, e também Enoque Garcia, Jocemar Parizzi, e ao técnico Enilton, o conhecimento que vocês me passaram não acaba hoje, irei usar todo ele para alcançar o mais alto que eu puder, e sei que se eu utilizar tudo o que vocês me ensinaram, realmente será muito alto. Agradeço a parceria, compreensão, paciência (as vezes não) de todos, muito obrigado por tudo!

Aqui, agradeço a, com todas as palavras, mulher que escolhi nessa vida, aquela que detém todo o carinho que pretendo dar a alguém, que brilha meus olhos ao encontrar e palpita meu peito quando eu a abraço. Você simplesmente mudou a minha vida, e durante todos esses anos de universidade, e até mesmo nos momentos que eu realmente pensei que deveria desistir de mim e minhas ambições, você estava lá comigo. Poder saber que encontrei alguém nesse tão vasto mundo para amar e que essa pessoa sempre estará comigo, me faz pensar que, apesar de tudo que irei conquistar nessa vida, uns dois maiores presentes que a vida poderia me dar, eu já ganhei. Carolina Muniz, eu simplesmente, assim, no mais profunda significado dessas palavras, eu simplesmente te amo.

Por último, gostaria de agradecer a mim mesmo nesses anos de universidade, e dizer aqui para o Vinicius de 2017: Cara, sim, nós chegamos aqui.

“Conhecendo tanto a derrota quanto a vitória,  
andando por aí derramando lágrimas, é assim  
que você se torna um verdadeiro homem”.

Shanks, o Ruivo

## RESUMO

Devido à conscientização sobre o uso de recursos energéticos no mundo e sua disponibilidade, a evolução tecnológica caminha para um cenário onde a tendência é que toda a energia elétrica utilizada seja proveniente de fontes renováveis de energia. Consequentemente, esse cenário estimulou uma corrida por tecnologias para um domínio do mercado de geração de energia que produza o mínimo de poluentes, mostrando resultados de novos meios de conversão e aproveitamento de diversas origens em tempo recorde. Para tanto, é imprescindível o estudo da viabilidade de implementação dessas novas fontes em diferentes regiões, visando levar a geração de energia para diferentes regiões, com novos empreendimentos e diferentes métodos de implantação. No caso da fonte eólica, é importante, primeiramente, o estudo do local em relação à velocidade de vento disponível para a geração, podendo englobar diferentes técnicas para este fim, sendo esta uma das etapas mais cruciais para o sucesso da geração. Com variações de vento em relação à região e a altura, pode-se haver mais de um cenário de produção de energia viável em um mesmo ponto a ser executado o projeto eólico, levando a estudos para a escolha do melhor cenário de geração. A produção de energia anual está intrinsecamente ligada ao local de instalação do aerogerador, o que engloba os fatores que podem ditar a velocidade que o aerogerador irá conseguir extrair e a potência que poderá ser gerada durante este tempo. Tendo isso em mente, o presente trabalho visa mostrar como a variação de velocidade de vento em diferentes alturas pode influenciar drasticamente a potência disponível para turbinas eólicas e na geração anual de energia em cenários de geração, demonstrando em dados do Rio Grande do Sul expostos em mapas de calor os possíveis contextos que podem ser levados em consideração para a tomada de decisão devido à variação da velocidade do vento. Utilizando dados de velocidade dos ventos disponibilizados em plataformas, foram feitos os mapas de calor para as alturas disponíveis, e calculadas as potências nas velocidades de vento para os diferentes cenários. Com a potência de turbinas de exemplo, é possível calcular a geração anual de energia pela frequência de ocorrência dos conjuntos de velocidade do vento. O estudo se mostrou útil para análises de geração específicas para cenários que o usuário deseja, podendo ser focado apenas para uma região de estudo específica.

**Palavras-Chave:** velocidade do vento, potência, mapa de calor, energia eólica.

## ABSTRACT

Due to growing awareness of the use and availability of energy resources worldwide, technological evolution is moving toward a scenario where all electricity used is expected to originate from renewable energy sources. Consequently, this scenario has triggered a race for technologies to dominate the energy generation market with minimal pollution, delivering results in record time through new methods of conversion and utilization of diverse energy sources. Therefore, it is essential to study the feasibility of implementing these new sources in different regions, aiming to expand energy generation with new projects and diverse deployment methods. In the case of wind energy, the primary step is studying the location concerning the wind speed available for generation, which may involve various techniques. This is one of the most critical stages for successful energy generation. Given the variations in wind speed by region and height, multiple viable energy production scenarios may exist at a single site designated for a wind project, necessitating studies to determine the best generation scenario. The annual energy production is intrinsically linked to the installation site of the wind turbine, encompassing factors that influence the speed the turbine can harness and the power it can generate over time. With this in mind, the present study aims to demonstrate how variations in wind speed at different heights can drastically impact the power available for wind turbines and the annual energy generation in different scenarios. Using data from Rio Grande do Sul, heat maps illustrate the potential contexts to consider when making decisions based on wind speed variation. Utilizing wind speed data available on platforms, heat maps were generated for the available heights, and the power corresponding to wind speeds was calculated for different scenarios. With example turbine power, it is possible to calculate the annual energy generation based on the frequency of wind speed occurrences. The study proved useful for specific generation analyses tailored to scenarios of interest, focusing on particular study regions.

**Keywords:** Wind Speed, Power, Heat Map, eolic energy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Variação do Consumo Mensal de Energia entre 2019 e 2023. ....	1
Figura 2: Crescimento da Capacidade Instalada de Energia Eólica no Brasil em MW. ....	3
Figura 3: Geração por Estado - 2023 (Megawatt médio), com destaque para o Rio Grande do Sul. ....	4
Figura 4: Diferenças entre as velocidades em razão da altura. ....	7
Figura 5: Distribuição da velocidade do vento e da Função de Weibull. ....	10
Figura 6: Função de Weibull com diferentes valores de fator de forma. ....	11
Figura 7: Estrutura básica de um aerogerador de eixo horizontal. ....	12
Figura 8: Correlação entre altura da torre, diâmetro do rotor e potência nominal. ....	13
Figura 9: Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás. ....	14
Figura 10: Curvas de coeficiente de potência para diferentes modelos de aerogeradores. ....	15
Figura 11: Método para obtenção de dados de alta resolução por downscaling. ....	18
Figura 12: Mapa de calor de densidade de descargas elétricas. ....	20
Figura 13: Fluxograma da metodologia do trabalho. ....	21
Figura 14: Interface da plataforma Global Wind Atlas. ....	21
Figura 15: Download do arquivo no formato .TIF para a área selecionada. ....	22
Figura 16: Mapa antes e depois de exclusão de dados adjacentes. ....	23
Figura 17: Mapa no software Global Mapper. ....	23
Figura 18: Conversão do arquivo XYZ para CSV. ....	26
Figura 19: Troca de colunas no arquivo CSV. ....	27
Figura 20: Cálculos de potência da turbina. ....	29
Figura 21: Valores de potência calculados. ....	29
Figura 22: Primeira etapa do código para criação do mapa de calor. ....	30
Figura 23: Segunda parte do código para criação do mapa de calor. ....	31
Figura 24: Terceira parte do código para criação do mapa de calor. ....	32
Figura 25: Quarta parte do código para criação do mapa de calor. ....	32
Figura 26: Código para geração da Distribuição de Weibull. ....	33
Figura 27: Primeira parte do código para cálculo de potência anual. ....	34
Figura 28: Segunda parte do código para cálculo de potência anual. ....	35
Figura 29: Mapa de calor para 10 metros de altura. ....	36
Figura 30: Mapa de calor para 10 metros de altura com os <i>tooltips</i> . ....	37

Figura 31:Informações mostradas ao clicar no <i>tooltip</i> . .....	37
Figura 32:Mapas para as diferentes alturas estudadas e a intensidade dos valores de velocidade do vento. ....	38
Figura 33:Comparação de intensidade das escalas de velocidade do vento entre mapa desenvolvido, à esquerda, e o Global Wind Atlas, à direita. ....	39
Figura 34:Distribuição de Weibull para 10 metros de altura.....	39
Figura 35:Distribuição de Weibull para 50 metros de altura.....	40
Figura 36:Distribuição de Weibull para 100 metros de altura.....	40
Figura 37:Distribuição de Weibull para 150 metros de altura.....	41
Figura 38:Distribuição de Weibull para 200 metros de altura.....	41
Figura 39: Determinação da potência total para as ocorrências de vento em 10 metros de altura para a Turbina ACSA A17/90. ....	42
Figura 40:Determinação da potência total para as ocorrências de vento em 50 metros de altura para a Turbina ACSA A17/90. ....	43
Figura 41:Figura 38:Determinação da potência total para as ocorrências de vento em 100 metros de altura para a Turbina Siemens Gamesa SG 3.4-145. ....	43
Figura 42:Figura 38:Determinação da potência total para as ocorrências de vento em 150 metros de altura para a Turbina Siemens Gamesa SG 3.4-145. ....	44
Figura 43:Figura 38:Determinação da potência total para as ocorrências de vento em 200 metros de altura para a Turbina Siemens Gamesa SG 3.4-145. ....	44
Figura 44:Energia anual gerada para cada altura.....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:Consumo de Energia Elétrica Total na Rede nos Estados da Região Sul em 2023. ...	2
Tabela 2:Consumo de Energia Elétrica Residencial na Rede nos Estados da Região Sul em 2023 .....	2
Tabela 3:Valores de densidade de ar para cada altura.....	28
Tabela 4:Modelos de Turbinas escolhidos. ....	28

## LISTA DE SIGLAS

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica

BEMSPampa – Balanço Energético da Metade Sul - Bioma Pampa no contexto da Transição Energética

TIF - *Tag Image File Format*

JSON - JavaScript Object Notation

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas

RS - Rio Grande do Sul

CSV - *Comma-separated values*

HTML - *Hyper Text Markup Language*

GWA – *Global Wind Atlas*

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Objetivo .....	4
1.1.1. Objetivos Específicos .....	5
1.2. Justificativa.....	5
2. ESTADO DA ARTE.....	6
2.1. Variações de Velocidade do Vento .....	6
2.1. Variação da Densidade do Ar com a Altura .....	7
2.2. Função de Distribuição de Frequências de Weibull .....	8
2.3. Estruturas de Aerogeradores.....	11
2.4. Energia e Potência Extraída do Vento .....	13
2.5. Capacidade de Geração Anual.....	16
2.6. Plataformas e Softwares de Dados Geoespaciais .....	16
2.6.1. Global Wind Atlas .....	17
2.6.2. Software QGIS .....	18
2.6.3. Software Global Mapper .....	18
2.7. Linguagem Python para análise de dados.....	19
2.7.1. Mapas de Calor no Python .....	19
3. METODOLOGIA .....	20
3.1. Obtenção dos dados para análise .....	21
3.2. Análise de dados via Python.....	24
3.2.1. Preparação do ambiente de programação .....	24
3.2.2. Conversão do Arquivo XYZ para CSV .....	25
3.2.3. Cálculo de potências da Turbinas.....	27
3.2.4. Criação do Mapa de Calor .....	30

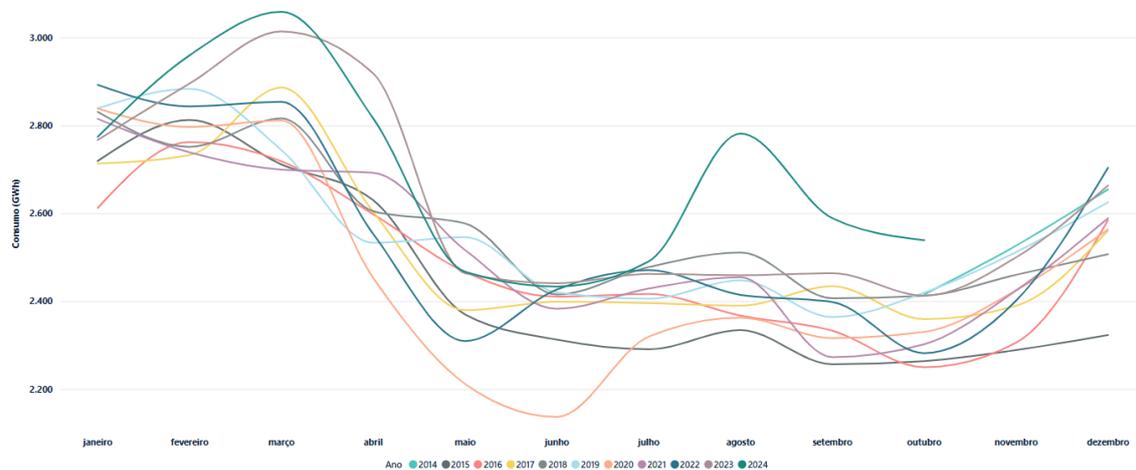
3.2.5.	Criação do gráfico da Distribuição de Weibull .....	33
3.2.6.	Cálculo da energia anual gerada.....	33
4.	Resultados .....	36
5.	Conclusão .....	45
REFERÊNCIAS	.....	47

# 1. INTRODUÇÃO

O avanço da sociedade, tanto tecnológica como socialmente, induz a necessidade de mudanças nos métodos de geração energia elétrica atuais, tendo em vista que o aumento de consumo de energia também haverá o aumento de produção de energia, mas devido à novas políticas energéticas existentes, a produção de energia a partir de fontes com alta emissão de gases poluentes tomou um rumo regressivo em relação ao aumento do seu uso de acordo com o crescimento populacional. (VILLANUEVA; CATAPAN; LOUSADA, 2023).

A EPE disponibiliza em seus dados abertos documentos sobre o Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas), onde é possível observar tabelas e gráficos da variação de uso da energia elétrica desde 2004. Para o Rio Grande do Sul, apesar de ter picos de consumo no começo do ano devido ao verão, mas os valores durante os outros meses do ano se mantêm estável entre 2.2 e 2.6 GWh, com exceção de eventos fora da curva, como em junho de 2020 durante a pandemia de COVID-19 e em agosto de 2024, período das enchentes no estado, como pode ser visto na Figura 1 (EPE, 2024).

Figura 1: Variação do Consumo Mensal de Energia entre 2019 e 2023.



Fonte: EPE.

Na região Sul, o Rio Grande do Sul é o segundo maior consumidor de energia elétrica (Tabela 1), ficando atrás do Paraná e à frente de Santa Catarina, mas ainda sim tem um volume maior de consumo de energia elétrica residencial em relação aos outros dois estados (Tabela 2). Isso é um fato razoável devido ao estado ter uma maior densidade populacional e demográfica (EPE, 2024).

Tabela 1:Consumo de Energia Elétrica Total na Rede nos Estados da Região Sul em 2023.

<b>Consumo de Energia Total por UF em 2023 (MWh)</b>			
<b>Mês</b>	<b>Paraná</b>	<b>Santa Catarina</b>	<b>Rio Grande do Sul</b>
Janeiro	3.051.127,7	2.481.667,1	2.766.682,5
Fevereiro	3.031.414,4	2.697.022,1	2.894.929,6
Março	3.160.725,1	2.779.518,7	3.013.326,5
Abril	3.138.879,3	2.588.328,3	2.918.029,2
Maio	2.987.537,9	2.417.687,6	2.463.457,7
Junho	2.879.631,2	2.377.405,8	2.440.947,8
Julho	2.929.545,9	2.326.193,2	2.461.912,2
Agosto	3.016.596,1	2.324.411,8	2.459.000,2
Setembro	3.023.561,7	2.332.972,5	2.463.568,1
Outubro	3.165.055,4	2.476.443,7	2.412.491,0
Novembro	3.160.006,9	2.376.065,7	2.499.647,2
Dezembro	3.207.776,0	2.504.311,9	2.662.957,2
<b>Total</b>	<b>36.751.857,7</b>	<b>29.682.028,3</b>	<b>31.456.949,2</b>

Fonte: Adaptado pelo Autor de EPE, 2024.

Tabela 2:Consumo de Energia Elétrica Residencial na Rede nos Estados da Região Sul em 2023

<b>Consumo de Energia Residencial por UF em 2023 (MWh)</b>			
<b>Mês</b>	<b>Paraná</b>	<b>Santa Catarina</b>	<b>Rio Grande do Sul</b>
Janeiro	777.570,06	647.471,68	922.862,99
Fevereiro	776.616,94	780.004,88	1.048.480,42
Março	766.855,49	746.570,29	990.447,12
Abril	779.956,01	663.621,98	911.390,51
Maio	698.247,94	590.790,77	760.431
Junho	703.333,4	580.929,16	780.062,67
Julho	720.755,25	554.166,2	837.209,66
Agosto	723.761,17	524.823,44	814.228,69
Setembro	743.241,23	545.512,8	803.368,76
Outubro	814.175,07	613.215,89	783.241,2
Novembro	812.872,83	552.278,63	811.094,81
Dezembro	846.168,68	655.377,77	945.075,21
<b>Total</b>	<b>9.163.554,07</b>	<b>7.454.763,49</b>	<b>10.407.893,04</b>

Fonte: Adaptado pelo autor de EPE,2024.

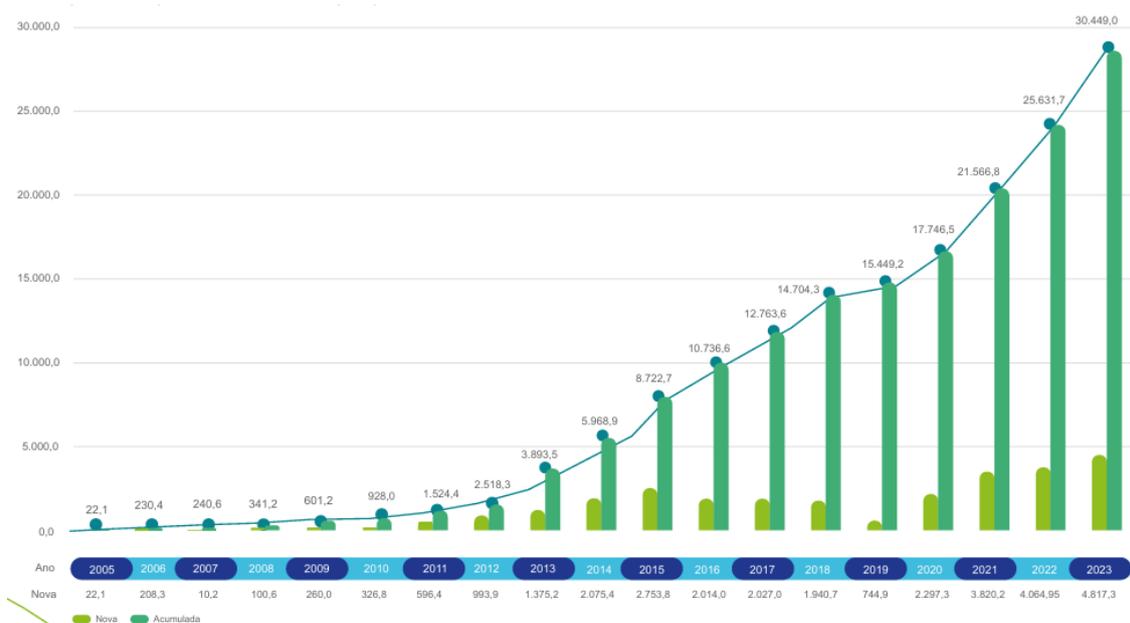
Devido a este aumento de consumo de energia e diretrizes para cessão do uso de fontes poluentes, a procura por fontes que emitissem valores inexpressivos de poluentes impulsionou a transição energética, visando ter na matriz energética e elétrica do mundo a maior participação possível de fontes renováveis (VILLANUEVA; CATAPAN; LOUSADA, 2023).

Em 2015 na capital da França, foi assinado o Acordo de Paris, onde diversas nações compactuaram com diretrizes de diminuição de poluentes e melhorias nas

condições climáticas mundiais a partir da diminuição de emissão de carbono, mantendo-se em um padrão de aquecimento planetário menor que 1,5°C, padrão esse que, quando não respeitado, pode causar danos intensos ao ecossistema e tudo que o engloba. Isso marca o início de diversos planos de transição energética em diversos países, desde a procura por meios de controlar ou diminuir a emissão de gases existentes, até a mudança da matriz elétrica e energética para uma matriz limpa e renovável (PETROBRAS, 2024).

Entre as fontes de energia renovável mais relevantes no momento, a energia eólica é uma das que tem mais destaque, devido a boa potência gerada e à sua característica de poder gerar tanto durante o dia como a noite se comparado à energia solar, por exemplo. Com a exploração do potencial brasileiro, a curva de crescimento da capacidade instalada no Brasil aumenta a cada ano, onde podemos observar seu crescimento na Figura 2 (CORRÊA, 2021).

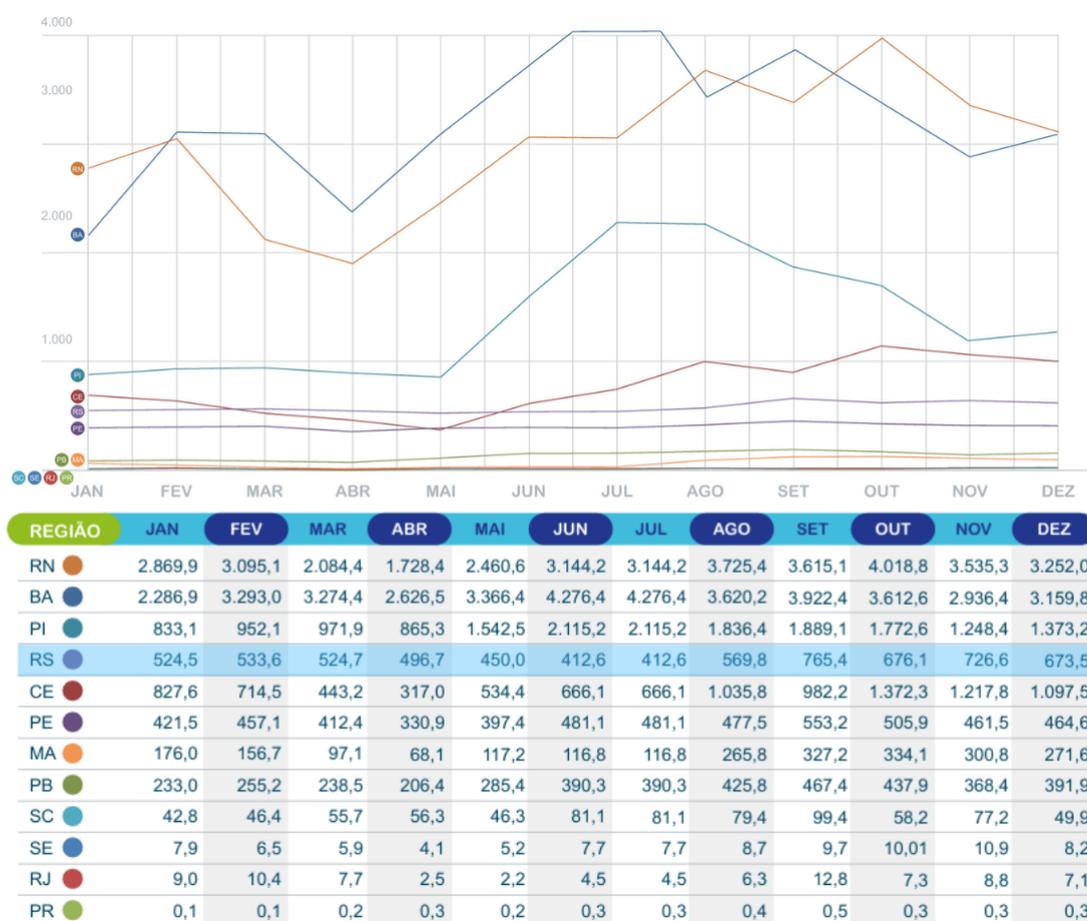
Figura 2: Crescimento da Capacidade Instalada de Energia Eólica no Brasil em MW.



Fonte: ABEEólica, 2024.

Dentre as regiões com grande potencial de geração eólica no Brasil, o Rio Grande do Sul destaca-se pela estabilidade de geração durante o ano, sendo o único estado fora do Nordeste que aparece entre os cinco primeiros estados que mais geraram energia eólica no ano de 2023, como mostrado na Figura 3. Isso mostra como o estado já é um grande representante desta fonte no país, e que possui muito potencial para implementação de novos empreendimentos em todo o seu território (ABEEólica, 2024).

Figura 3: Geração por Estado - 2023 (Megawatt médio), com destaque para o Rio Grande do Sul.



Fonte: Adaptado de ABEEólica, 2024.

Para que a geração seja viável, é necessário o estudo do local, disponibilidade e potencial eólico para implementação de projetos de produção de energia, pois esses requisitos são importantes tendo em vista o impacto direto em como será realizada a escolha do local do empreendimento, e qual o tipo de turbina a ser utilizado em virtude dos dados de velocidade do vento que estão disponíveis para estudo (SANTOS, 2022)

### 1.1. Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo fazer a análise dos dados de velocidade do vento obtidas em diferentes alturas no território do Rio Grande do Sul, e de como essas variáveis podem interferir na produção de energia de aerogeradores implementados neste cenário.

### **1.1.1. Objetivos Específicos**

- Fazer um estudo do comportamento da velocidade do vento em diferentes alturas;
- Desenvolver mapas de calor que transfiram as informações de velocidade do vento;
- Analisar geração de energia anual nos cenários apresentados.

### **1.2. Justificativa**

Em vista de questões de disponibilização de informações, existem alguns materiais disponíveis que trazem conteúdos que abrangem os temas de velocidade de vento e potencial energético.

O Atlas Eólico do Rio Grande do Sul, consolidado como fonte de informações sobre velocidade do vento desde sua publicação em 2002, e sua atualização em 2014, traz informações de variações do vento entre 100 e 150 metros de altura, assim como o potencial eólico nas mesmas, visando o incentivo à implementação desta fonte. (Atlas Eólico do Rio Grande do Sul, 2014).

A Plataforma do BEMSPampa visa investigar os recursos energéticos especificamente no bioma pampa, definida pela mesorregião Metade Sul Rio Grandense, com o objetivo de disponibilizar para acadêmicos e empreendedores as informações energéticas sobre esta metade do estado, e seu potencial para a geração de energia no cenário da transição energética. (BEMSPampa, 2024).

O presente trabalho apresenta um viés diferente na visão do usuário, onde se busca que ele possa decidir qual seria o melhor cenário para seu empreendimento de acordo com escolhas específicas do seu projeto, como qual aerogerador será utilizado, o local de instalação, e sua necessidade de geração anual, podendo ser feita uma análise completa de disponibilidade de geração. A inserção de informações sobre os equipamentos, gerando cenários para estes especificamente, diferem o estudo feito dos demais disponíveis.

## **2. ESTADO DA ARTE**

Neste capítulo serão abordados fatores que influenciam na geração anual de energia que podem ser desempenhadas por aerogeradores.

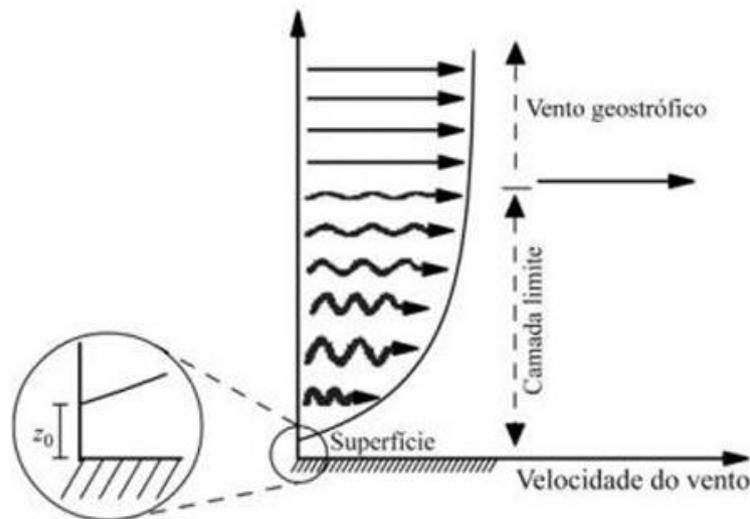
### **2.1. Variações de Velocidade do Vento**

As variações do vento que ocorrem no planeta decorrem de diversos fenômenos, um deles sendo a convecção térmica, onde o aquecimento do ar nas regiões tropicais faz com que ocorra uma troca de temperatura para as regiões polares justamente devido ao movimento do vento. Essas regiões são mais aquecidas devido à maior incidência de irradiação solar, que acaba provocando esse fenômeno devido à forma não uniforme de distribuição de raios solares na terra (SANTOS, 2022).

O funcionamento do movimento do vento na atmosfera depende da magnitude do sistema em que está inserido, pois pode haver diferentes influências na sua velocidade e direção. Os sistemas de macroescala são descritos em milhares de quilômetros e influenciados por dois efeitos, o aquecimento não uniforme do planeta entre o equador e os polos, e o Efeito Coriolis, que depende da rotação do planeta e resulta no vento geostrófico. O sistema de mesoescalar é influenciado, em maioria, pela topografia e mudanças relacionadas a cobertura da terra. E o sistema de microescala está relacionado a características do terreno como cobertura vegetal e outros obstáculos que influenciam a velocidade do vento (Atlas Eólico do Rio Grande do Sul, 2014).

A velocidade do vento, assim como qualquer outro fluido, sofre influência de obstáculos e da sua localização para mover-se livremente, podendo assim ter o módulo de sua velocidade diminuído de acordo com o que limita seu movimento. Isso é a dependência da rugosidade do terreno, onde com o aumento dessa variável, diminui-se o valor de velocidade do fluido. O vento então está intimamente relacionado à altura, já que com o aumento dessas grandezas, se reduzem esses obstáculos, e essas faixas de interação entre vento e altura são divididos em partes, sendo elas a superfície, a camada limite e o vento geostrófico, como pode ser visto na Figura 4 (PESTANA, 2016).

Figura 4: Diferenças entre as velocidades em razão da altura.



Fonte: Pestana, 2016.

## 2.1. Variação da Densidade do Ar com a Altura

A densidade do ar está diretamente relacionada à altura, pois a pressão atmosférica passa por um decréscimo exponencial de acordo com o aumento da mesma, que pode ser evidenciada, por exemplo, pelo enjoo que as pessoas sentem de acordo com o aumento de altitude, que acontece em decorrência à falta de oxigênio, pois quanto maior a altitude, menor a pressão atmosférica (NÓBREGA, 2022).

Para expressar a relação da densidade de massa do ar com a pressão, podemos usar a Equação 1.

$$\rho(h) = \frac{P(h) * M}{R * T} \quad (1)$$

Onde:

- $\rho(h)$  é a densidade da massa do ar naquela altura, em  $\text{kg/m}^3$ ;
- $P(h)$  é a pressão atmosférica naquela altura, em Pa;
- $M$  é a massa molar do gás, em  $\text{kg/mol}$ ;
- $R$  é a constante dos gases ideais, em  $\text{J/mol} * \text{K}$ ;
- $T$  é a temperatura na altura  $h$ , em K.

Calculando a derivada da pressão em relação a altitude, usando o sinal negativo devido a diminuição da pressão a partir do aumento da altura, e assumindo que a

temperatura não se altera com a altitude, para fins de cálculo de pressão e densidade a partir da altura, obtém-se a Equação 2 para a pressão (NÓBREGA, 2022).

$$P = P_0 * e^{-\frac{Mgh}{RT}} \quad (2)$$

Onde:

- P é a pressão do referido gás na altura especificada, em Pa;
- P<sub>0</sub> é a pressão do gás a nível do mar, em Pa;
- g a aceleração da gravidade, em m/s<sup>2</sup>;
- R a constante dos gases ideais, em J/mol\*K;
- M é a massa molar do gás, em kg/mol;
- T é a temperatura, em K.

Com a pressão do ar em diferentes alturas, é possível calcular a densidade do ar a partir da Equação 3 (CRESESB, 2008).

$$\rho = \frac{P}{R*T} \quad (3)$$

## 2.2. Função de Distribuição de Frequências de Weibull

Como os dados de velocidade do vento são influenciados por variações aleatórios que são pouco previsíveis, faz-se necessário o ato de individualizar esses números para fins de análise, onde geralmente são contabilizados números de ocorrências de velocidade, divididos por classes de acordo com a necessidade do usuário, para se obter a porcentagem da ocorrência por classe em relação do número total de medidas tomadas, o que é chamado de frequência de distribuição da velocidade do vento (CUSTÓDIO, 2009). Essas velocidades tomadas podem ser descritas pela Equação 4.

$$V = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (4)$$

Onde:

- V= Velocidade média do vento, em m/s;
- n = número de registros, adimensional;

- $i$  = identificação do registro.

Dentre as funções de densidade de probabilidade utilizadas para a distribuição do vento, a função de Weibull é a que melhor descreve a probabilidade de ocorrência de uma determinada velocidade do vento (CUSTÓDIO, 2009). A função de Weibull é dada pela seguinte expressão descrita na Equação 5.

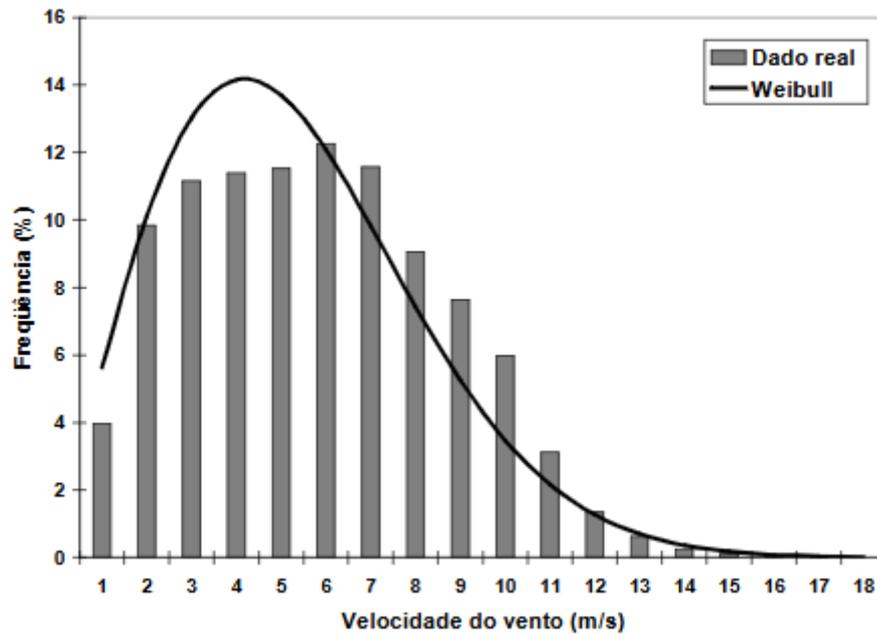
$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (5)$$

Onde:

- $f(v)$  = função de densidade de probabilidade;
- $v$  = velocidade do vento, em m/s;
- $c$  = fator de escala, em m/s;
- $k$  = fator de forma, adimensional.

Quando sobrepostas, a distribuição das velocidades do vento e a função de Weibull, onde os valores de fator de forma e de escala são descritos a partir destes mesmos dados, é esperado uma curva com comportamento parecido com a distribuição dessas velocidades (Figura 5). O fator que está associado à velocidade média do vento no local é o fator de escala, estando representado em m/s. O outro fator é aquele que tangencia os valores que não estão na média, mas sim em valores de velocidade ao redor desta, onde essa variação designa o formato da forma de função de distribuição da velocidade do vento (CUSTÓDIO, 2009).

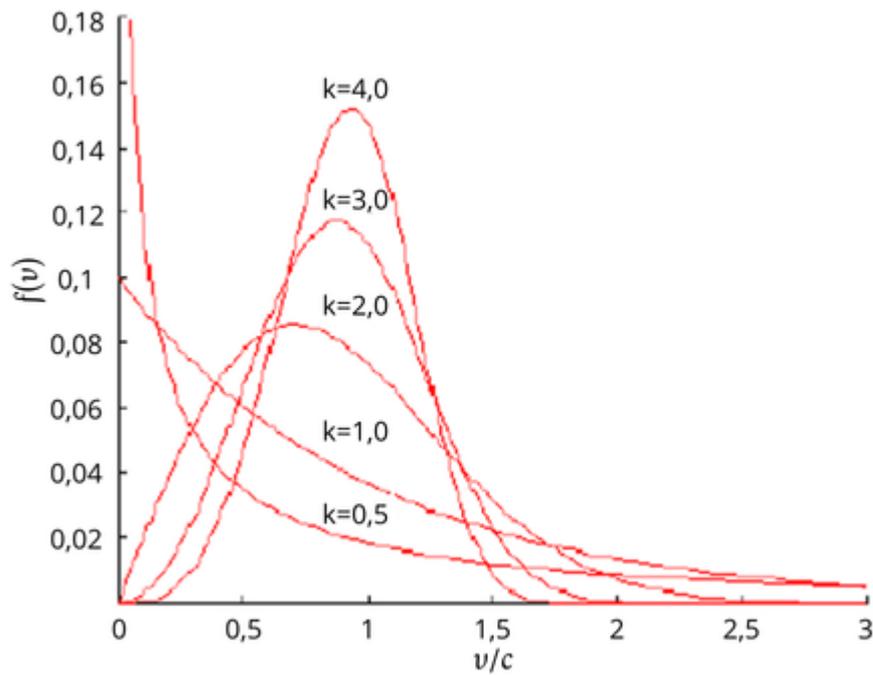
Figura 5: Distribuição da velocidade do vento e da Função de Weibull.



Fonte: Camelo et al., 2008.

O fator de forma  $k$  pode influenciar diretamente no comportamento da curva da função de distribuição de Weibull (Figura 6), fazendo com que a função tome a forma de outras funções de densidade de probabilidade, e uma das probabilidades que se forma é a função de distribuição de Rayleigh. Essa função é representada com a função de Weibull com fator de forma com valor igual a 2, e é muito utilizada em estudos de velocidade do vento iniciais, quando se conhece apenas a velocidade média do vento, e seu comportamento em questão de frequência não é conhecido (CUSTÓDIO, 2009).

Figura 6: Função de Weibull com diferentes valores de fator de forma.

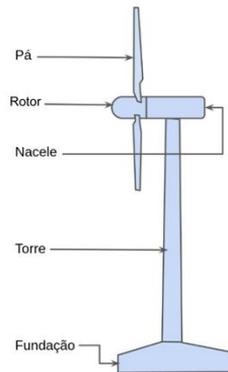


Fonte: Adaptado de Oliveria, 2011.

### 2.3. Estruturas de Aerogeradores

Para o aproveitamento da energia eólica disponível no vento, são usados os aerogeradores, estruturas que comportam componentes que juntos conseguem aproveitar a velocidade do vento para realizar as conversões de energética cinética em mecânica, e a energia mecânica em energia elétrica, através de processos de transformação de energia a partir de rotação do eixo (SANTOS, 2022). Os aerogeradores podem ser classificados a partir do seu eixo, podendo ser de eixo vertical, e de eixo horizontal. Um aerogerador de eixo horizontal tem em sua estrutura, no geral, torre, nacele, pás e rotor, como mostrado na Figura 7.

Figura 7: Estrutura básica de um aerogerador de eixo horizontal.

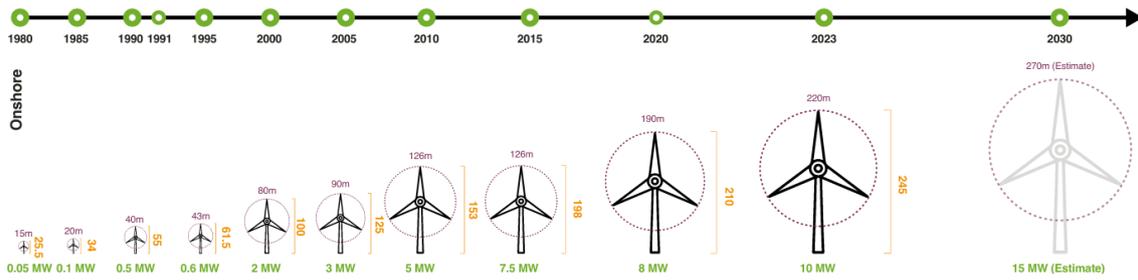


Fonte: Adaptado de Braga, 2024.

- Torre: Estrutura que comporta a nacelle e as pás do aerogerador, com altura, diâmetro e peso variáveis de acordo com o tipo de aerogerador.
- Nacelle: Compartimento instalado acima da torre onde ficam localizados os dispositivos que fazem a transformação da energia mecânica em energia elétrica, como caixa multiplicadora, freios, gerador, acoplamentos, controles eletrônicos e outros componentes que fazem parte do conjunto de conversão de energia.
- Pás: São os componentes que tem relação direta com o vento, e transferem a energia potencial dele para o rotor em forma de energia mecânica. Têm estrutura aerodinâmica para que seu ângulo consiga transferir a força necessária para o movimento.
- Rotor: Conjunto de equipamentos ligados desde o ponto de conexão mecânica das pás até o ponto no gerador, e ele que transfere a energia mecânica retirada do vento até o gerador.

A altura e dimensão das turbinas tem sido alvo de interesse, a fim de aumentar o aproveitamento da velocidade de vento incidente, já que existem efeitos como a rugosidade quanto mais perto da superfície. Então a elevação da altura da torre pode ajudar a aumentar a produção de energia do aerogerador, dependendo do terreno em que está localizado (PESTANA, 2016). Essa relação pode ser vista na Figura 8, que demonstra a evolução tecnológica dos últimos anos, e projeção de tecnologias futuras.

Figura 8: Correlação entre altura da torre, diâmetro do rotor e potência nominal.



Fonte: Global Wind Report, 2024.

## 2.4. Energia e Potência Extraída do Vento

No caso de fontes eólicas, o estudo da disponibilidade, da produtividade e da eficiência de produção de energia se trata do primeiro passo para o estudo da energia que é gerada (SHARMA et al., 2021). Os ventos que podem produzir energia cinética suficiente para o movimento do aerogerador têm características de previsão incertas em relação ao desejado, podendo haver mudanças repentinas na sua intensidade, fato que leva a serem feitos cálculos da produção de energia potencialmente fornecida com esses ventos (Equação 6).

$$E = \frac{1}{2} mV^2 \quad (6)$$

A partir da energia cinética (E) provinda do vento, pode ser derivada em relação ao tempo, onde teremos a taxa de fluxo de massa por segundo ( $m^1$ ) de ar, e a velocidade em que essa massa é movida por segundo (Equação 7). A potência que pode ser extraída do vento depende da área varrida pela pá do aerogerador que a massa de ar move (A), assim como da densidade do ar como um fluido ( $\rho$ ) e o cubo da velocidade do vento ( $V^3$ ) (Equação 8).

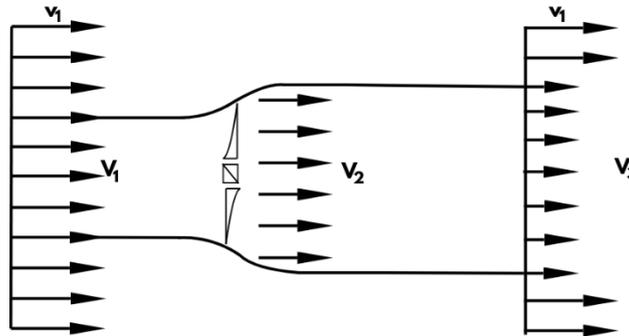
$$P_\omega = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} m^1 V^2 \quad (7)$$

$$P_\omega = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (8)$$

A conversão da energia cinética do vento em energia mecânica vai ocorrer quando as pás impedirem o deslocamento livre do fluido que está passando por elas, assim gerando potência no eixo. Mas nem toda a energia pode ser aproveitada na conversão, sendo utilizado então o coeficiente de potência, que se trata da fração de energia

disponível que é extraída pelas pás do rotor da turbina, como é mostrado na Figura 9(CRESESB, 2008).

Figura 9:Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás.



Fonte: Adaptado de CRESESB,2008.

O conjunto de pás considerado entra na determinação de Albert Betz para descobrir o máximo coeficiente de potência extraído pela turbina. Considerando as velocidades:

- $V_1$  para a velocidade antes das pás;
- $V_2$  para a velocidade nas pás;
- $V_3$  para a velocidade após as pás.

Pela lei da continuidade, as diferenças entre as energias nos três pontos têm que ser iguais, mas como uma redução de pressão do ar muito baixa, é aceitável presumir que sua variação seja nula, e pode-se dizer que a energia cinética extraída pelas pás será igual a diferença entre as duas energias antes e após passarem pelas pás, como na Equação 9. (CRESESB, 2008)

$$E_{ex} = \frac{1}{2} * m * (V_1^2 - V_3^2) \quad (9)$$

Considerando que os valores de  $V_1$  e  $V_3$  podem ter casos em que os dois valores sejam iguais, ou a velocidade do vento é reduzida a um valor nulo, pode-se concluir que o valor que demonstra o máximo de potência extraída é  $V_2$ . Se essa velocidade for conhecida, é possível usar a Equação 10 para a massa do ar. E por sua vez, o teorema de Rankine-Froude dá a relação entre essas velocidades, demonstrado na Equação 11.

$$\dot{m} = \rho * A * V_2 \quad (10)$$

$$V_2 = \frac{V_1 - V_3}{2} \quad (11)$$

Usando as Equações 11 e 12 na equação da potência extraída pelas pás 10, obtemos a seguinte Equação 13.

$$P_{ext} = \frac{1}{2} * \rho * A * V_1^3 * \left\{ \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{V_3}{V_1} \right] \left[ 1 - \left( \frac{V_3}{V_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (12)$$

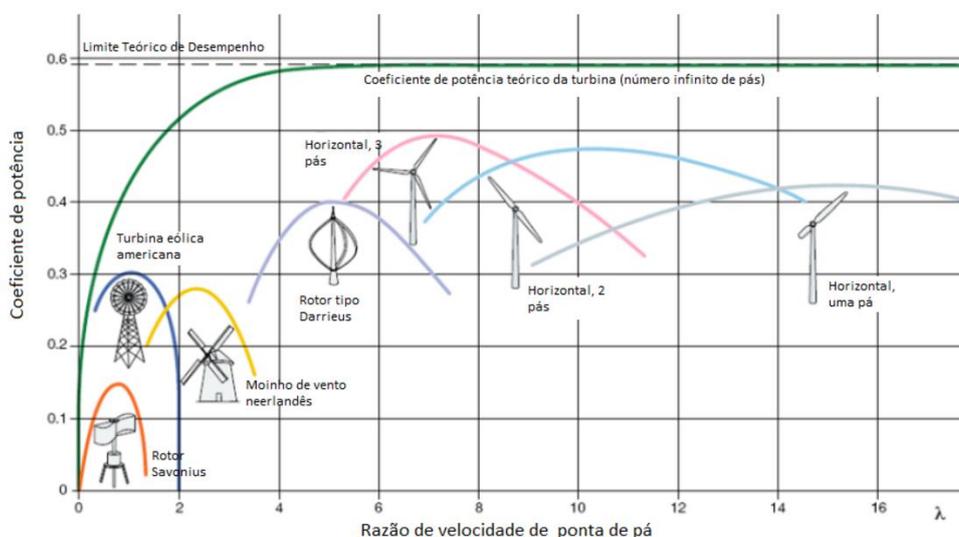
Dentro da Equação 13, podemos separar os termos em:

- $\frac{1}{2} * \rho * A * V_1^3$  representa na equação a potência do vento;
- $\left\{ \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{V_3}{V_1} \right] \left[ 1 - \left( \frac{V_3}{V_1} \right)^2 \right] \right\}$  representa na equação o coeficiente de potência Cp.

O valor de Cp representa na nossa equação o limite máximo de Betz, que se refere ao máximo de energia cinética que o rotor pode converter em energia mecânica, sendo este um valor teórico para a eficiências dos aerogeradores. Betz diz que o máximo valor que pode ser extraído em uma relação entre os valores de  $V_1$  e  $V_3$  é de 16/27, que retorna um valor de aproximadamente 59% de eficiência, ou uma constante de 0,59, descrevendo que apenas 1/3 da potência incidida na turbina passa por ela (CORRÊA, 2024).

Para diferentes modelos de turbinas, existem diferentes valores de coeficiente de potência, variando pelo número de pás, modelos e outras características intrínsecas a cada turbina. Como pode ser visto na Figura 10, o modelo horizontal de 3 pás é o que apresenta o coeficiente de potência mais alto, tendo assim mais desempenho para a extração de potência a partir da velocidade do vento (DIAS, 2022).

Figura 10: Curvas de coeficiente de potência para diferentes modelos de aerogeradores



Fonte: DIAS,2022.

## 2.5. Capacidade de Geração Anual

Existem muitas formas de encontrar a geração anual de energia que pode ser produzida por um parque ou aerogerador em um determinado local. Métodos mais rústicos utilizam a multiplicação entre a potência nominal instalada no parque e as horas do ano, mas esse tipo de método desconsidera as variações do vento ou a média anual de velocidade de vento que ocorrem, encontrando assim valores que não condizem com a energia produtível. Outro método amplamente aplicado é utilizar a razão entre a velocidade média do vento e a curva de potência da turbina, encontrando assim um valor médio de energia gerada anualmente, mas que também não condiz com a realidade, podendo ser encontrados valores abaixo da real estimativa (MENDONÇA, 2009).

O método que retorna um valor mais preciso, é utilizando a distribuição de Weibull para as velocidades de vento, fazendo com que se conheça as características do local de instalação da turbina. Com a distribuição dos valores em relação ao total medido, é possível utilizar as frequências que essas velocidades são aferidas em relação ao número total de medidas feitas. Esses valores de frequência são multiplicados pela potência do aerogerador naquela velocidade de vento, e então se obtém a energia produzida para aquela distribuição de velocidades (MENDONÇA, 2009).

O valor esperado de energia produzida pode ser representado pela Equação 14 (Filho et. al, 2010).

$$E_a = \sum_{v_0}^{v_{m\acute{a}x}} f(v) * P_e(v) \quad (13)$$

Onde:

- $E_a$  representa a energia total produzida pela turbina, em kW;
- $f(v)$  a frequência de ocorrência da velocidade do vento;
- $P_e(v)$  a potência da turbina naquela velocidade específica;
- $v_{m\acute{a}x}$  a velocidade máxima de operação da turbina (*cut-out*);
- $v_0$  a velocidade mínima para a turbina produzir energia (*cut-in*).

## 2.6. Plataformas e Softwares de Dados Geoespaciais

A disseminação de dados geoespaciais é uma atividade recorrente na divulgação de informações que fomentam estudos, planejamentos de entidades privadas e públicas e gerenciamento territorial. Para viabilização do manejo destes dados, é necessário a

utilização de softwares que manipulem e apresentem resultados neste formato de arquivo (ALVARENGA, 2022).

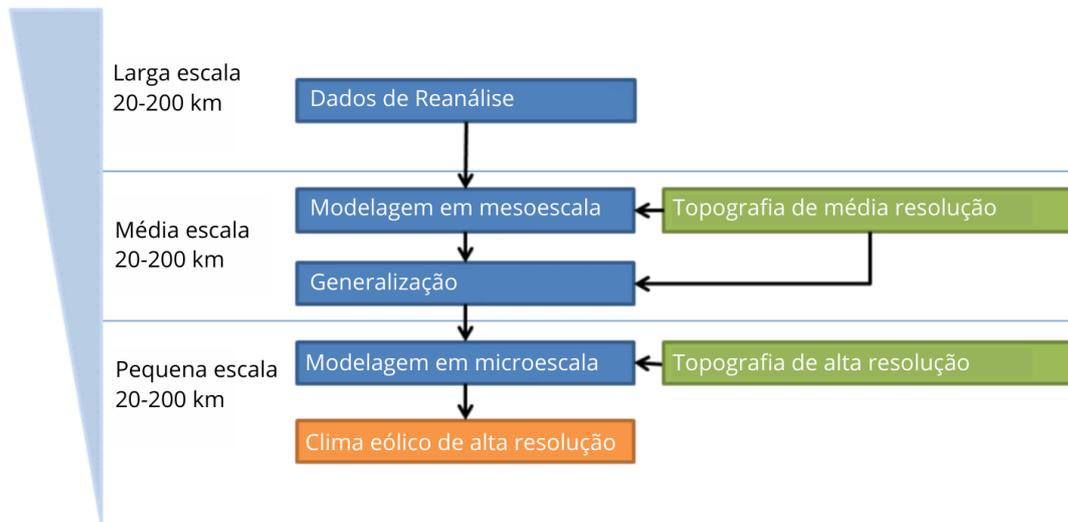
### **2.6.1. Global Wind Atlas**

Para colaborar com a mudança de fontes de energia poluentes para fontes renováveis como a eólica, são necessárias informações que ajudem a basear estudos que tenham finalidade de embasar projetos e análises de viabilidade. Para isso, são necessários banco de dados que possam demonstrar essas informações, e no caso de energia eólica especificamente, a disponibilização de mapas que apresentem os recursos eólicos. Na maior parte dos casos, esses mapas estão disponíveis para regiões específicas ou sendo desenvolvidos nacionalmente por país, tendo metodologias diferentes de elaboração que dificultam análises entre territórios (DAVIS *et al.*, 2023).

O Global Wind Atlas (GWA) visa trazer uma metodologia em comum para todos os usuários, abrangendo aqueles que utilizem para acesso rápido aos dados na plataforma web e alcançando quem necessita dos arquivos para download com as informações disponíveis. Tendo a primeira versão lançada em 2015, o GWA vem evoluindo nos últimos anos devido ao avanço tecnológico para processamento de dados e a disponibilização de dados topográficos e conjunto de dados de reanálise de alta resolução (DAVIS *et al.*, 2023).

O processo utilizado no GWA para disponibilizar os dados climáticos é chamado de *downscaling*, que começa com valores em larga escala e termina em microescala, onde os valores de velocidade de vento iniciais são dados de reanálise atmosférica do conjunto de dados do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF), o ERA5. Utilizando dados com grades de espaçamento maiores, são forçados dados no modelo mesoescalar WRF com menor espaçamento de grades, e feitas generalizações no processo, gerando um conjunto de dados generalizados com a mesma escala de grade dos dados iniciais. Aplicando esses dados no sistema de modelagem de microescala do GWA (*DTU Wind Energy*), que engloba todo o planeta, menos os polos e áreas oceânicas muito distante de terra firme, obtém-se conjuntos de dados numa grade de 250 metros, nas alturas de 10, 50, 100, 200 e 250 metros (GLOBAL WIND ATLAS, 2024). A Figura 11 demonstra esse processo.

Figura 11: Método para obtenção de dados de alta resolução por *downscaling*.



Fonte: Adaptado de Global Wind Atlas, 2024.

### 2.6.2. Software QGIS

Inúmeros projetos de desenvolvimento científico geoespacial existiam desde o começo dos softwares livres para uso, mas em 2006 quando líderes de um projeto chamado FOSS4G (*Free and Open-Source Software for Geospatial Applications*) criou uma fundação sem fins lucrativos chamada OSGeo (*Open Source Geospatial Foundation*), com o intuito de promover o desenvolvimento de tecnologias para estudos geoespaciais de forma unificada (ROSAS-CHAVOYA *et. al.*, 2022).

Nesta perspectiva, em 2002 surgiu o software QGIS, e após muitas colaborações de diversos usuários para melhoria do software, se tornou muito popular para análises geoespaciais e análises espaciais complexas, reconhecida como uma poderosa ferramenta GIS (*Geographic Information System*). Desenvolvido para análises com coordenadas geoespaciais, o QGIS hoje é utilizado em diversas áreas de estudo, desde áreas relacionadas a ciências da natureza até ciências sociais (ROSAS-CHAVOYA *et. al.*, 2022).

### 2.6.3. Software Global Mapper

Se tratando de análises de dados georreferenciados, softwares que utilizam sistema de informação geográfica consolidado, amplamente conhecido como GIS (*Geographic Information System*), facilitam a visualização, tratamento, armazenamento e conversão de informações espaciais geograficamente referenciadas que trazem com si

algum atributo do ponto de referência. No quesito de delimitar as informações referenciadas a uma área de estudo específico e utilizar os dados georreferenciados, o Global Mapper se torna uma ferramenta útil (CHIKWUE *et. al.*, 2021).

O Software Global Mapper é dedicado para suprir análises de qualquer tipo de estudo que envolva sistema de informações georreferenciadas, contendo ferramentas para suporte de dados, exportação e importação de diferentes formatos de arquivos, com até mesmo suporte para trabalhos utilizados no âmbito do CAD. Com a capacidade de trabalhar facilmente com dados retirados de serviços de mapa da web, conhecidos como WMS (*Web Map Services*), pode trabalhar com informações 2D e 3D de elevações, localização, linhas de contorno e outros tipos de conteúdo geoespaciais (TOPÓN; CHICAIZA, 2023).

## **2.7. Linguagem Python para análise de dados**

Para que seja válida qualquer resultado encontrado em diferentes estudos, independentemente de qual assunto seja, é necessário que seja feita uma análise de forma que demonstre todos os resultados atingidos de maneira expressiva e compreensiva para quem for usufruir destes resultados. A qualidade da maneira dos dados a serem apresentados depende diretamente da qualidade da ferramenta a ser utilizada, maximizando o resultado de qualquer projeto (Naranjo *et al.*, 2021).

Neste contexto, a linguagem python se torna uma ferramenta poderosa para ajudar a representar dados estatísticos, visto a sua gama de bibliotecas disponível contendo várias formas de visualização de dados. Esta linguagem de programação se tornou uma das mais utilizadas para análise e visualização de dados, ainda mais com adições de bibliotecas novas em atualizações, deixando-o ainda mais rico em questão de conteúdo utilizável (Lavanya *et. al.*, 2023).

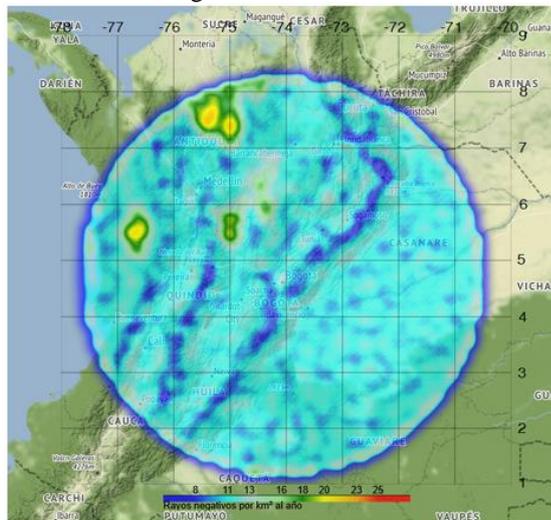
### **2.7.1. Mapas de Calor no Python**

No python é possível construir mapas de calor utilizando as bibliotecas disponíveis, dados de níveis de intensidade e coordenadas geográficas. Para ser possível utilizar os dados e fazer a visualização em mapas, bibliotecas como a folium e seus módulos, pandas, e as bibliotecas para leitura de arquivos CSV são necessárias desde o processamento dos dados até a criação do mapa (Deshmukh, 2024).

De acordo com Paula (2023), as bibliotecas do python podem atender as necessidades de confecção de mapas de calor de maneira simplificada devido à disponibilização de informações sobre suas bibliotecas gráficas e estrutura de dados moderna. Existem diversas bibliotecas que podem satisfazer a necessidade de criação de mapas, mas podemos destacar nessa finalidade a biblioteca Folium, que possibilita a visualização dos dados neste formato e a sobreposição de imagens e *GeoJSON*, permitindo a sobreposição de camadas.

Quando há um volume muito grande de dados organizando em várias linhas ou colunas que carregam informações, a abordagem de visualização por gráficos pode facilitar a compreensão do conteúdo em relação aos outros métodos de amostragem de resultados, pois utilizando a intensidade de cores para representar os valores dos dados e distribuição dos mesmos retorna visualmente noção de distribuição e frequência das informações (BALAGUERA, 2024). Podemos evidenciar este fato na Figura 12, onde o autor utiliza o Python para demonstrar a densidade de descarga elétricas em regiões da Colômbia.

Figura 12: Mapa de calor de densidade de descargas elétricas.



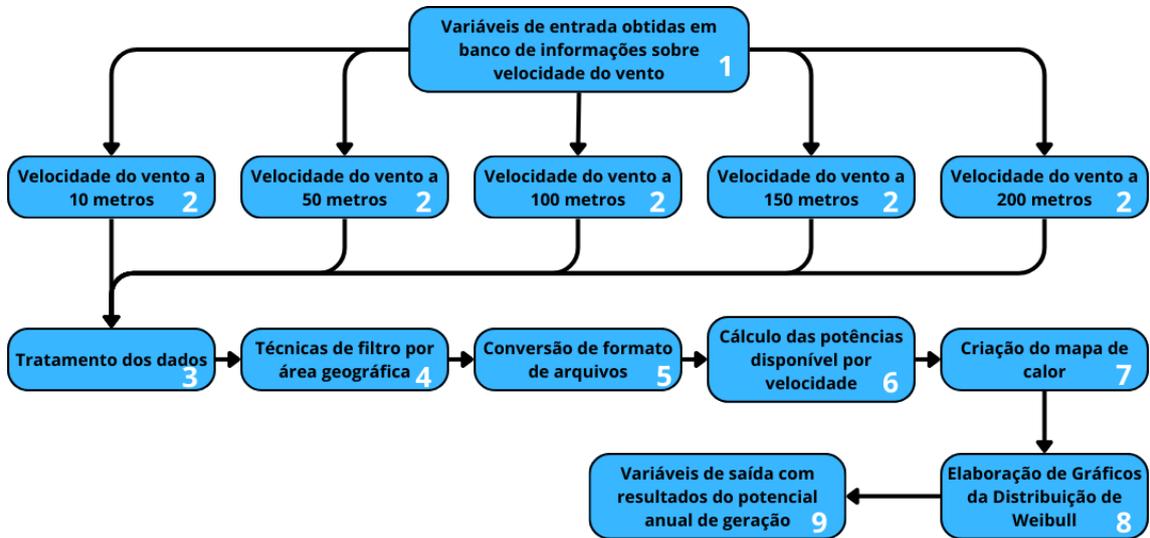
Fonte: Balaguera, 2024.

### 3. METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentadas as etapas que foram seguidas para se obter o resultado do presente trabalho. Para elucidar o trajeto da metodologia, foi elaborado um fluxograma que representa os tópicos que virão a seguir. Como é um método de trabalho progressivo, o fluxograma tem comportamento linear, como pode ser visto na Figura 13,

apresentando etapas paralelas apenas na obtenção de dados do vento, que foi feita para cada altura disponível.

Figura 13: Fluxograma da metodologia do trabalho.

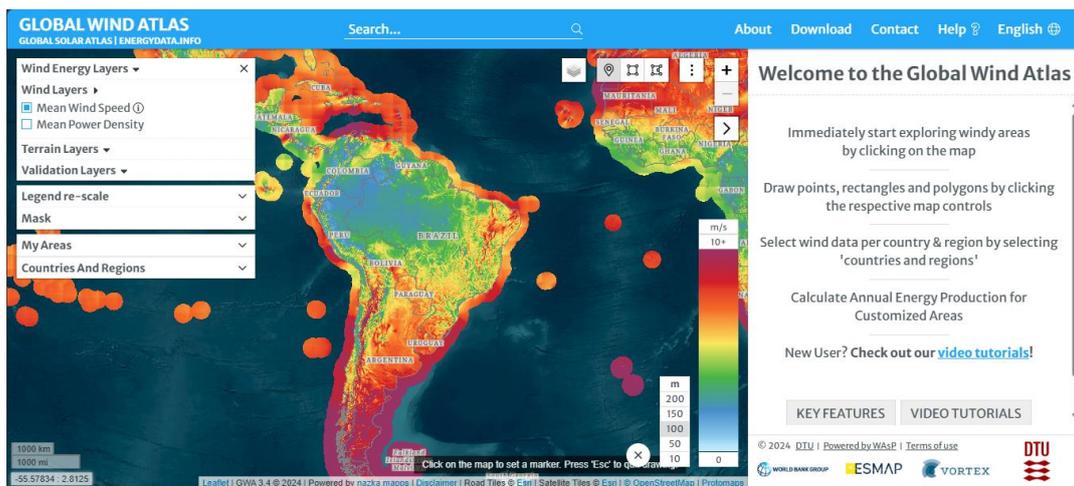


Fonte:Autor,2024.

### 3.1. Obtenção dos dados para análise

Para o desenvolvimento do trabalho em questão, inicialmente foram encontradas formas de se obter os dados de médias históricas anuais de velocidade de vento no Rio Grande do Sul, que podem-se ser baixados e tratados. Estes dados foram encontrados na plataforma *online* Global Wind Atlas, como mostrado na Figura 14.

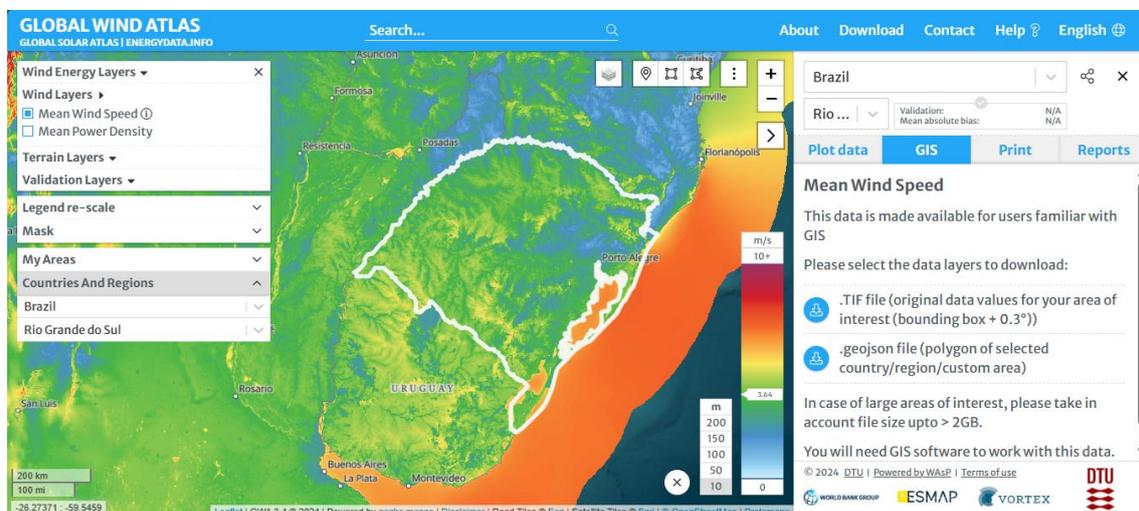
Figura 14: Interface da plataforma Global Wind Atlas.



Fonte: Global Wind Atlas, 2024.

Nesta plataforma, é possível selecionar pontos ou áreas para manipular apenas os dados por área desejada. Há a possibilidade de *download* dos dados gratuitamente, em diferentes formatos de arquivos, que vão da escolha do usuário em qual formato deseja baixá-los, como mostrado na Figura 15. Para utilizar dados de velocidade do vento com as informações de latitude e longitude, é necessário selecionar a área de interesse, no caso o estado do RS, e baixar seus dados em um arquivo no formato TIF, que é utilizado em arquivos gráficos e de imagem com *raster*, que são imagens compostas por uma matriz de pixels organizadas em linhas e colunas, onde cada pixel apresenta um valor relacionado a cor para representação gráfica.

Figura 15:Download do arquivo no formato .TIF para a área selecionada.

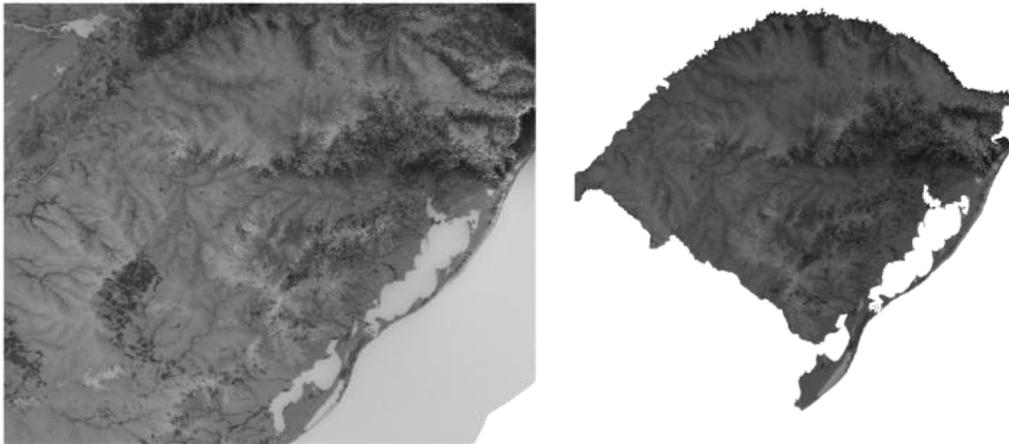


Fonte: Global Wind Atlas, 2024.

Após o download destes dados, é necessário fazer uma filtragem deles para selecionar apenas os pontos que ficam dentro do estado, pois no arquivo com os dados também são baixados alguns pontos fora da área de interesse, que aumenta o volume de dados e por conseguinte prejudicam a análise. Para isso, é necessário utilizar um programa que possa ler o arquivo de formato TIF e aplicar filtros, e o utilizado foi o QGIS, software focado em dados georreferenciados. Este software foi apenas utilizado para uma exclusão de dados desnecessários, então não será muito adentrado suas funcionalidades.

Através do software, foi feita a exclusão de outros pontos geográficos adjacentes, e extraído um arquivo apenas com os dados dentro do Rio Grande do Sul, como mostrado na Figura 16.

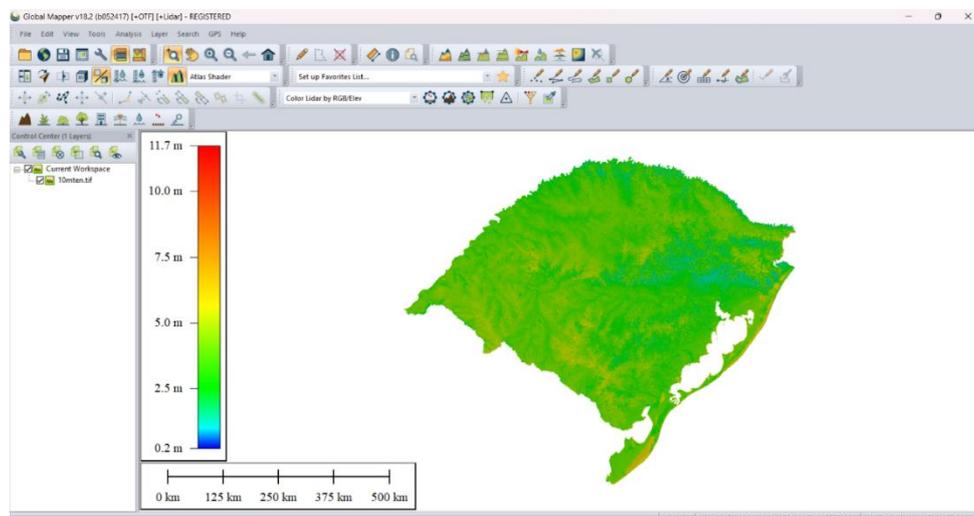
Figura 16: Mapa antes e depois de exclusão de dados adjacentes.



Fonte: Adaptado pelo autor de QGIS,2024.

Com o arquivo TIF apenas com os dados necessários, foi utilizado o software Global Mapper para conversão destes em um formato que pudesse ser lido pelo software python, para o tratamento de dados e cálculos de potência a serem feitos. Dentro do software, podemos carregar o arquivo filtrado referente ao Rio Grande do Sul, e ele aparecerá como na Figura 17. A escala de intensidade de cor presente na figura é gerada de acordo com os dados de informação de cada coordenada, no caso a velocidade do vento. A unidade metros representada se deve ao fato que, por configuração básica, retrata os arquivos inseridos no software como arquivos de relevo, mas isso não interfere na utilização do mesmo para conversão do arquivo TIF e não descaracteriza os mesmos.

Figura 17: Mapa no software Global Mapper.



Fonte: Adaptado pelo auto de Global Mapper,2024.

A partir do carregamento de dados, o software possibilita a exportação dos dados para o formato do “*elevation grid format*”, que são dados de elevação de terreno em formato matricial, e dentro desse tipo de formato, temos o formato XYZ, que exporta as informações do mapa em três eixos, o eixo x (longitude), y (latitude), e z (informação do ponto, nesse caso, a velocidade do vento). Utilizando essa ferramenta, obtemos esse arquivo em formato XYZ. Esse processo foi repetido para arquivos baixado nas alturas de 10, 50, 100, 150 e 200 metros de altura.

### **3.2. Análise de dados via Python**

Para ser feita a análise com python, é necessário utiliza algum ambiente de programação onde possam ser inseridas e compiladas as linhas de código. Existem muitos ambientes de programação, tano na própria máquina quanto online, mas neste trabalha o optou-se por utilizar o *VSCode (Visual Studio Code)*, ambiente de programação desenvolvido pela *Microsoft* para ser interativo com o *Windows*, o que facilita a compilação e acesso a arquivos salvos no computador quando esses tiverem que ser abertos no VSCode. Durante os próximos itens, serão discorridos passo a passo como foi feita a programação para obtenção do mapa de calor e dados de potência, e explicada todas as linhas de programação. As etapas mostradas abaixo foram feitas para as os dados de velocidade de vento a 10 metros de altura, mas todo o processo também foi feito para as outras alturas de estudo.

#### **3.2.1. Preparação do ambiente de programação**

Antes de começar a tratar os dados, é necessário adicionar ao *VSCode* as bibliotecas que serão utilizadas durante o processo de elaboração do mapa de calor, leitura de arquivos, confecção de gráficos, dentre outras utilidades. A escolha das bibliotecas se baseou na disponibilização de informações sobre elas no próprio site do python, e fóruns que estão presentes nele com diferentes discussões que envolvem as mesmas bibliotecas aqui utilizadas. A seguir estão relacionadas essas bibliotecas.

- `import csv` : Biblioteca utilizada para leitura e tratamento de arquivos CSV;
- `import json` : Biblioteca para utilização de arquivos JSON;
- `import pandas as pd` : Biblioteca para tratamento de dados, em especial dados em formato tabular;

- `import geopandas as gpd` : Extensão da biblioteca pandas, utilizada pra dados geoespaciais;
- `import Folium` : Biblioteca utilizada para criação de mapas;
- `import branca.colormap` : Parte da biblioteca branca utilizada para criar a escala de cores;
- `import matplotlib.pyplot as plt` : Biblioteca que possibilita a criação e visualização de gráficos;
- `import numpy as np` : Biblioteca utilizada para computação gráfica;
- `from folium.plugins import HeatMap, MarkerCluster, MousePosition` : Módulos da biblioteca Folium, utilizados para mapa de calor, marcação de pontos no mapa e posição de cliques no mapa;
- `from IPython.display import display, HTML` : Usado para exibir elementos em HTML diretamente no ambiente do VSCode;
- `from shapely.geometry import Point` : Módulo da biblioteca shapely para manipulação das informações geométricas;
- `from folium import branca, IFrame` : Módulo da biblioteca Folium para personalização do mapa;
- `from scipy.stats import weibull_min` : Módulo da biblioteca SciPy para confecção do gráfico estatístico.

Como quesito de preparação, também foi carregado no início o shapefile do Rio Grande do Sul disponibilizado pelo IBGE, que se trata do arquivo em formato JSON que tem as delimitações do estado e também as divisões municipais (IBGE,2023). A linha de programação que deve ser inserida no *VSCode* que faz esse carregamento segue abaixo.

- `geojson_arquivo = "geojson_mun_RS.json"`

### **3.2.2. Conversão do Arquivo XYZ para CSV**

Retomando a etapa 5 de conversão de formato de arquivos, faz-se a conversão para um arquivo CSV. A leitura de arquivos no python é facilitada quando o arquivo tem formato de tabela e separação de linhas, que é o caso de um arquivo CSV, então foi feita a conversão do arquivo XYZ para um arquivo CSV, para possibilitar a procura por colunas mais específicas em etapa seguinte. O código pode ser visto na Figura 18.

Figura 18: Conversão do arquivo XYZ para CSV.

```
# Caminhos dos arquivos
arquivo_xyz = 'rs10m.xyz'
arquivo_csv = 'rs10m.csv'

# Abrir o arquivo .xyz e ler as linhas
with open(arquivo_xyz, 'r') as xyz_file:
    linhas = xyz_file.readlines()

# Escrever as linhas no formato CSV
with open(arquivo_csv, 'w', newline='') as csv_file:
    escritor_csv = csv.writer(csv_file)

    # Iterar sobre as linhas do arquivo .xyz
    for linha in linhas:
        # Dividir a linha em colunas (x, y, z)
        colunas = linha.strip().split(',')
        # Escrever as colunas no CSV
        escritor_csv.writerow(colunas)

print(f'Arquivo convertido para {arquivo_csv}')
```

Fonte: Autor,2024.

Nesta figura, é demonstrada a etapa de carregamento do arquivo em formato XYZ, e criado um arquivo CSV, a seguir o código faz a leitura de todas as linhas do arquivo XYZ, e reescreve cada uma delas no arquivo CSV, separando as linhas e colunas a cada linha lida. Quando o código termina a conversão, apresenta a mensagem “Arquivo convertido para rs10m.csv”.

O arquivo em formato XYZ tem as coordenadas invertidas do sistema usual, tendo os valores de longitude antes dos valores de latitude, o que poderia vir a ser um contratempo para sobrepor esses dados sobre o *shapefile* do RS. Para contornar isso, foi feita a troca da primeira pela segunda coluna do arquivo CSV, como mostrado na Figura 19.

Figura 19:Troca de colunas no arquivo CSV.

```
# Ler o arquivo CSV
df = pd.read_csv('rs10m.csv')

# Trocar a coluna 1 com a coluna 2 (indexação começa em 0)
colunas = list(df.columns)
df = df[[colunas[1], colunas[0]] + colunas[2:]]

df.columns = ['y', 'x', 'z']

# Opcional: Salvar o novo CSV
df.to_csv('rs10mnew.csv', index=False)

# Exibir o DataFrame em formato tabular
df
```

Fonte:Autor,2024.

O respectivo código lê o arquivo em formato *dataframe*, lista as colunas e faz a troca. As colunas são numeradas a partir da coluna 0, então o código traz a segunda coluna (colunas [1]) para a primeira posição, coloca a primeira coluna (colunas [0]) para a segunda posição, e as colunas restantes a partir da terceira posição seguem normal. Ele então lista essas colunas como 'y', 'x' e 'z' para reconhecer a mudança de colunas. Um novo CSV é salvo com as colunas alteradas, e o dataframe em formato tabular é exibido.

### 3.2.3. Cálculo de potências da Turbinas

Para ser feito o cálculo das potências das turbinas, é necessário implementar no código os valores de coeficiente de performance para uma turbina de três pás, a densidade do ar para cada altura e a área varrida pela turbina. Inicialmente, para cada altura se tem uma densidade do ar, mostrada na Tabela 4.

Tabela 3: Valores de densidade de ar para cada altura.

Altura (m)	Pressão (Pa)	Densidade do ar (kg/m <sup>3</sup> )
10	101204.9	1.2236
50	100725.9	1.2178
100	100130.4	1.2106
150	99538.4	1.2034
200	98949.9	1.1963

Fonte: Autor,2024.

Com base na relação entre as alturas de velocidade do vento, os diâmetros das pás e área do rotor, foram escolhidas duas turbinas, uma para as alturas de 10 e 50 metros e outra de maior potência para as alturas seguintes, pois em alturas abaixo de 100 metros a turbina de maior potência teria um diâmetro do rotor muito perto do solo, mesmo que o uso destas duas turbinas tenha objetivo de demonstrar a funcionalidade do projeto.

Tabela 4: Modelos de Turbinas escolhidos.

Modelo de Turbina	ACSA A17/90	Siemens Gamesa SG 3.4-145
Potência(kW)	90,0	3465,0
Cut-in wind speed (m/s)	3,3	3,0
Cut-out wind speed (m/s)	28,0	20,0
Velocidade nominal(m/s)	16,8	10,0
Área varrida(m <sup>2</sup> )	227,0	16513,0

Fonte: Wind Turbine Models, 2024. Adaptado pelo autor.

Com estes dados, é possível fazer os cálculos de potência no python. Os passos são mostrados nas Figuras 20 e 21.

Figura 20: Cálculos de potência da turbina.

```

# Parâmetros fixos da equação
C_p = 0.5 # Coeficiente de performance típico (ajuste conforme necessário)
rho = 1.2236 # Densidade do ar em kg/m³ (ao nível do mar, ajuste conforme a altitude)
S = 227 # Área varrida (em m²) - ajuste para o diâmetro da turbina

# Carregar o CSV
df = pd.read_csv('rs10mnew.csv') # Substitua pelo caminho do seu arquivo

# Alterar o título da coluna de velocidade de vento para "Velocidade do vento(m/s)"
df.rename(columns={'z': 'Velocidade do vento(m/s)'}, inplace=True)

# Lista para armazenar os resultados
potencias = []

# Loop para calcular a potência usando os valores do CSV
for index, row in df.iterrows():
    v = row['z'] # Coluna de velocidade do vento (em m/s)

    # Calcular a potência usando a fórmula
    P_turbine = 0.5 * C_p * rho * S * (v ** 3)

    # Adicionar o resultado à lista
    potencias.append(P_turbine)

# Exibir o resultado para cada linha
#print(f"Linha {index + 1}: Velocidade do vento = {v} m/s, Potência = {P_turbine:.2f} W")

```

Fonte: Autor, 2024.

Nesta etapa, são inseridos os parâmetros para o cálculo da potência disponível para a turbina. Então, o arquivo em formato CSV com os valores de velocidade do vento é carregado e é criada uma lista que armazena cada dado de potência calculado para cada velocidade. Após esse procedimento, é criado um *loop*, ou seja, uma função que se repete várias vezes para cada linha que ela lê no arquivo, para ler o valor da terceira coluna e nomeá-lo como “v”, que é o valor de velocidade do vento inserido na equação. A potência então é calculada, e esse processo se repete para todas as linhas do CSV. A opção de exibir o resultado para cada linha está desativada pois o CSV tem mais de 4 milhões de linhas, diante desse volume que pode comprometer o processamento.

Figura 21: Valores de potência calculados

```

# Adicionar os resultados ao DataFrame
df['Potência na turbina (W)'] = potencias

# Limitar os valores da coluna 'Potência (W)' a duas casas decimais
df['Potência na turbina (W)'] = df['Potência na turbina (W)'].round(2)

# Salvar os resultados em um novo CSV
df.to_csv('resultados_potencia_10.csv', index=False)

print("Cálculos finalizados e salvos em 'resultados_potencia_10.csv'!")

df

```

	y	x	z	Potência na turbina(W)
0	-30.180481	-57.614677	4.827	7809.75
1	-30.182981	-57.614677	3.510	3002.80
2	-30.185481	-57.614677	3.490	2951.76
3	-30.187981	-57.614677	4.063	4657.42
4	-30.177981	-57.612177	4.788	7621.98
...	...	...	...	...
4224883	-28.625481	-49.697177	7.178	25681.22
4224884	-28.617981	-49.694677	4.782	7593.36

Fonte: Autor, 2024.

Os valores de potência armazenados então são adicionados a um *dataframe*, que é uma função que organiza os dados em formato tabular, para serem salvos em um arquivo de formato CSV, e as casas decimais após a virgula dos dados são limitadas em duas. Esse novo arquivo contém os dados de latitude e longitude, de velocidade do vento e potência disponível para a turbina.

### 3.2.4. Criação do Mapa de Calor

Como mostrado na etapa 7 do fluxograma da metodologia, é iniciado o processo de criação do mapa de calor. Com os dados de potência calculados, a próxima etapa é desenvolver o mapa de calor baseado nos dados de vento utilizados. A figura 22 mostra o início da etapa do código de criação do Mapa.

Figura 22:Primeira etapa do código para criação do mapa de calor.

```
# Carregar o arquivo GeoJSON dos municípios do RS
municipios_geojson = 'geojson_mun_RS.json' # Substitua pelo caminho correto
gdf_municipios = gpd.read_file(municipios_geojson)

# Carregar o CSV com os dados de velocidade de vento e potência (supondo que já tenha calculado as potências)
df = pd.read_csv('resultados_potencia_10.csv') # Substitua pelo caminho do seu arquivo

# Adicionar uma geometria a cada linha
gdf_pontos = gpd.GeoDataFrame(df, geometry=gpd.points_from_xy(df['x'], df['y']), crs=gdf_municipios.crs)

# Realizar o "spatial join" para associar os pontos aos municípios
gdf_pontos = gpd.sjoin(gdf_pontos, gdf_municipios, how='left', predicate='within')

# Calcular as médias de 'z' (velocidade do vento) e 'Potência na turbina(W)' por município
municipios_medias = gdf_pontos.groupby('name')[['z', 'Potência na turbina(W)']].mean().reset_index()

# Calcular o mínimo e máximo da coluna de velocidade de vento para ajustar o colormap
min_velocidade = df['z'].min()
max_velocidade = df['z'].max()
```

Fonte: Autor,2024.

Inicialmente, é carregado novamente o arquivo com o shapefile do Rio Grande do Sul conforme dito na seção 3.2.1 e atribuído uma variável que corresponde a leitura desse arquivo, assim como é feito com o arquivo CSV que contém as velocidades do vento e potência calculados. Então é adicionado uma geometria do tipo ponto a cada linha que existe, que realiza a leitura de latitude e longitude, e coloca as respectivas coordenadas dos arquivos com o arquivo de formato shapefile dos municípios no RS. Então, é realizado um “*spatial Join*”, que é uma função utilizada para associar pontos sobrepostos uns aos outros, dentro de uma geometria ou próximos a outros pontos, no caso desse trabalho é utilizado para associar todos os pontos criados à geometria de um município que está descrito dentro do arquivo shapefile, fazendo uma leitura de qual coordenada está dentro de qual município, e carregando essa informação para aquele dado.

Com os dados de localização separado por município, temos também a velocidade de vento separada, onde cada município vai ter vários dados de velocidade de vento, e conseqüentemente, de potência disponível para a turbina. Então a seguir pode ser calculada a média por município desses dois valores, que corresponde ao valor que será exibido no em um marcador clicável, que carregará essas informações, que é chamado usualmente de *tooltip*, e que aparecerá no mapa. Para ajustar também a escala de cores, é feita uma leitura de valor máximo e mínimo de velocidade de vento no arquivo, ajustando assim o intervalo. Com os dados já em formato de geometria, pode ser criado o mapa com a biblioteca Folium, e colocar qual a primeira localização e o zoom inicial que ele vai mostrar quando abrir o mapa. Essa etapa é mostrada na Figura 23.

Figura 23:Segunda parte do código para criação do mapa de calor

```
# Criação do mapa
mapa = folium.Map(location=[df['y'].mean(), df['x'].mean()], zoom_start=6)

# Adicionar o GeoJSON dos municípios ao mapa com o tooltip de média de vento
folium.GeoJson(
    gdf_municipios,
    name='Municípios',
    tooltip=folium.GeoJsonTooltip(
        fields=['name'], # Nome do município
        aliases=['Município:'],
        localize=True,
        labels=True
    ),
    popup=folium.GeoJsonPopup(
        fields=['name'], # Nome do município
        aliases=['Município:'],
        localize=True
    )
).add_to(mapa)

# Adicionar os dados de velocidade de vento no mapa de calor
ven = list(zip(df['y'], df['x'], df['z']))
fg_ven = folium.FeatureGroup(name="z")
ven_map = HeatMap(ven, min_opacity=0.2, max_val=max_velocidade, radius=15)
ven_map.add_to(fg_ven)
fg_ven.add_to(mapa)
```

Fonte: Autor, 2024.

Adicionado o formato municipal ao mapa, e utilizando o sistema de coordenadas atual, são adicionadas também linhas que delimitam os municípios, e colocadas no mapa. A barra de intensidade é do tipo linear, e varia de acordo com a velocidade máxima e mínima medida nos dados de velocidade do vento.

Figura 24: Terceira parte do código para criação do mapa de calor

```
# Adicionar o GeoJSON ao mapa
with open('geojson_mun_RS.json', encoding='utf-8') as f:
    geojson_data = json.load(f)
    estilo = lambda x: {'color': "black", "fillOpacity": 0, "weight": 1}
    folium.GeoJson(geojson_data, style_function=estilo).add_to(mapa)

# Adicionar a barra de intensidade ajustada ao colormap para refletir as velocidades reais
colormap = branca.colormap.LinearColormap(["blue", "green", "yellow", "red"], vmin=min_velocidade, vmax=max_velocidade, caption="Intensidade")
colormap.add_to(mapa)
```

Fonte: Autor, 2024.

Após o *loop*, é feita a adição dos dados de velocidade do vento ao mapa de calor, colocando o nome da coluna específica a velocidade do vento em um *FeatureGroup*, que é um conjunto lógico de dados com características ou atributos, e é utilizado na Folium para gerenciar os dados de intensidade do mapa de calor, a coluna “z”. Com estes dados organizado, é criado então o mapa de calor, com a lista de latitude, longitude e velocidade do vento, definido a opacidade das cores no mapa, o valor máximo de velocidade da escala, e o raio da circunferência de cada dado, pois cada dado cria uma circunferência ao redor da sua localização pontual, e dependendo da velocidade essa circunferência tem uma cor específica, e quando todos os dados são colocados um ao lado do outro, gera a transição de cor no mapa. O mapa de calor e o grupo com as velocidades do vento são, então, adicionados ao mapa criado.

Figura 25: Quarta parte do código para criação do mapa de calor.

```
# Agora, vamos adicionar a média de velocidade de vento e potência por município no tooltip
for idx, row in municipios_medias.iterrows():
    municipio = row['nome'] # Nome do município
    media_vento = row['z'] # Média de velocidade de vento
    media_potencia = row['Potência na turbina(W)'] # Média de potência da turbina

# Buscar a geometria do município
municipio_geom = gdf_municipios[gdf_municipios['nome'] == municipio].geometry.iloc[0]

# Criar o popup para mostrar as médias
municipio_popup = folium.Popup(f"Média de Velocidade de Vento: {media_vento:.2f} m/s e Média de Potência da Turbina: {media_potencia:.2f} W", parse_html=True)

# Adicionar marcador no mapa com o centroide do município
folium.Marker(
    location=[municipio_geom.centroid.y, municipio_geom.centroid.x], # Posição do centroide do município
    popup=municipio_popup,
    tooltip=f"{municipio}: {media_vento:.2f} m/s"
).add_to(mapa)

# Adicionar controle de camadas (para ativar/desativar o mapa de calor)
folium.LayerControl().add_to(mapa)

# Salvar o mapa como HTML
mapa.save("mapa_vento_potencia_final_10.html")
```

Fonte: Autor, 2024.

Para as velocidades de vento, é feito um loop que lê o nome dos municípios, e as médias de vento e potência, então ele busca a geometria por município, e cria um popup no município que, quando o usuário clicar no *popup*, ele exibirá a informação do nome do município, da média de velocidade do vento e a média de potência disponível. O

marcado é colocar no centroide do município, e então adicionado no mapa. Isso é feito para cada linha do arquivo, e quando terminado, adicionado tudo ao mapa. Também é adicionado um *layer control*, função que serve para separar em diferentes camadas as informações sobrepostas e selecionar quais camadas serão mostradas ao mesmo tempo, que possibilita ativar e desativar a layer do mapa de calor. Então, o mapa é salvo em formato HTML para melhor visualização.

### 3.2.5. Criação do gráfico da Distribuição de Weibull

A fim de mostrar com efetividade quais as velocidades do vento mais recorrentes e como elas vão se alterando conforme a altura, foi executada a análise desses dados com a distribuição de Weibull, onde são colocados os dados de velocidade do vento, para ser visto qual a frequência de ocorrência. O código se encontra na Figura 26.

Figura 26: Código para geração da Distribuição de Weibull

```
# Carregar os dados do CSV
arquivo_csv = "resultados_potencia_10.csv" # Substitua pelo caminho correto
df = pd.read_csv(arquivo_csv)

# Verificar a existência da coluna
coluna_velocidade = 'z' # Substitua pelo nome correto da coluna
if coluna_velocidade not in df.columns:
    raise ValueError(f"A coluna '{coluna_velocidade}' não foi encontrada no CSV.")

# Obter os dados de velocidade do vento
dados_velocidade = df[coluna_velocidade].dropna()

# Ajustar a distribuição de Weibull aos dados
shape, loc, scale = weibull_min.fit(dados_velocidade, floc=0)

# Gerar valores para o gráfico
x = np.linspace(dados_velocidade.min(), dados_velocidade.max(), 100)
weibull_pdf = weibull_min.pdf(x, shape, loc, scale)

# Plotar o histograma e a curva de densidade
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.hist(dados_velocidade, bins=20, density=True, alpha=0.6, color='g', label="Histograma")
plt.plot(x, weibull_pdf, 'r-', label=f"Weibull Fit\nShape={shape:.2f}, Scale={scale:.2f}")
plt.title("Distribuição de Weibull Ajustada às Velocidades do Vento")
plt.xlabel("Velocidade do Vento (m/s)")
plt.ylabel("Densidade de Probabilidade")
plt.legend(loc="upper right")
plt.grid(alpha=0.3)
plt.show()
```

Fonte: Autor,2024.

No código, é realizada a leitura do arquivo CSV que contém as velocidades do vento, e verificado se todos eles contêm um dado de velocidade do vento na coluna correta. Coloca-se os dados em um dataframe para ter apenas uma coluna, e é usada a biblioteca que contém a função de Weibull para ser ajustada a distribuição em torno destes dados. Cria-se os valores para o gráfico de distribuição normal, formato, localização e escala. Após concluída esta etapa, é plotado um histograma das velocidades, juntamente com a curva dos dados.

### 3.2.6. Cálculo da energia anual gerada

Para realizar o cálculo das potências geradas, foi efetuada a análise das frequências de ocorrência das velocidades utilizadas na distribuição de Weibull e das potências geradas naquela velocidade específica. O código utilizado para isso pode ser visto nas Figuras 27 e 28.

Figura 27:Primeira parte do código para cálculo de potência anual.

```
# Carregar os dados de velocidade de vento
arquivo = 'resultados_potencia_10.csv' # Substitua pelo nome do arquivo
coluna_velocidade = 'z' # Substitua pelo nome da coluna com os dados de velocidade
df_vento = pd.read_csv(arquivo)

# Obter os dados de velocidade de vento
velocidades = df_vento[coluna_velocidade]

# 1. Criar os bins de velocidade de 1 m/s
bins = np.arange(0, int(max(velocidades)) + 2, 1)
labels = bins[:-1]
freq, _ = np.histogram(velocidades, bins=bins)

# 2. Calcular a frequência relativa (em %)
frequencia_relativa = (freq / freq.sum()) * 100

# 3. Calcular a potência para cada bin (regra de 3 com 3465 kW a 10 m/s, zero para 1-2 m/s)
potencia = np.array([
    0 if v < 2 else min((v / 10) * 3465, 3465)
    for v in labels
])

# 4. Multiplicar potência pela frequência
potencia_ponderada = potencia * (frequencia_relativa / 100)
```

Fonte: Autor, 2024

Nesta primeira parte do código para cálculo de potência anual, o arquivo com as velocidades foi chamado, e identificado a coluna correspondente. Foi criado “bin” para cada velocidade de vento, que seria um valor que representa as velocidades, onde o bin 1 representa as velocidades de um metro por segundo por exemplo, e todas as velocidades foram separadas de 1 em 1 m/s, e depois calculado a frequência de ocorrência que cada velocidade tem na representação do todo. Utilizando uma aproximação, foi executado o cálculo de potências geradas em outras velocidades que não sejam a nominal, ou seja, com a informação de que em 10 m/s se encontra a potência nominal da turbina, é possível fazer cálculos de aproximação para a potência gerada a partir de outras velocidades de vento. Também foram excluídos valores abaixo da velocidade de início de operação da turbina (*cut-in*). Após realizado o cálculo das potências para respectiva velocidade, essa potência foi multiplicada pela porcentagem de ocorrência.

Figura 28: Segunda parte do código para cálculo de potência anual.

```
# 5. Criar o DataFrame final
df_resultado = pd.DataFrame({
    'Velocidade (m/s)': labels,
    'Frequência Relativa (%)': frequencia_relativa,
    'Potência (kW)': potencia,
    'f(v)*p(v)': potencia_ponderada
})

# Calcular o total da potência ponderada
potencia_ponderada_total = potencia_ponderada.sum()

# Exibir o DataFrame e o total
print(df_resultado.round(2))
print(f"\nTotal: {potencia_ponderada_total:.2f} kW")

df_resultado.to_csv('resultado_frequencia_potência_10.csv', index=False, encoding='utf-8', float_format='%.2f')
```

Fonte: Autor, 2024.

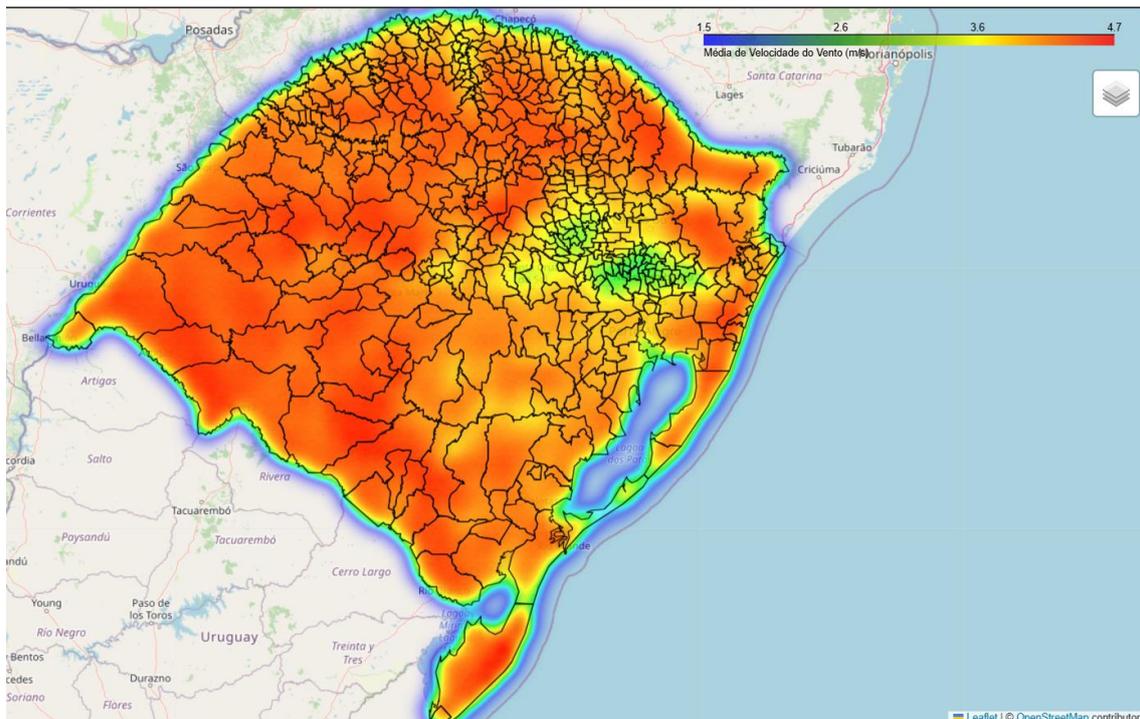
Na segunda parte do código, é criado um dataframe para nomear as colunas e apresentar os dados feitos na primeira etapa. Após isso, faz-se cálculo da potência total gerada, somando todos os valores de frequência de ocorrência multiplicados pela potência da turbina, e estes resultados são salvos em um CSV. Posteriormente, utilizando a equação 14, é calculada a energia anual gerada em cada altura, e organizada em planilha.

#### 4. Resultados

De cada código por altura, foi desenvolvido um mapa de calor em formato HTML, onde a escala de cores representa onde a velocidade é maior, e são apresentados os *tooltips* em cada município. Ao clicar nesses *tooltips*, é apresentado o valor de velocidade de vento para aquele município e a respectiva potência pontual calculada. Cada um desses marcadores corresponde a um município, a média de velocidade do vento dos valores localizados dentro de área geográfica e a potência disponível para a turbina de acordo com a área varrida nas pás dada aquela média de vento específica.

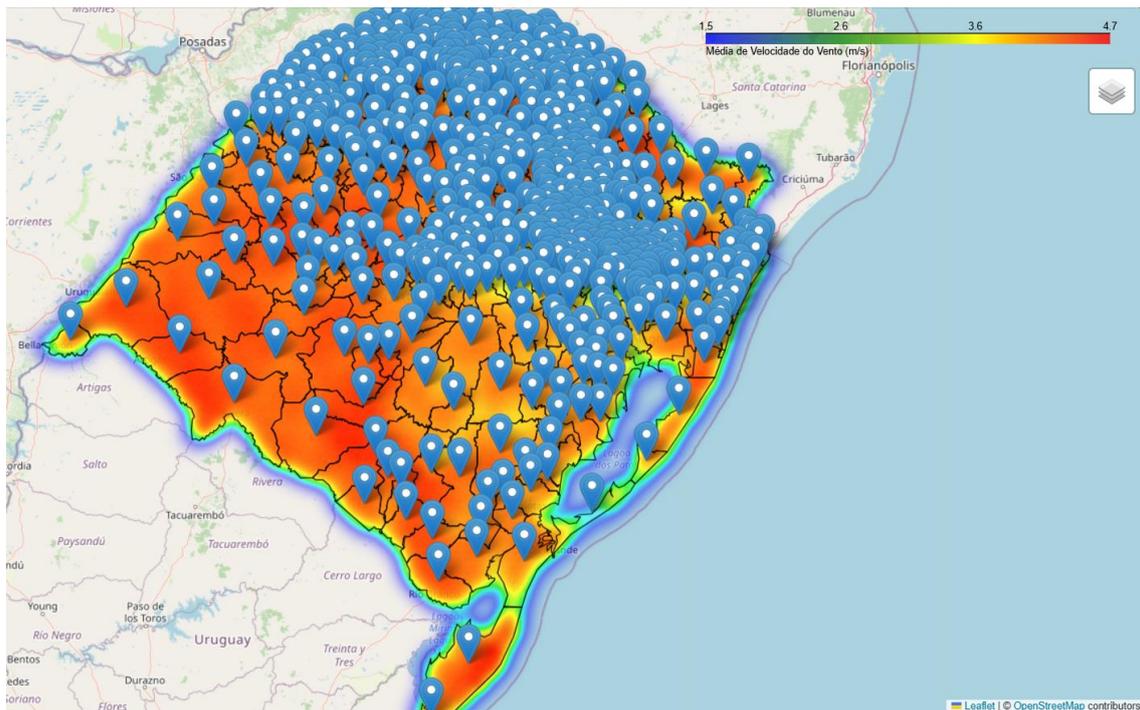
Vale ressaltar que, para primeiro estudo, não foram levadas em consideração áreas que não são em terra, foram utilizadas apenas áreas municipais correspondentes ao *shapefile*.

Figura 29: Mapa de calor para 10 metros de altura.



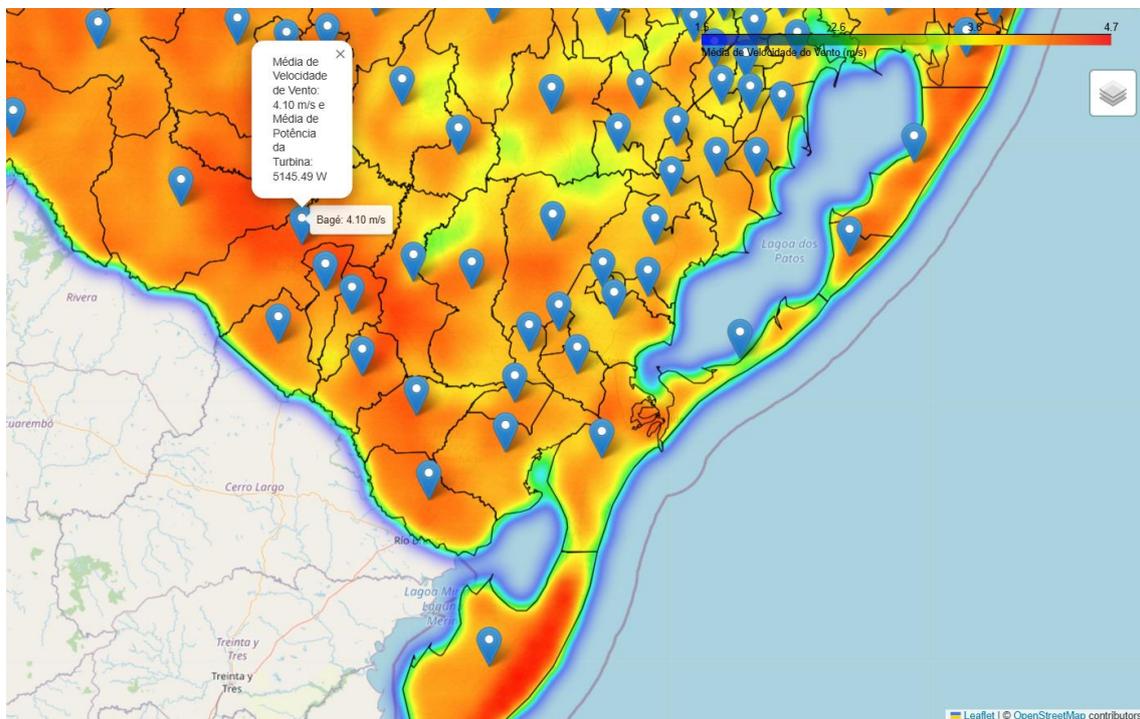
Fonte: Autor, 2024.

Figura 30: Mapa de calor para 10 metros de altura com os *tooltips*.



Fonte: Autor, 2024.

Figura 31: Informações mostradas ao clicar no *tooltip*.

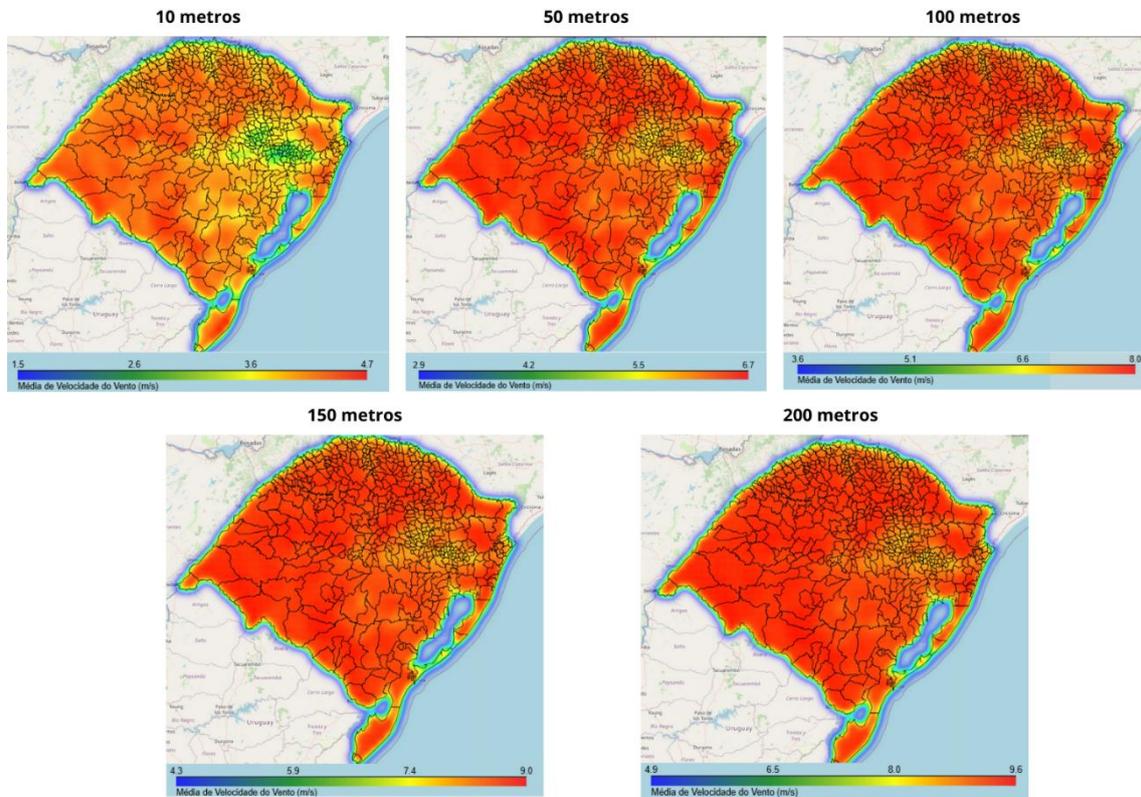


Fonte: Autor, 2024.

Quando colocados os gráficos de cada altura lado a lado, é perceptível a mudança nos mapas de 10 para 50 metros, e de 50 para 100 metros, mas quanto maior a altura,

mais difícil fica identificar as diferenças, pois a variação da velocidade começa a diminuir devido a diminuição da variação da rugosidade, como pode ser visto na Figura 32.

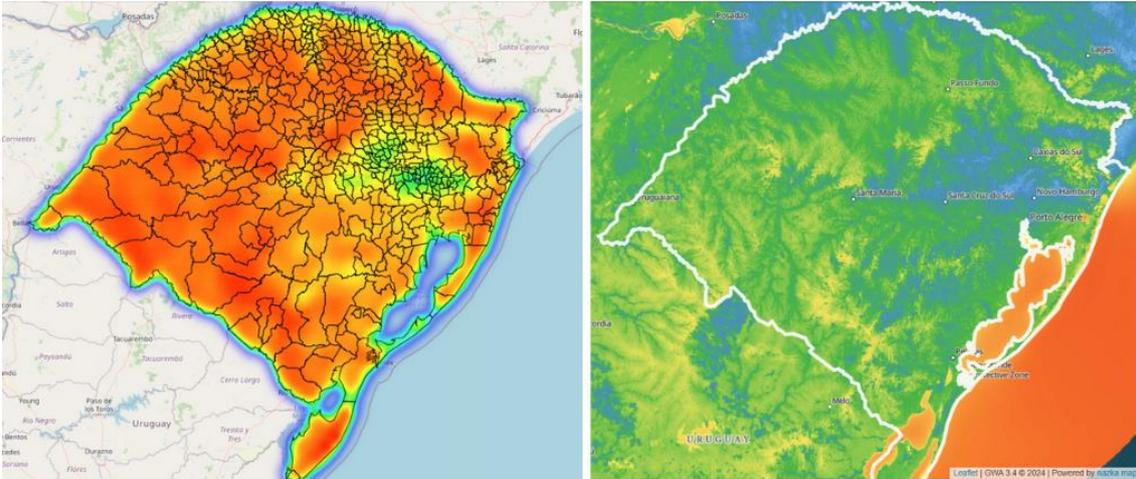
Figura 32: Mapas para as diferentes alturas estudadas e a intensidade dos valores de velocidade do vento.



Fonte: Autor, 2024.

Comparando o mapa de calor confeccionado com a variação de intensidade do mapa de velocidades do vento do Global Wind Atlas na Figura 33, é possível notar semelhanças entre as intensidades por área geográfica, mas o mapa confeccionado no python apresenta irregularidades que diferem muito do GWA, e é notável como a qualidade de escala é muito menor no mapa de calor do python, que utiliza a diferença do valor de velocidade do vento entre pontos próximos para formar a intensidade de cor, o que diminui a precisão em escala dos valores mostrados.

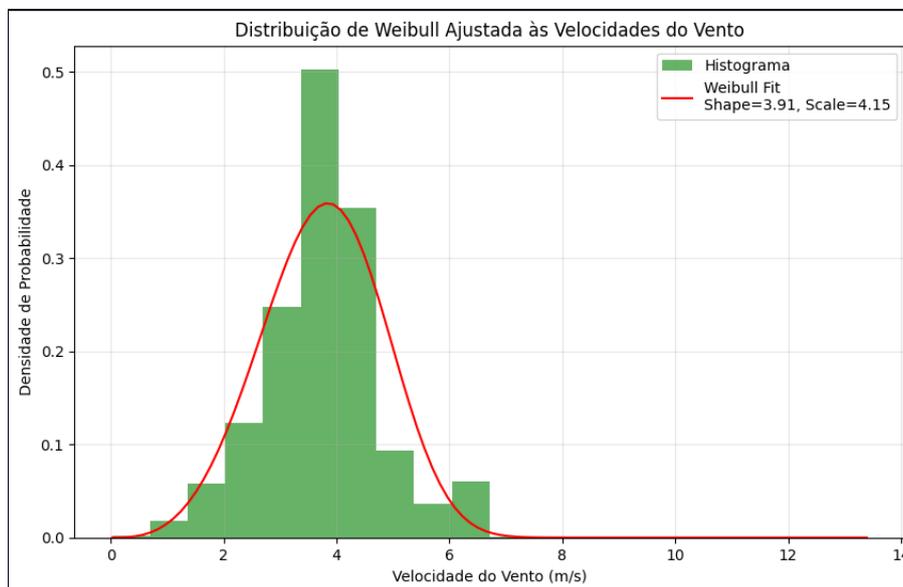
Figura 33: Comparação de intensidade das escalas de velocidade do vento entre mapa desenvolvido, à esquerda, e o Global Wind Atlas, à direita.



Fonte: Confeccionado pelo autor adaptado de Global Wind Atlas, 2024.

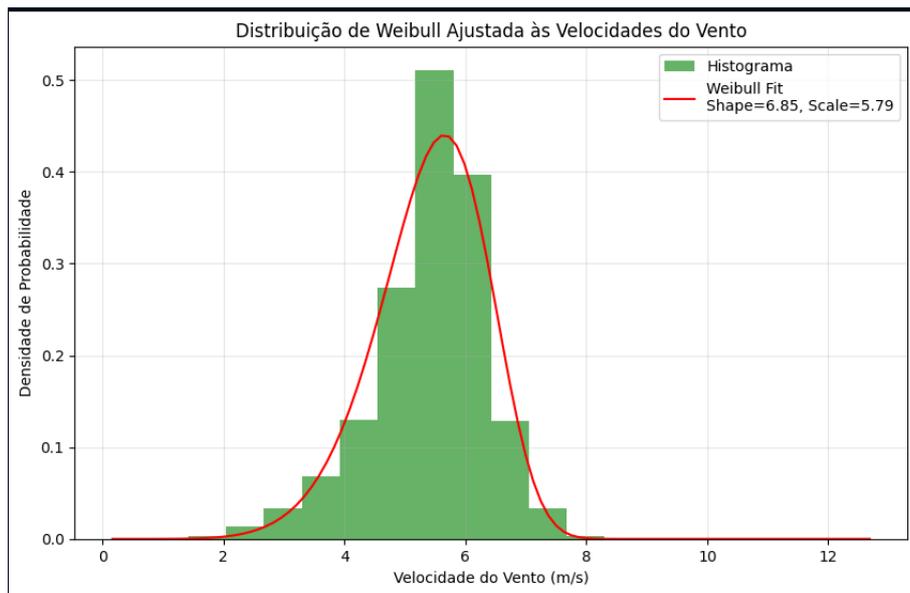
Para a melhor visualização da distribuição dessas velocidades, pode ser analisado as distribuições de Weibull nas Figuras 34 a 38. Nestas figuras, tem-se os histogramas de velocidade de vento no Rio Grande do Sul por altura, onde cada distribuição mostra as frequências de velocidade em todo o estado, ou seja, a distribuição de Weibull mostrada corresponde à distribuição de velocidades em todo o estado.

Figura 34: Distribuição de Weibull para 10 metros de altura.



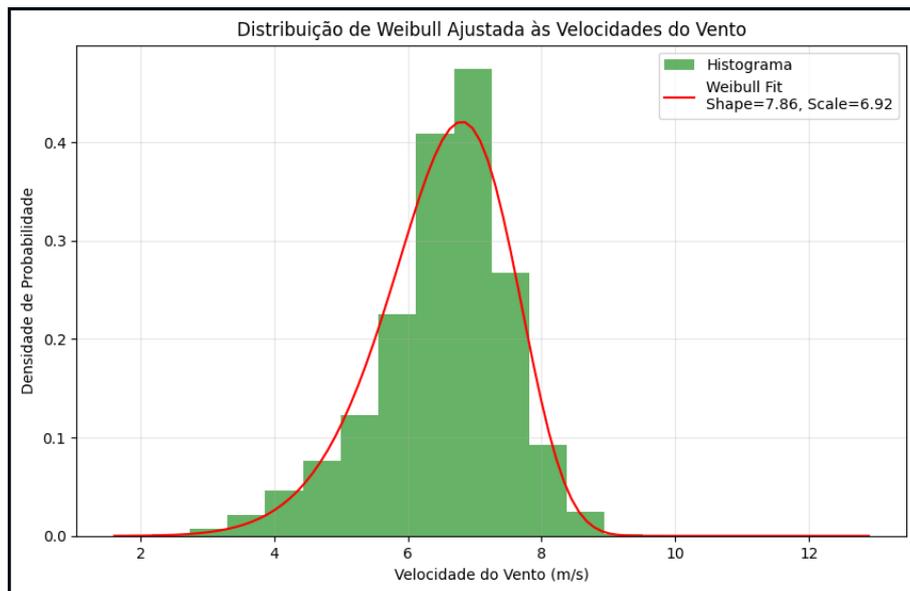
Fonte: Autor, 2024.

Figura 35: Distribuição de Weibull para 50 metros de altura.



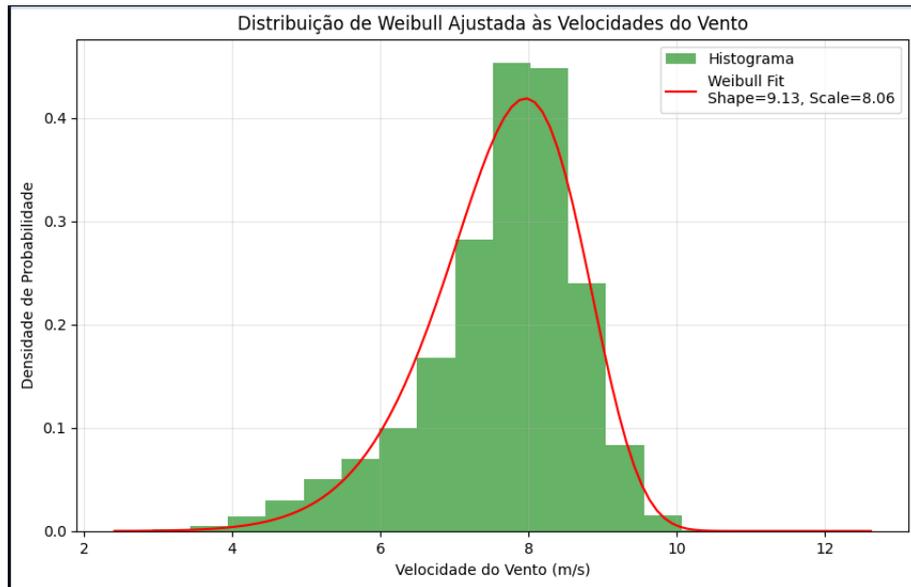
Fonte: Autor, 2024.

Figura 36: Distribuição de Weibull para 100 metros de altura.



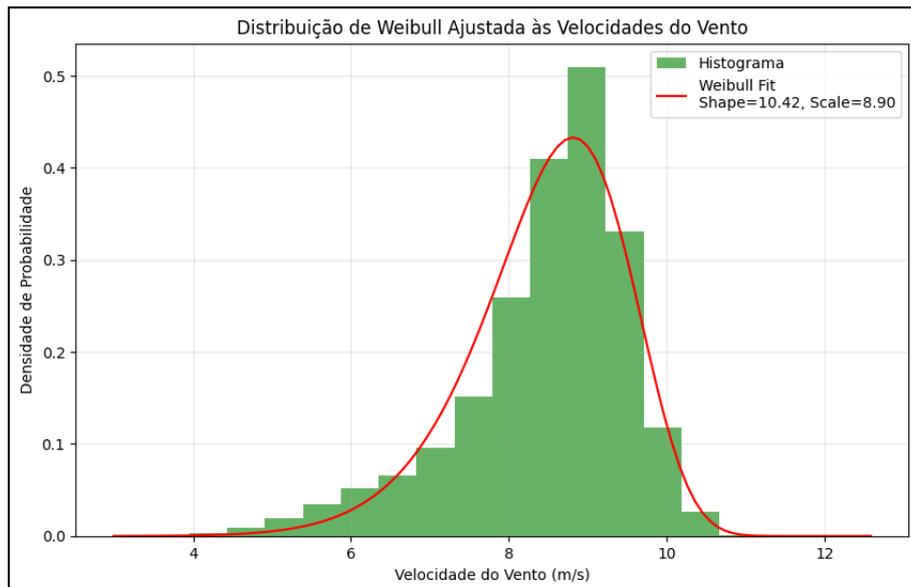
Fonte: Autor, 2024.

Figura 37: Distribuição de Weibull para 150 metros de altura.



Fonte: Autor, 2024.

Figura 38: Distribuição de Weibull para 200 metros de altura.



Fonte: Autor, 2024.

Observando as distribuições, percebemos que conforme a altura, o histograma desloca seus picos para a frente, e a escala aumenta de acordo, justificando a intensidade de cores dos mapas de calor. Isto acontece devido as questões de densidade do ar, pressão atmosférica e outros parâmetros que influenciam diretamente na velocidade incidente nas pás.

Os cálculos de energia anual geradas foram feitos de acordo com os totais de frequência de ocorrência multiplicadas pelas potências da turbina que resulta no  $f(v)*p(v)$

em kW, e este valor multiplicado pelas horas do ano, que totalizam 8.760 horas. As Figuras 39 a 43 mostram os valores de ocorrências e a potência total devido distribuição das velocidades nessas ocorrências, sendo esta última representada pela soma das parcelas de potência versus ocorrência. Os valores de que contém velocidade do vento e frequência de ocorrência, mas não tem potência da turbina calculados representam a característica de *cut-in* da turbina, que só inicia a gerar após dada velocidade de vento inicial.

Figura 39: Determinação da potência total para as ocorrências de vento em 10 metros de altura para a Turbina ACSA A17/90.

10 metros de altura			
Velocidade (m/s)	Frequência de Ocorrência (%)	Potência da Turbina (kW)	$f(v)*p(v)$ (kW)
0	0.42	0.00	0.00
1	4.51	0.00	0.00
2	14.33	0.00	0.00
3	42.35	0.00	0.00
4	29.55	36.00	10.64
5	4.59	45.00	2.07
6	4.20	54.00	2.27
7	0.03	63.00	0.02
8	0.01	72.00	0.01
9	0.01	81.00	0.00
10	0.00	90.00	0.00
11	0.00	90.00	0.00
12	0.00	90.00	0.00
13	0.00	90.00	0.00
Total			15,01 kW

Fonte: Autor, 2024

Figura 40: Determinação da potência total para as ocorrências de vento em 50 metros de altura para a Turbina ACSA A17/90.

50 metros de altura			
Velocidade (m/s)	Frequência de Ocorrência (%)	Potência da Turbina (kW)	$f(v)*p(v)$ (kW)
0	0.00	0.00	0.00
1	0.22	0.00	0.00
2	1.71	0.00	0.00
3	6.23	0.00	0.00
4	18.37	36.00	6.61
5	48.39	45.00	21.78
6	22.38	54.00	12.09
7	2.61	63.00	1.64
8	0.07	72.00	0.05
9	0.01	81.00	0.01
10	0.00	90.00	0.00
11	0.00	90.00	0.00
12	0.00	90.00	0.00
Total			42,18 kW

Fonte: Autor, 2024.

Figura 41: Figura 38: Determinação da potência total para as ocorrências de vento em 100 metros de altura para a Turbina Siemens Gamesa SG 3.4-145.

100 metros de altura			
Velocidade (m/s)	Frequência de Ocorrência (%)	Potência (kW)	$f(v)*p(v)$ (kW)
0	0.00	0.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00
2	0.26	693.00	1.82
3	1.96	1039.50	20.33
4	6.47	1386.00	89.67
5	16.17	1732.50	280.13
6	42.18	2079.00	876.95
7	28.66	2425.50	695.25
8	4.23	2772.00	117.30
9	0.06	3118.50	1.88
10	0.00	3465.00	0.08
11	0.00	3465.00	0.01
12	0.00	3465.00	0.00
Total			2083.43 kW

Fonte: Autor, 2024.

Figura 42:Figura 38:Determinação da potência total para as ocorrências de vento em 150 metros de altura para a Turbina Siemens Gamesa SG 3.4-145.

150 metros de altura			
Velocidade (m/s)	Frequência de Ocorrência (%)	Potência da Turbina(kW)	f(v)*p(v) (kW)
0	0.00	0.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00
2	0.01	693.00	0.08
3	0.39	1039.50	4.06
4	2.30	1386.00	31.90
5	6.05	1732.50	104.90
6	13.41	2079.00	278.75
7	36.27	2425.50	879.78
8	35.80	2772.00	992.28
9	5.71	3118.50	178.18
10	0.05	3465.00	1.77
11	0.00	3465.00	0.02
12	0.00	3465.00	0.00
Total			2471.72 kW

Fonte: Autor, 2024.

Figura 43:Figura 38:Determinação da potência total para as ocorrências de vento em 200 metros de altura para a Turbina Siemens Gamesa SG 3.4-145.

200 metros de altura			
Velocidade (m/s)	Frequência de Ocorrência(%)	Potência da Turbina (kW)	f(v)*p(v) (kW)
0	0.00	0.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00
2	0.00	693.00	0.00
3	0.06	1039.50	0.59
4	0.73	1386.00	10.08
5	3.01	1732.50	52.16
6	6.45	2079.00	134.16
7	15.23	2425.50	369.42
8	40.62	2772.00	1126.01
9	31.12	3118.50	970.45
10	2.78	3465.00	96.30
11	0.00	3465.00	0.07
12	0.00	3465.00	0.00
Total			2759.25 kW

Fonte: Autor, 2024.

Com os valores de potência por ocorrência encontrados para todas as alturas, foi possível calcular a produção anual em cada altura utilizando o tempo total de 8760 horas, mostrado a seguir na Figura 44.

Figura 44: Energia anual gerada para cada altura.

Altura (m)	Total $f(v)*P(v)$ (kW)	Horas	Energia gerada (kWh)	Energia gerada (MWh)
10	15,01	8760	131487,6	131,49
50	42,18	8760	369496,8	369,5
100	2083,43	8760	18250846,8	18250,85
150	2471,72	8760	21652267,2	21652,27
200	2759,25	8760	24171030	24171,03

Fonte: Autor, 2024.

Na imagem 42 podemos observar como a energia gerada aumenta em função da altura, mas nas alturas de 100 a 200 metros é possível notar como a variação de potência se comporta em uma distância quase idêntica entre estes valores, com um aumento parecido entre as velocidades de 100 a 150 metros e as velocidades de 150 a 200 metros.

Comparando esses valores com o consumo de energia elétrica no Rio Grande do Sul em 2023, por exemplo, é justificável a procura por tecnologias que possam aproveitar ventos em alturas maiores, assim como a instalação de novos parques e procura por diferentes maneiras de executar o estudo de velocidade do vento e potência de geração disponível.

## 5. Conclusão

Diante do posto neste trabalho, foram desenvolvidos mapas de calor com dados de velocidade de vento em diferentes alturas, e demonstrados suas variações por intensidade de cor. É notável como das alturas mais baixas para as mais altas, a velocidade do vento passa por variações mais bruscas, isso devido ao fato de que são reduzidos os obstáculos em parte mais altas da superfície, na camada limite.

Como a velocidade do vento apresenta ocorrência de variações junto ao aumento da altura em uma ordem crescente, este fato justifica a iniciativa pela busca de tecnologias que produzam aerogeradores mais altos, visando o potencial que há disponível. A área de varredura das pás mostra a diferença que pode haver em termos de potência disponível para a turbina apenas aumentando a área de contato das pás do aerogerador com o vento.

Analisando os mapas de calor, a região mais ao sul do Rio Grande do Sul é a que apresenta maior potencial para a geração devido a velocidade do vento, isso devido às

áreas muitos obstáculos devido a ser uma área de campo, inclusive poucos edifícios ou construções que atrapalhem o movimento do vento como um fluido livre, já que essas regiões são conhecidas por terem áreas rurais e descampadas, que é uma característica do Pampa Gaúcho.

Os valores obtidos para a energia gerada anualmente pela turbina mostram como seria o panorama caso a turbina operasse no melhor cenário possível no Rio Grande do Sul, com as condições adequadas e com a melhor disponibilidade de vento existente. Esses dados demonstram o potencial que a região tem para este tipo de geração, e como esse mercado pode ser explorado e complementar a transição energética no país.

A metodologia utilizada neste trabalho tanto para construção de mapas de calor como para cálculos de potência pode ser utilizada para qualquer outra localização que possa se obter estes dados, mas a questão de resolução de dados e a espacialização deles no mapa deve ser verificado pelo usuário para averiguar o uso de acordo com os dados a serem utilizados e a precisão de interpolações entres os pontos.

Para futuros trabalhos, pretende-se aumentar a interação do usuário com o mapa em formato de plataforma, para que o próprio usuário possa inserir as informações da turbina e analisar as possíveis potências a serem geradas. A adição de modelos de geração adequados a partir da turbina escolhida, e o processo contrários também são de interesse para trabalhos futuros na plataforma, utilizando as distribuições de Weibull para encontrar a melhor turbina para o cenário.

## REFERÊNCIAS

- ABEEÓLICA.** Boletim anual 2023. Boletim anual, 2024. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>. Acesso em: 30 nov. 2023.
- ALVARENGA, Sylvester Henrique; VIEIRA, Guilherme Souza; LATUF, Marcelo de Oliveira; PAGLIARES, Rodrigo Martins.** SISTEMA DE COMPARTILHAMENTO DE DADOS GEOESPACIAIS: SisGEO. *Caderno de Geografia*, v.32, n.69, p.443, 2022. Disponível em: <https://periodicos.pucminas.br/index.php/geografia/article/view/27312>. Acesso em 21 dez. 2024.
- Atlas Eólico: Rio Grande do Sul.** Eletrosul Centrais Elétricas S.A, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1ooYIZnRao89SE7Agz6NVR3JkJmrzRgp2/view>. Acesso em 18 dez. 2024.
- BALAGUERA, Aicardo Emmanuel Suárez.** Análisis de mediciones de rayos com Python. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional de Colombia, Colômbia, 2024. Disponível em: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/86247>. Acesso em 21 dez. 2024.
- Balanco Energético da Metade Sul - Bioma Pampa no contexto da Transição Energética.** 2024. Disponível em: <https://bemspampa.github.io/bemspampa>. Acesso em: 20 dez. 2024.
- BRAGA, Matheus.** Acoplamento Fluido-Estrutura aplicado em Turbinas Eólicas. Blog Wikki. Disponível em: <https://www.wikki.com.br/post/acoplamento-fluido-estrutura-aplicado-em-turbinas-e-C3%B3licas>. Acesso em 19 dez. 2024.
- CAMELO, Henrique do Nascimento et al.** Análise estatística da velocidade de vento do estado do Ceará. *Revista Tecnológica*, Fortaleza, v. 29, n. 2, p. 211-223, dez. 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/56544>. Acesso em: 28 nov. 2024.
- CHIKWUE, Maxwell et al.** GLOBAL MAPPER 15.0: A COMPARATIVE SOFTWARE TOOL IN THE DESIGN OF OPEN CHANNEL DRAINAGE SYSTEMS. *Scientific Journal Agricultural Engineering, University of Belgrade*, n.3, p. 61-73, 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/357392629>. Acesso em 19 dez. 2024.
- CORRÊA, João Francisco Reis; ROQUETTI FILHO, Ricardo Wagner; KORZENOWSKI, Heidi.** Análise de desempenho aerodinâmico de pás para gerador eólico, utilizando o software QBlade. INIC 20204, Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, São Paulo, 2024. Disponível em: [https://www.inicepg.univap.br/cd/INIC\\_2024/anais/arquivos/1118\\_1014\\_01.pdf](https://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2024/anais/arquivos/1118_1014_01.pdf). Acesso em 1 dez. 2024.

**CORRÊA, Michel Ferreira.** A integração de sistemas de geração de energia eólica no sistema elétrico. Niterói - RJ, 2021. Disponível em: <https://repositorio.uninter.com/handle/1/1248>. Acesso em 15 nov. 2024.

**CRESESB.** 3. Energia e Potência Extraída do Vento. Centro de referência para energia solar e eólica Sérgio de Salvo Brito, 2008. Disponível em: <https://www.cresesb.cepel.br>. Acesso em: 1 dez. 2024.

**CUSTÓDIO, Ronaldo dos Santos.** Energia eólica para produção de energia elétrica. Eletrobras, Rio de Janeiro, 2009. Acesso em 15 nov. 2024.

**DAVIS, Neil N. et al.** The Global Wind Atlas. A High-Resolution Dataset of Climatologies and Associated Web-Based Application. *BAMS Article*, 2023. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/104/8/BAMS-D-21-0075.1.xml>. Acesso em: 20 dez. 2024.

**DESHMUKH, Amol Ganesh.** CO2 emission heat map of Gulf Cooperation Council region using Python for Geographic Information Systems. 12th International Conference on Chemical and Environmental Engineering (ICEE-12), [s.l.], 2024. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2830/1/012008>. Acesso em: 28 nov. 2024.

**DIAS, Marcelo.** Energia Eólica. Mitsidi Projetos, São Paulo, 2022. Disponível em: <https://mitsidi.com/energia-eolica/>. Acesso em: 1 dez. 2024.

**EPE.** Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas). Empresa de Pesquisa Energética, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>. Acesso em: 20 nov. 2024.

**ESTUDO DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM PARQUE EÓLICO NA REGIÃO DE BAGÉ/RS.** Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, [s.l.], v. 3, n. 15, 2023. Disponível em: <https://periodicos.unipampa.edu.br/index.php/SIEPE/article/view/116941>. Acesso em: 11 dez. 2024.

**FILHO, Luis Roberto Almeida Gabriel et al.** ANÁLISE DOS MÉTODOS DE DESCRIÇÃO DO REGIME EÓLICO E SUAS APLICAÇÕES. *Fórum Ambiental da Alta Paulista*, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 35-51, 2010. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/9a5b9682-37ab-44cd-8cc2-b2fb9973f43c>. Acesso em: 2 dez. 2024.

**GLOBAL WIND ATLAS.** Disponível em: <https://globalwindatlas.info/en/area/Brazil/Rio%20Grande%20do%20Sul>. Acesso em: 1 dez. 2024.

**GRIMM, Alice Marlene.** Meteorologia Básica - Notas de Aula. Universidade Federal do Paraná, Paraná: 1999. Disponível em: <https://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/index.html>. Acesso em: 27 nov. 2024.

**IBGE.** Malha Municipal. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 20 dez. 2024.

**KAGAN, Nelson; OLIVEIRA, Carlos César Barioni de; ROBBA, Ernesto João.** Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica. São Paulo: Edgard Blucher, 2005. Acesso em: 30 nov. 2024.

**LAVANYA, Addepalli et al.** Assessing the Performance of Python Data Visualization Libraries: A Review. *International Journal of Computer Engineering In Research Trends*, [s.l.], v. 10, n. 1, p. 29–39, jan. 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/369533034>. Acesso em: 28 nov. 2024.

**LEE, Joyce; ZHAO, Feng.** GLOBAL WIND REPORT 2024. *Global Wind Energy Council*, Bélgica, abr. 2024. Disponível em: [https://gwec.net/wp-content/uploads/2024/05/GWR-2024\\_digital-version\\_final-2.pdf](https://gwec.net/wp-content/uploads/2024/05/GWR-2024_digital-version_final-2.pdf). Acesso em: 2 dez. 2024.

**MENDONÇA, Ricardo Barros de.** Modelagem de usinas eólicas através de um processo de Markov e técnicas de confiabilidade para a estimativa anual da energia produzida. *Modelagem de usinas eólicas*, Natal, Rio Grande do Norte, 2009. Disponível em: [https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/15314/1/RicardoBM\\_DISSERT.pdf](https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/15314/1/RicardoBM_DISSERT.pdf). Acesso em: 30 nov. 2024.

**MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO.** Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2017-2026). Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>. Acesso: 25 nov. 2024.

**NARANJO, Logroño et al.** Analysis of the use of the Python programming language for statistical calculations. *Espirales revista multidisciplinaria de investigación científica*, Equador, vol. 6, n. 2, set. 2021. Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/5732/573270857001/573270857001.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2024.

**NÓBREGA, Advaldo Carvalho.** SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA DETERMINAÇÃO DE TEMPERATURA DE PLANETAS COM A EQUAÇÃO BAROMÉTRICA. Universidade Federal do Tocantins, Araguaína, 2022. Disponível em: <https://repositorio.uft.edu.br/bitstream/11612/5514/1/ADVALDO%20CARVALHO%20N%c3%93BREGA%20-%20DISSERTA%c3%87%c3%83O.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2024.

**PAULA, Lucas Adati de.** EXPLORANDO BIBLIOTECAS PYTHON PARA VISUALIZAÇÃO DE CAMPOS METEOROLÓGICOS DO THE BRAZILIAN DEVELOPMENTS ON THE REGIONAL ATMOSPHERIC MODELING SYSTEM (BRAMS). Instituto Nacional de Pesquisas Especiais – INPE, São José dos Campos, 2023. Disponível em: <http://mtc-m21d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc->

[m21d/2023/10.17.16.18/doc/Relatorio\\_Final\\_Lucas\\_Adati\\_de\\_Paula.pdf](m21d/2023/10.17.16.18/doc/Relatorio_Final_Lucas_Adati_de_Paula.pdf). Acesso em: 19 dez. 2024.

**PESTANA, Diogo Alexandre Correia.** Sistemas estruturais para torres eólicas. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade da Madeira, Funchal, 2016. Disponível em: <https://digituma.uma.pt/bitstream/10400.13/1545/1/MestradoDiogoPestana.pdf>. Acesso em: 1 dez. 2024.

**PETROBRAS.** Tudo sobre transição energética: o que é, qual a importância, principais benefícios e mais. Disponível em: <https://nossaenergia.petrobras.com.br/w/transicao-energetica/tudo-sobre-transicao-energetica-o-que-e-qual-a-importancia-principais-beneficios-e-mais>. Acesso em: 30 nov. 2024.

**ROSAS-CHAVOYA, Marcela et al.** GIS A CONSTANTLY GROWING FREE AND OPEN-SOURCE GEOSPATIAL SOFTWARE CONTRIBUTING TO SCIENTIFIC DEVELOPMENT. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, n. 48, p. 197-213, nov. 2021. Disponível em: <https://publicaciones.unirioja.es/ojs/index.php/cig/article/view/5143/3989>. Acesso em: 19 dez. 2024.

**SHARMA, Kamal Kant et al.** Power quality and transient analysis for a utility-tied interfaced distributed hybrid wind-hydro controls renewable energy generation system using generic and multiband power system stabilizers. *Energy Reports*, v. 7, p. 5034–5044, 1 nov. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721006338>. Acesso em: 10 nov. 2024.

**SANTOS, Dylan da Silva.** Descrição de alguns fatores responsáveis pela geração de energia eólica: regime dos ventos, energia dos ventos, aerogerador e pás. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022. Disponível em: [https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/70084/3/2022\\_tcc\\_dssantos.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/70084/3/2022_tcc_dssantos.pdf). Acesso em: 30 nov. 2024.

**TOPÓN, Marilyn Carolina Gualotuña; CHICAIZA, Johnny David Tituaña.** GUÍA PRÁCTICA PARA GENERAR Y MEJORAR TOPOGRAFÍAS SATELITALES CON EL SOFTWARE “GLOBAL MAPPER” ENFOCADO AL DISEÑO VIAL. Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2023. Disponível em: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/25565/1/TTS1393.pdf>. Acesso em 19 dez. 2024.

**VILLANUEVA, Bernardo de Almeida; CATAPAN, Anderson; LOUSADA, Sérgio Antônio Neves.** Cooperativas de energia no Brasil: um referencial teórico para a transição energética. *DELOS: Desarrollo Local Sostenible*, Curitiba, v.16, n.50, p. 4061-4083, 2023. Disponível em: <https://www.revistadelos.com/ojs/index.php/delos/article/view/1871>. Acesso em: 21 dez. 2024.