

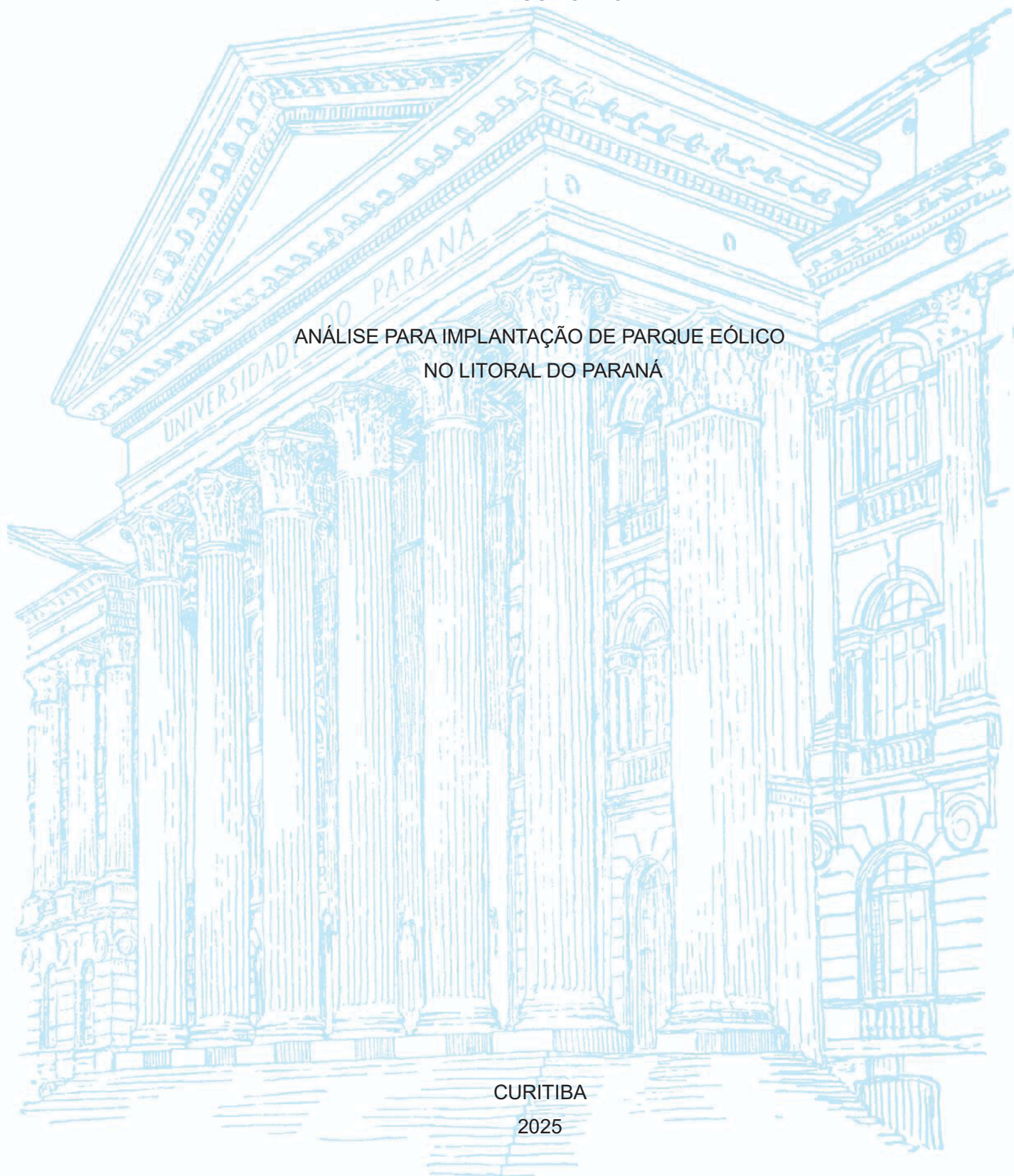
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CELIA NEUCY CZMOLA

ANÁLISE PARA IMPLANTAÇÃO DE PARQUE EÓLICO
NO LITORAL DO PARANÁ

CURITIBA

2025



CELIA NEUCY CZMOLA

ANÁLISE PARA IMPLANTAÇÃO DE PARQUE EÓLICO
NO LITORAL DO PARANÁ

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Prof(a). Dr(a). Juliana Almansa Malagoli

Coorientador(a): Prof. Dr. Clodomiro Unsihuay Vila

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Czmola, Celia Neucy

Análise para implantação de parque eólico no litoral do Paraná. / Celia Neucy

Czmola. – Curitiba, 2025.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profª. Drª Juliana Almansa Malagoli

Coorientador: Prof. Dr. Clodomiro Unsihuay Vila

1. Energia eólica. 2. Energia eólica – Aspectos econômicos. 3. Simulação por computador. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Malagoli, Juliana Almansa. IV. Vila, Clodomiro Unsihuay. V. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
ELÉTRICA - 40001016043P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **CELIA NEUCY CZMOLA**, intitulada: **Análise para Implantação de Parque Eólico no Litoral do Paraná**, sob orientação da Profa. Dra. JULIANA ALMANSA MALAGOLI, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 11 de Dezembro de 2025.

Assinatura Eletrônica

11/12/2025 12:23:15.0

JULIANA ALMANSA MALAGOLI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

11/12/2025 12:36:08.0

BRENO BRITO MIRANDA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA)

Assinatura Eletrônica

11/12/2025 12:01:10.0

ODILON LUIS TORTELLI

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Os maiores agradecimentos são direcionados ao meu esposo Marcelo Gomes Saldanha, a minha filha do coração, Ana Carolina, para minha orientadora Professora Doutora Juliana Almansa Malagoli e ao e meu Coorientador Professor Doutor Clodomiro Unsihuay Vila.

Agradecimentos especiais são direcionados à UFPR, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, vinculada ao Ministério da Educação - CAPES, e principalmente ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica - UFPR, que proporciona todo o conhecimento que atende minhas necessidades profissionais.

Estendendo principalmente à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação Araucária pelos recursos destinados ao desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

RESUMO

A energia eólica tem se mostrado uma alternativa à geração por fontes renováveis significativamente a nível mundial, com países como o Reino Unido, Alemanha, China e Dinamarca a liderarem em termos de capacidade instalada. O Brasil possui um grande potencial para instalações de parques eólicos, com o Nordeste e o Sul/Sudeste a serem regiões promissoras, pois apresentam vantagens como ventos mais fortes e constantes, maiores possibilidades de instalação e maior capacidade de turbinas, assim como enfrentam desafios, como maiores custos de construção e manutenção, além de questões de logísticas e regulamentares. Este trabalho consiste no estudo da viabilidade técnica da implantação de um parque de geração eólica no litoral do Paraná. A pesquisa situa o leitor no cenário eólico mundial, brasileiro e paranaense, baseando-se em dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA) e da Confederação Nacional da Indústria (CNI), assim como toda a sua regulamentação. Além disso, aborda trabalhos publicados em nível nacional e internacional para validação do tema. São utilizados *softwares* para as simulações, como o *COPERNICUS Climate Data Store*, o *WindSim*, o *Wind Speed Statistics*, nos quais foram tratados os dados coletados, como a velocidade do vento e as curvas de Weibull, para obtenção dos parâmetros estatísticos relevantes para as condições físicas do local e sobre a geração de energia, como por exemplo, potência do vento e turbinas eólicas. Como metodologia, foi desenvolvido um fluxograma, onde são apresentadas as etapas do projeto que devem ser satisfeitas em cada fase, para avaliar a viabilidade técnica para implantação. Nos resultados, as curvas características do aerogerador e de Weibull foram apresentadas, sendo que os dados utilizados no estudo terão uma abrangência de três anos, entre janeiro de 2023 até setembro de 2025. Concluiu-se que uma implantação prática do parque eólico não seria viável. Essa negativa deve-se primeiro por descobrir que não existe a viabilidade técnica, comprovando-se que o litoral do Paraná não tem potencial eólico para geração eólica, fazendo-se também a demonstração que a velocidade do vento, simulada nos diversos *softwares*, não atinge os valores exigidos para o funcionamento da turbina eólica e que os valores encontrados para simular a geração eólica ficaram inferiores aos 30% exigidos pelas curvas de Weibull.

Palavras-chave: Energia Eólica, Distribuição de Weibull, Simulação computacional, Viabilidade Técnica, Viabilidade Econômica.

ABSTRACT

Wind energy has proven to be a significant alternative to renewable energy generation worldwide, with countries such as the United Kingdom, Germany, China, and Denmark leading in terms of installed capacity. Brazil has great potential for wind farm installations, with the Northeast and South/Southeast regions being particularly promising, offering advantages such as stronger and more consistent winds, greater installation possibilities, and higher turbine capacity. However, it also faces challenges such as higher construction and maintenance costs, as well as logistical and regulatory issues. This work consists of a study of the technical feasibility of implementing a wind power generation park on the coast of Paraná. The research situates the reader within the global, Brazilian, and Paraná wind energy scenario, based on data from the Energy Research Company (EPE), the Brazilian Institute of the Environment (IBAMA), and the National Confederation of Industry (CNI), as well as all its regulations. Furthermore, it addresses nationally and internationally published works to validate the topic. Software such as COPERNICUS Climate Data Store, WindSim, and Wind Speed Statistics are used for simulations, in which the collected data, such as wind speed and Weibull curves, were processed to obtain statistical parameters relevant to the physical conditions of the site and energy generation, such as wind power and wind turbines. As a methodology, a flowchart was developed, presenting the project steps that must be met at each stage to assess the technical feasibility of implementation. In the results, the characteristic curves of the wind turbine and Weibull curves were presented, and the data used in the study will cover a three-year period, from January 2023 to September 2025. It was concluded that a practical implementation of the wind farm would not be feasible. This refusal is due firstly to the discovery that there is no technical feasibility, proving that the coast of Paraná does not have wind potential for wind power generation, and also demonstrating that the wind speed, simulated in various software programs, does not reach the values required for the operation of the wind turbine, and that the values found to simulate wind power generation were below the 30% required by the Weibull curves.

Keywords: Wind Energy, Weibull Distribution, Computer Simulation, Technical Feasibility, Economic Feasibility.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Mapa do litoral do Paraná..... | 16 |
| Figura 2- Capacidade eólica instalada no Brasil. | 19 |
| Figura 3 - Acréscimo anual de Energias Renováveis no Brasil. | 22 |
| Figura 4- Parques eólicos Aracatu I e Aracatu II serão instalados no Rio e no Espírito Santo. | 29 |
| Figura 5 - Fluxograma de Etapas do Projeto..... | 31 |
| Figura 6 - Disposição dos aerogeradores no parque eólico Âncora. | 32 |
| Figura 7- Subestação eólica -SEO..... | 33 |
| Figura 8- Reserva de Mata Atlântica no litoral do Paraná..... | 38 |
| Figura 9- Gráfico da velocidade dos ventos (m.s ⁻¹) em Pontal do Paraná..... | 40 |
| Figura 10- Rosa dos ventos (m.s ⁻¹) em Pontal do Paraná. | 41 |
| Figura 11- Aerogerador- parte técnica. | 42 |
| Figura 12- Curva de potência de um aerogerador típico..... | 44 |
| Figura 13- Curva do Coeficiente de potência do aerogerador. | 46 |
| Figura 14- Análise da velocidade do vento para estação Morretes no período de junho a agosto/2023, INMET..... | 47 |
| Figura 15- Análise da velocidade do vento para estação Morretes no período de junho a dezembro/2023, INMET. | 48 |
| Figura 16- Análise da velocidade do vento para estação Morretes no mês de janeiro/2024, INMET..... | 48 |
| Figura 17- Velocidade do vento, precipitação e temperatura em Pontal do Paraná simulados no software COPERNICUS em 14/09/2024. | 49 |
| Figura 18- Análise da velocidade do vento para estação Morretes no mês de janeiro/2025, IMPE. | 50 |
| Figura 19- Análise da velocidade do vento para estação Morretes no mês de abril/2025, IMPE. | 50 |
| Figura 20- Simulação velocidade vento em Pontal do Paraná para 04/05/2025, CLIMA-TEMPO. | 51 |
| Figura 21 - Condições de vento e temperatura em Pontal do Paraná para 05, 06 e 07 de maio de 2025, CLIMATEMPO..... | 51 |
| Figura 22- Análise da velocidade do vento para estação Morretes no mês de julho/2025, IMPE. | 52 |
| Figura 23- Análise da velocidade do vento para estação Morretes no dia 06/09/2025, INMET. | 52 |
| Figura 24- Mapa do Litoral do Paraná pelo aplicativo Windy..... | 53 |
| Figura 25- Mapa do Litoral do Paraná pelo aplicativo Meteoblue..... | 53 |
| Figura 26- Fator de Forma k de Weibull. | 54 |
| Figura 27- Curvas de Weibull..... | 55 |

| | |
|--|----|
| Figura 28– Padrão diário de vento e calmarias. | 56 |
| Figura 29– Curva de potência do aerogerador WKA 450 kw. | 57 |
| Figura 30 – Simulação feita com a MNI CALCULATOR. | 58 |
| Figura 31– Simulação feita com o Wind Speed Statistics para a Frequência versus curva de Weibull. | 60 |
| Figura 32– Simulação feita com o Wind Speed Statistics, para calmarias na região. | 60 |
| Figura 33– gráfico de energia gerada pelo aerogerador ENERCON e-44 com rugosidade $z_0 = 0, 250$ m onshore. | 62 |
| Figura 34– gráfico de energia gerada pelo aerogerador ENERCON E-44 para uma rugosidade $Z_0 = 0, 0002$, referente ao oceano. | 63 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1– Tabela de rugosidade Z_0 (m)..... | 61 |
|---|----|

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 1.1 | <i>JUSTIFICATIVA.....</i> | <i>18</i> |
| 1.2 | <i>OBJETIVOS.....</i> | <i>19</i> |
| 1.2.1 | <i>Objetivo geral.....</i> | <i>19</i> |
| 1.2.2 | <i>Objetivos específicos.....</i> | <i>19</i> |
| 1.3 | <i>CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO.....</i> | <i>20</i> |
| 1.4 | <i>ESTRUTURA DO TRABALHO.....</i> | <i>20</i> |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 21 |
| 2.1 | <i>ENERGIA EÓLICA.....</i> | <i>21</i> |
| 2.1.1 | <i>Energia Eólica Onshore.....</i> | <i>21</i> |
| 2.1.2 | <i>Energia Eólica Offshore.....</i> | <i>22</i> |
| 2.2 | <i>ENERGIA EÓLICA NO BRASIL.....</i> | <i>30</i> |
| 2.3 | <i>REGULAMENTAÇÃO.....</i> | <i>32</i> |
| 3 | AValiação DO POTENCIAL EÓLICO NO PARANÁ..... | 32 |
| 3.1 | <i>FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DO PROJETO.....</i> | <i>33</i> |
| 3.2 | <i>DEFINIÇÕES DE UM PROJETO PARA ESTUDO DE CASO.....</i> | <i>34</i> |
| 3.3 | <i>LOCALIZAÇÃO DO PARQUE EÓLICO DO ESTUDO.....</i> | <i>36</i> |
| 3.4 | <i>DOCUMENTAÇÃO E SELEÇÃO DO LOCAL PARA A INSTALAÇÃO DOS AEROGERADORES.....</i> | <i>39</i> |
| 3.5 | <i>A CONSTRUÇÃO DE UM PARQUE EÓLICO ENVOLVE UMA VARIEDADE DE EQUIPAMENTOS ESPECIALIZADOS:.....</i> | <i>40</i> |
| 3.6 | <i>VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO.....</i> | <i>44</i> |
| 3.7 | <i>POTÊNCIA DO VENTO.....</i> | <i>46</i> |
| 3.8 | <i>RENDIMENTO DE BETZ.....</i> | <i>48</i> |
| 3.9 | <i>DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DE WEIBULL.....</i> | <i>50</i> |
| 4 | DADOS HISTÓRICOS DA VELOCIDADE DO VENTO E SIMULAÇÃO COM SOFTWARES COMPUTACIONAIS..... | 52 |
| 4.1 | <i>ANÁLISE DE DADOS.....</i> | <i>52</i> |
| 4.2 | <i>MAPEAMENTO DO LITORAL DO PARANÁ PELO FATOR DE FORMA K DE WEIBULL.....</i> | <i>60</i> |
| 4.3 | <i>SIMULAÇÕES DE POTÊNCIA DE TURBINAS PARA PARQUES EÓLICOS SOFTWARE LIVRE ALWIN.....</i> | <i>61</i> |
| 4.4 | <i>CALCULADORA DE TURBINA EÓLICA DA MNI CALCULATOR.....</i> | <i>63</i> |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 65 |
| 5.1 | <i>VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO.....</i> | <i>65</i> |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.2 | <i>DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL.....</i> | <i>65</i> |
| 5.3 | <i>PREVISÃO DE ENERGIA GERADA NA ESCOLHA DE UM AEROGERADOR</i> | <i>67</i> |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 70 |
| 6.1 | <i>RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</i> | <i>72</i> |
| | REFERÊNCIAS | 73 |

Localizado entre a Serra do Mar e a Baía de Antonina encontra-se o município de Morretes e Guaraqueçaba é a mais isolada cidade do litoral, tendo sua localização na parte norte. O litoral do estado do Paraná pode abranger uma geração eólica que poderá ser amplamente utilizada em benefício da população, por esse motivo o estudo se faz tão importante.

A pesquisa começa apontando o relatório *Global Wind Report* - (GWR), publicado em 2024, com a pretensão de mostrar que a indústria eólica global instalou um recorde de 117 GW em nova capacidade no ano de 2023. O *Global Wind Energy Council* – (Conselho Global de Energia Eólica – GWEC), divulga em nota que mesmo estando em um ambiente político e macroeconômico em fase crítica, a geração eólica industrial tem se mostrado em crescimento exponencial, pois está sendo alavancado por uma nova vertente política, manifestando o cumprimento de uma meta histórica, com o intuito de triplicar as energias renováveis até 2030. Analisando também o documento NDC - (Contribuição Nacionalmente Determinada) – considerando os compromissos do Brasil para a redução de emissões de gases de efeito estufa, estimam-se que para atingir uma participação de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética será imprescindível ampliar a parcela de participação de fontes eólica, biomassa e solar no fornecimento de energia elétrica para no mínimo 23%. Para atingir esse compromisso os membros do GWEC devem convocar autoridades com poderes decisores políticos, investidores e sociedade civil para que trabalhem em conjunto nas principais áreas de investimento, cadeias de suprimento, infraestruturas de sistemas e consenso público, com o objetivo de definir as condições para que o avanço de energias renováveis tenha esse desempenho até 2030 (ABBEólica, 2024).

No Brasil, a Empresa de Pesquisa Energética – EPE, pensando no avanço dessa geração limpa e renovável tem se voltado para novas pesquisas na área, focando na legalização de implementação da energia eólica, sendo que o documento - Nota Técnica sobre Recursos Energéticos - contendo o Plano Nacional de Energia – PNE 2050, representa o primeiro passo de uma instituição para que haja um levantamento de onde seria possível instalar dessa modalidade de parques eólicos (EPE, 2024).

Além dos Planos Decenais, a EPE elabora periodicamente congressos onde estudiosos apresentam inovação para o tema Eólica no Brasil, a fim de buscar mais

informações sobre o tema, procurando interações com diversos órgãos governamentais (Ministério de Minas e Energia- MME, Agencia Nacional de Energia Elétrica- ANEEL, Marinha, entre outros), pesquisadores e empresas com projetos em desenvolvimentos e/ou com experiência internacional, pois a expansão observada para essa fonte precisa da existência de empreendimentos com processo de licenciamento ambiental (EPE, 2024).

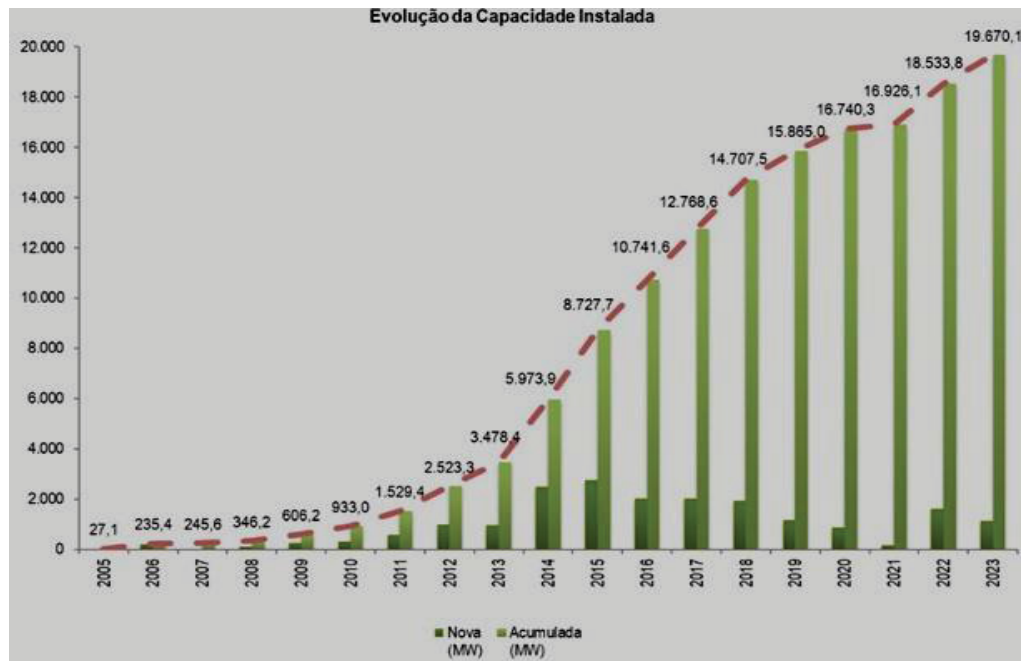
2.1 JUSTIFICATIVA

Na tentativa de suprir a dependência da humanidade em energia, sem afetar o meio ambiente, o ser humano precisa inovar na tratativa de encontrar gerações provindas de fontes renováveis e limpas. Nesse cenário de evolução tecnológica a energia eólica é um recurso abundante, não há custos com aquisição de combustíveis e riscos de elevação dos preços em longo prazo, sendo vantagem em relação às demais fontes alternativas e principalmente porque já existe tecnologia desenvolvida, em que parques eólicos estão sendo construídos para o fornecimento de energia em escala equivalente às usinas de fontes convencionais (EPE, 2024).

Segundo dados da ABEEólica, 2025, o estado do Paraná vem recebendo investimentos que transformam a geração de energia, apresentando como referência um investimento bilionário na cidade de Palmas que receberá a instalação, até o final de 2025, de mais 72 turbinas, com uma potência de 500 MW. Até janeiro de 2026, o Brasil deve começar a operar cerca de 240 novas usinas de energia solar e eólica, sendo que o Paraná almeja se destacar como líder na área, sendo que o setor nacional passa por uma fase de reestruturação e demanda por profissionais qualificados e o governo estadual está promovendo ativamente a transição energética, focando na descarbonização e na transição energética.

Explorar este campo possibilita uma maior participação nas inovações tecnológicas que buscam reduzir a dependência de fontes de energia poluentes e melhorar a eficiência da rede elétrica. A Figura 2 ilustra a capacidade de energia eólica instalada no Brasil, o que demonstra a necessidade de novos estudos para essa expansão.

Figura 2- Capacidade eólica instalada no Brasil.



Fonte: (Atlas Eólico do Paraná, 2025)

2.2 OBJETIVOS

2.2.1 Objetivo geral

Estudar a viabilidade técnica para a implantação de um parque eólico no litoral do Paraná.

2.2.2 Objetivos específicos

- Buscar na literatura teses e dissertações que tragam o tema de viabilidade técnica para a implantação de um parque eólico no litoral do Paraná;
- Utilizar *softwares* de simulação para cálculo de viabilidade técnica;
- Elaborar um fluxograma que demonstra a sequência da instalação do parque eólico;
- Resolver os cálculos para a curva de Weibull necessários para comparar com as simulações;
- Identificar uma possível área para a instalação de um parque eólico;
- Verificar se realmente existe a viabilidade técnica de implantação do parque.

2.3 CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

- Disseminação de conhecimentos acerca de parques eólicos;
- Conhecimento técnico sobre energia eólica;
- Conhecimento de legislação necessária e processo de instalação de parque eólico;
- Viabilidade técnica de instalação de um parque eólico no litoral do Paraná.

2.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação de mestrado está organizada, conforme os tópicos a seguir:

- Capítulo 1 - aborda a Introdução, onde serão apresentados os objetivos, as justificativas e as contribuições da dissertação;
- Capítulo 2 – apresenta a fundamentação teórica onde será mostrado de uma maneira geral sobre as energias renováveis com detalhes na Energia Eólica incluindo as revisões da bibliografia;
- Capítulo 3 – avalia o Potencial Eólico no Litoral do Paraná, com suas principais equações do projeto;
- Capítulo 4 – demonstra as simulações computacionais com os *Softwares* para a velocidade do vento e do clima da região.
- Capítulo 5 – sessão dos Resultados e Discussões, onde as análises feitas dos resultados da viabilidade técnica são expostas.
- Capítulo 6 – apresenta as Considerações Finais e Trabalhos Futuros.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As fontes de energia classificadas como renováveis são consideradas inesgotáveis, já que suas reservas se mantêm em constante renovação mesmo com o uso contínuo. Entre os exemplos de fontes renováveis estão a hídrica, que utiliza a energia da água dos rios; a solar, que capta a energia do sol; a eólica, gerada a partir do vento; a biomassa, proveniente de matéria orgânica; a geotérmica, derivada do calor do interior da Terra; e a oceânica, que aproveita a energia das marés e das ondas. (EPE, 2024).

Certas fontes de energia apresentam variações na produção de eletricidade ao longo do dia ou do ano. Por exemplo, a energia eólica depende da presença de ventos, a energia solar não funciona à noite, e as hídricas enfrentam dificuldades em períodos de estiagem. Apesar disso, as fontes renováveis são classificadas como limpas por emitirem uma quantidade significativamente menor de gases de efeito estufa (GEE) em comparação às fontes fósseis. Essa característica tem facilitado sua crescente inserção tanto no mercado brasileiro quanto no cenário mundial. (EIA, 2024).

3.1 ENERGIA EÓLICA

3.1.1 Energia Eólica *Onshore*

A energia eólica *onshore* é gerada a partir do aproveitamento do movimento das massas de ar em parques eólicos localizados em terra. Para converter a energia do vento em eletricidade, são utilizados aerogeradores equipados com grandes hélices, cujo movimento depende da intensidade do vento na região. Essas hélices geralmente possuem dimensões comparáveis às asas de aviões e são montadas em torres que podem alcançar até 150 metros de altura. Como fonte de energia renovável, uma usina eólica não gera poluição atmosférica durante seu funcionamento. (EPE, 2024).

Essa fonte de energia só é viável quando há vento suficiente. Nas regiões sul e nordeste do Brasil, os ventos são intensos, possibilitando a instalação de diversos parques eólicos, compostos por aerogeradores que funcionam de maneira semelhante às usinas. No entanto, é fundamental considerar o impacto sobre as aves, evitando a instalação em áreas onde exista alto risco de colisão com as hélices dos

aerogeradores. Além disso, é necessário assegurar que as intervenções para implantação dos parques não causem danos significativos aos ecossistemas locais.

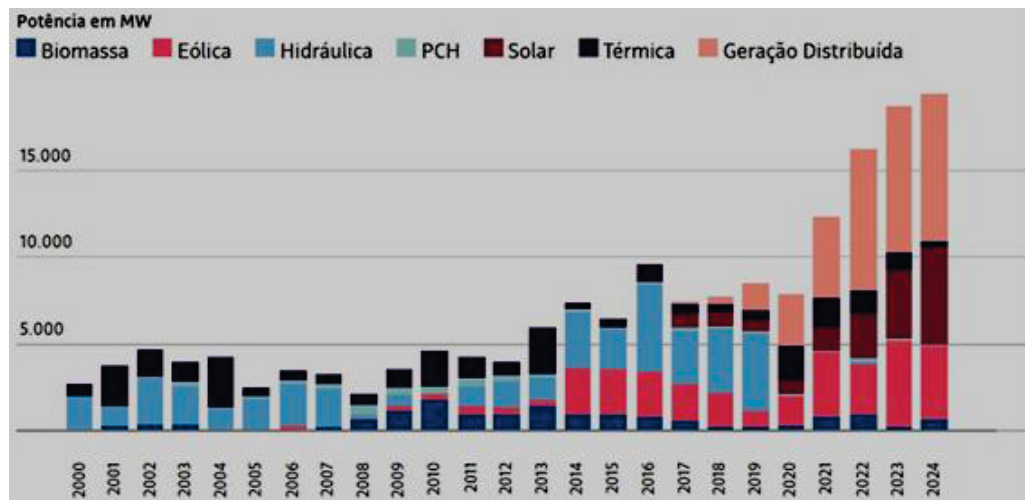
3.1.2 Energia Eólica *Offshore*

Não se sabe ao certo quando o vento começou a ser aproveitado como fonte de energia renovável. Pesquisadores sugerem que, há milhares de anos, em países do Oriente, já se utilizavam máquinas que aproveitavam a força aerodinâmica de arrasto, por meio de placas ou velas, para realizar trabalho. A partir da Idade Média, essa força passou a ser empregada em maior escala, contribuindo tanto para o desenvolvimento das grandes navegações quanto para o aumento da eficiência de máquinas eólicas (ASIM ET al., 2022).

Os registros sobre o uso da energia eólica indicam um marco significativo no século XIX, quando os Estados Unidos vivenciaram um amplo processo de aplicação de máquinas eólicas. Esse movimento ocorreu especialmente após a abolição da escravidão, em 1863, com a popularização do catavento multipá para o bombeamento de água. Essas máquinas chegaram a ser produzidas em escala industrial, atingindo centenas de milhares de unidades anuais por diferentes fabricantes. Essa produção em massa tornou os equipamentos acessíveis para grande parte da população, devido aos investimentos em pesquisa voltados à utilização da energia eólica. No cenário atual, a energia eólica tem potencial para desempenhar um papel essencial na transição energética do Brasil, contribuindo para diversificar a matriz energética e reduzir a dependência de combustíveis fósseis (ASIM ET al., 2022).

Um estudo publicado em 2020 pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério de Minas e Energia, revelou que o Brasil possui potencial técnico para gerar até 700 GW utilizando aerogeradores instalados em alto-mar. Esse valor supera em mais de três vezes a capacidade energética total atual do país, que é de 194 GW. A FIGURA 3 apresenta o acréscimo anual de Energias Renováveis no Brasil ao longo dos últimos 25 anos.

Figura 3 - Acréscimo anual de Energias Renováveis no Brasil.



Fonte: (ANEEL, 2025).

Na década de 1980, a nível global, observou-se um estímulo ao mercado de energia eólica em regiões como Califórnia (EUA), Dinamarca e Alemanha. Nessas localidades, a utilização da energia eólica alcançou uma contribuição expressiva para o sistema elétrico, tanto em termos de geração quanto de economia. O desenvolvimento tecnológico desse período foi impulsionado por indústrias emergentes do setor, que atuavam em um ambiente competitivo e beneficiado por mecanismos institucionais de incentivo, especialmente por meio de remuneração pela energia gerada. Entre os aspectos mais relevantes desse processo, destacam-se a modularidade das instalações e os avanços que tornaram os investimentos em geração elétrica mais acessível a uma ampla gama de investidores. A produção em escalas industriais crescentes, o aumento na capacidade unitária das turbinas e a introdução de novas técnicas construtivas contribuíram para reduções graduais e significativas no custo por quilowatt instalado, refletindo diretamente na redução dos custos de geração (ABBEOLICA, 2024).

Em relação aos problemas ambientais que precisavam ser solucionados, destacava-se os efeitos das pás das turbinas sobre aves, questão amplamente mitigada com o advento de turbinas de grande porte e velocidades angulares mais reduzidas nos rotores. Por ser considerada uma forma de geração de energia praticamente inofensiva ao meio ambiente, sua instalação passou a simplificar os longos e detalhados estudos ambientais exigidos pelas fontes tradicionais de geração elétrica. Em muitos casos, bastou aos órgãos competentes a definição das áreas

autorizadas para sua implantação. Esse cenário, combinado com a produção em escala industrial de turbinas, transformou a geração eólica em uma das tecnologias com maior crescimento na ampliação da capacidade energética. (ASIM ET al., 2022).

Na sua tese, o autor BARBOSA (2018) discorre sobre as normas que regem os parques eólicos em alto-mar, avaliando os fundamentos e vivências regulatórias do Brasil em relação à geração de energia eólica em terra, à produção de energia hidrelétrica, à exploração de petróleo e gás natural, além da geração de energia eólica em áreas oceânicas em nações como Reino Unido, Alemanha, Dinamarca, Países Baixos, Bélgica, China e Estados Unidos. Utilizaram-se modelos de referência para embasar a realidade brasileira, apresentando os princípios dos sistemas de concessão de usinas hidrelétricas e as diretrizes referentes à exploração e produção de petróleo e gás, assim como as experiências internacionais sobre energia eólica em alto-mar, adaptando o desenvolvimento de instrumentos legais e normativos para o contexto institucional do Brasil.

OZATO (2023) é outro autor que propõe uma abordagem estocástica para comparar o LCOE (Custo Nivelado de Energia) de parques eólicos em cinco pontos diferentes da costa brasileira, o autor leva em consideração modalidades diferentes tributos e tipos de comércio de créditos de carbono. Os resultados revelaram que a tributação pelo Programa de Parcelamento de Débitos, o qual permite a regularização de tributos e o local para explorar a geração de energia eólica são os fatores que mais influenciam a redução do risco financeiro de se investir em geração no Brasil. Por sua vez, se torna possível negociar um contrato Técnico de Gestão de Custos; considerando perguntar sobre preço, ou transmitir o quanto você pode pagar, analisar o pedido de um preço mais baixo e ser flexível na data de entrega contribui para a redução dos custos dos projetos, mas não significativamente reduz o risco financeiro.

Segundo os autores (PESSANHA; MELO; ALMEIDA, 2022), verifica-se no Brasil uma participação já elevada da energia eólica, requerendo que as ferramentas computacionais processem as tomadas de decisão na operação e no planejamento de sistemas elétricos. Os autores descrevem uma metodologia para a modelagem das correlações espaciais entre os regimes de vento no problema de fluxo de potência probabilístico. Baseiam-se na transformação de *Nataf*, na Simulação de Monte Carlo e na estimação não paramétrica de densidades de probabilidades condicionais entre a velocidade do vento e a potência eólica. A efetividade da metodologia foi ilustrada

por meio de estudos de caso com o Sistema Teste IEEE 118 barras e com uma configuração do sistema elétrico do Nordeste brasileiro com 965 barras.

Como seu objetivo principal, a revisão bibliográfica da energia eólica, (BARRA; TEIXEIRA, 2022) trazem um histórico de utilização dessa pesquisa, desde o seu uso precursor de antes da existência da energia elétrica até a atualidade, destacando as matrizes energéticas dos quatro maiores produtores de energia eólica do mundo (China, Estados Unidos, Alemanha e Reino Unido), bem como suas políticas de sustentabilidade e planos para o futuro da geração de energia. Adiante, os autores descrevem as partes constituintes do aerogerador, as características do vento e como acontece a geração de energia elétrica por meio dessa fonte. Adicionalmente, demonstram que o crescimento da capacidade de geração tende a um crescimento exponencial mostrando uma apresentação do mapa do potencial eólico nacional.

Em sua tese, a autora REZENDE (2020), compara o grau de complementaridade de tempo e espaço entre sistemas eólicos e outras fontes da matriz elétrica brasileira. Conclui que essas fontes renováveis não agregam muita confiabilidade ao sistema e assim sendo necessário utilizar a complementaridade de outros tipos de fontes de geração, como a hidroelétrica ou a termoelétrica em períodos de escassez. A metodologia utilizada por ela apresenta um modelo de otimização que associa informações hidrológicas, eólicas e de irradiações solares, que tem como objetivo obter o menor custo de expansão para o Sistema Interligado Nacional.

De modo semelhante o autor Goncharov (2021), também enfatiza as realizações e possibilidades no setor de energia eólica, simulando um projeto financiado por meio dos recursos do BNDES e dos Acordos de Compra de Energia (PPAs), estabelecidos por contratos de longa duração com a Eletrobrás, que é a maior concessionária de energia do Brasil sob controle do governo. O texto aborda a estrutura do processo licitatório e os riscos associados ao projeto. Além disso, é feita uma análise financeira básica para avaliar um projeto hipotético de parque eólico a ser implantado na costa brasileira. Como resultado, o autor discute as estratégias das principais empresas petrolíferas, com ênfase em projetos de energia eólica em alto-mar e seu impacto na transição energética. Também são destacados a capacidade de geração eólica no Brasil e as possíveis sinergias com as atividades de exploração de petróleo e gás.

O estudo de (GORAYEB; BRANNSTROM, 2020) analisa a implantação de um parque eólico no litoral oeste do Ceará, destacando como o processo de licenciamento estatal inviabilizou uma comunidade tradicional localizada próxima aos aerogeradores. A comunidade opôs-se ao empreendimento devido à perda de território e recursos naturais, especialmente uma lagoa utilizada há gerações para pesca e lazer, que foi destruída durante as obras. Apesar de esforços de mitigação promovidos por instituições sociais, jurídicas e o Ministério Público, os resultados foram contraditórios, levando a falhas no licenciamento e a conflitos internos na comunidade. A pesquisa também aplica o conceito social de GAP, evidenciando a discrepância entre classes sociais e entre a opinião pública nacional favorável e a oposição local, uma dinâmica que, embora comum em outros parques eólicos, ainda é pouco explorada na literatura acadêmica.

O autor (TUCHTENHAGEN, 2019) realizou um estudo técnico simplificado na região de Urussuquara, incluindo uma análise financeira básica para atender à demanda energética local, visando discutir a viabilidade de parques eólicos no Espírito Santo. Além disso, avalia o potencial de geração de energia eólica no litoral Sul do Brasil e analisa a eficácia do *Weather Research and Forecasting Model* (WRF) na prospecção de energia eólica.

Os trabalhos de (XAVIER; GORAYEB; BRANNSTROM, 2020) discutem atividades na zona costeira dos municípios de Itapipoca, Amontada e Itarema, no Ceará, onde há interesse em projetos de parques eólicos. São dois projetos principais: o Complexo Eólico Marinho Asa Branca I (CEMAB I) e o Complexo Eólico Marítimo Jangada (CEMJa). O CEMAB I terá dez parques com cinco aerogeradores cada, totalizando 400 MW, de 2 a 8 km da costa. O CEMJa, a cerca de 23 km da praia, terá quatro parques com cinquenta aerogeradores cada, totalizando 200 torres e 3 GW de capacidade. Ambos se interligam ao Complexo Industrial e Portuário do Pecém, a cerca de 60 km de Fortaleza.

No estudo de caso de (DANTAS, 2013) na Costa Rica, uma turbina eólica com eixo horizontal de 3 kW é instalada em uma área arborizada. A produção teórica de energia é calculada para um micro moinho de café, e uma estação meteorológica é colocada para medir a velocidade do vento. Após oito meses, a turbina gerou 225,76 kWh, que corresponde a apenas 37,75% da previsão de 598 kWh, indicando que o aerogerador não se ajusta às condições do local.

A tese de NOGUEIRA (2020) mostra que o crescimento dos parques eólicos na Europa se deve aos avanços nas turbinas e estruturas de fundação, melhorando a economia do setor. A União Europeia quer alcançar 100 GW de capacidade eólica até 2030, enfrentando desafios de custos e tecnologia. É importante entender a situação atual e as tendências futuras.

No Chile, (MATTAR; BORVARÁN, 2016) fizeram simulações de campos de vento em alturas de 20, 30, 40 e 140 m, com resolução de 3×3 km, entre 1º de fevereiro de 2013 e 31 de janeiro de 2016. Os resultados mostraram que a potência eólica no local estudado é cerca de 1000 Wm^{-2} a 140 m. Para uma turbina de 8 MW, o fator de capacidade é acima de 40%, com geração média anual de cerca de 30 GWh. Os autores destacam que a energia eólica no Chile é uma fonte renovável emergente e suas estimativas ajudam a entender o potencial dessa energia no país.

Em sua tese (SOUZA MENDONÇA; BORNIA, 2020) a Energia Eólica Aerotransportada (AWE) é uma nova tecnologia de energia renovável que usa dispositivos em vez de turbinas convencionais. Ela capta a energia do vento em altitudes elevadas e se mantém no ar por forças aerostáticas ou aerodinâmicas. O artigo revisa as tecnologias em pesquisa, focando em protótipos de universidades e empresas e seus resultados.

Os autores (PINHEIRO ET al., 2021) salientam que as questões ambientais e o aumento da demanda por energia elétrica levam à busca por novas fontes energéticas, como a energia eólica. Essa fonte se mostra promissora no Brasil devido à sua extensão de áreas adequadas e bons ventos. O texto apresenta dados de órgãos e estudos que mostram sua importância na matriz energética brasileira e no atendimento da demanda populacional.

Em sua tese, (BARBOSA, 2025) afirma que as usinas eólicas, as quais geram energia a partir do vento em áreas marinhas, são comuns em vários países, especialmente na Europa. O Brasil possui quase 700 GW de recursos disponíveis para essa energia, e há interesse de investidores na área. No entanto, falta um marco jurídico claro e apoio político para desenvolver essa fonte no país. A tese do autor analisa o estado atual da regulamentação e sugere etapas para avançar na indústria, beneficiando o país e a população. O autor realiza uma pesquisa sobre a legislação e regulação das usinas eólicas no Brasil, usando um método indutivo-dedutivo e análise qualitativa. A pesquisa busca comprovar que a legislação atual é insatisfatória. O texto

aborda a importância de investir em energia eólica, revisita a história da energia eólica *onshore* no Brasil e suas raízes na Europa. Além disso, analisa as normas sobre áreas marítimas e projetos de lei, destacando o papel do hidrogênio de baixo carbono e a infraestrutura portuária. Ao final, o autor compara as políticas dos EUA e Colômbia, sugerindo que o Brasil precise de um regulamento claro para atrair investidores, enfatizando a necessidade de apoio político e políticas públicas.

Segundo (XAVIER; GORAYEB; BRANNSTROM, 2020), a exposição dos conceitos de justiça processual e distributiva nos parques eólicos revela três grandes desafios: avanços em ciências exatas, estabilidade das redes e níveis de planejamento. Contudo, faltam considerar desafios sociais, legais e naturais que afetam a instalação e operação dos parques. O autor salienta que os cientistas sociais se concentram na aplicação de justiça distributiva e processual no entendimento de conflitos entre comunidades locais e parques eólicos. Referente ao assunto de energias renováveis afirma que o alcance da justiça processual se deve a repassar informações para pessoas de direito, realização de ações para tomadas de decisões, buscando a capacidade de encontrar os resultados no projeto com a participação das comunidades que são afetadas pelo projeto.

Ao aplicarem esses conceitos de justiça em análises de conflitos entre moradores locais e empreendimento eólicos *onshore* no município de Galinhos, Rio Grande do Norte, perceberam que a justiça processual e a distributiva se aplicava mais aos impactos negativos dos parques eólicos, referente aos processos de tomada de decisão e à estruturação dos pontos de vista sustentados nas comunidades locais. Os autores salientam que a preocupação da justiça distributiva se dava em relação aos empregos da comunidade local e o impacto ao meio ambiente sendo justificativas para apoiar os parques eólicos. Mas, afirmam que os críticos aos empreendimentos argumentaram que a quantidade de emprego não seria suficiente, já que os parques eólicos não impulsionaram o turismo como esperado e que os impactos ao meio ambiente foram maiores do que o esperado.

Ainda, segundo os autores, foram encontradas violações na justiça processual em termos de informações e audiências públicas, o que não permitiu a aceitação dos parques eólicos. Desta forma, entendeu-se que a comunidade local deve tomar as decisões que potencialmente irão afetar suas vidas, tornando-se fundamental a inserção dessas pessoas na justiça participativa, sendo que a centralidade do

processo deveria girar entorno da das comunidades afetadas pelo projeto, tendo suas atividades comuns modificadas. Afirmam ainda que apesar de ambos os conceitos de justiça se apresentarem unidos na literatura, o caso apresentado focou na justiça participativa, compreendendo-se que o conhecimento e as experiências das comunidades afetadas são valiosos, podendo ser usados para auxiliar nas direções do planejamento por meio de ferramentas que promovam eficácia na inclusão social.

Informa a Lei nº 15.097/2025, sancionada em 10 de janeiro de 2025, incutiu o marco legal para a geração de energia eólica *offshore* no Brasil e também foi explicada, já que a lei disciplina o aproveitamento de potencial energético *offshore* e altera outras leis que tratam de energias renováveis, sendo assim a legislação atrai investimentos e promover o desenvolvimento da energia eólica. A lei implica que na obtenção de licenças ambientais e outras autorizações envolvem avaliações de impacto ambiental e a garantia de conformidade com regulamentações locais e fundamenta a garantia que o parque eólico seja construído de maneira responsável. Verifica-se que a oposição à instalação de parques eólicos manifesta-se frequentemente devido a preocupações com impactos socioeconômicos e ambientais e de que como a energia eólica é produzida e distribuída, se incluem perda de biodiversidade, desmatamento, desequilíbrio ecossistêmico, poluição sonora e impactos na saúde das comunidades locais. Essa supervisão e legislação dos parques eólicos e usinas geralmente recaem sobre órgãos governamentais específicos, o que no Brasil são a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA).

Com a transição energética, (LAGE; PROCESSI, 2013) salientam a importância do crescimento das fontes renováveis de energia. Os autores afirmam que a valorização dos recursos locais configura em sistemas de geração distribuída de energia (GDE), baseados em sistemas eólicos de baixa potência (SEBP). Os autores apresentam no seu trabalho iniciativas de pequena escala, que atendem às necessidades das comunidades, apresentando múltiplos processos de transformação, os quais envolvem o uso do potencial eólico e novos papéis dos atores envolvidos na gestão da energia. O artigo explora que na Argentina, em busca de ampliar a participação dos recursos eólicos no fornecimento de eletricidade por meio da revisão de fontes secundárias, identificando-se oportunidades e desafios multidimensionais diante do avanço de projetos eólicos de baixa potência, o que levam a busca de

modelos energéticos. Os autores afirmam a energia eólica de baixa potência representa uma alternativa, mas com altos custos de investimento e com amplo potencial devido às capacidades científico-tecnológicas locais e sua adequação para fornecer soluções energéticas adaptadas às necessidades do país.

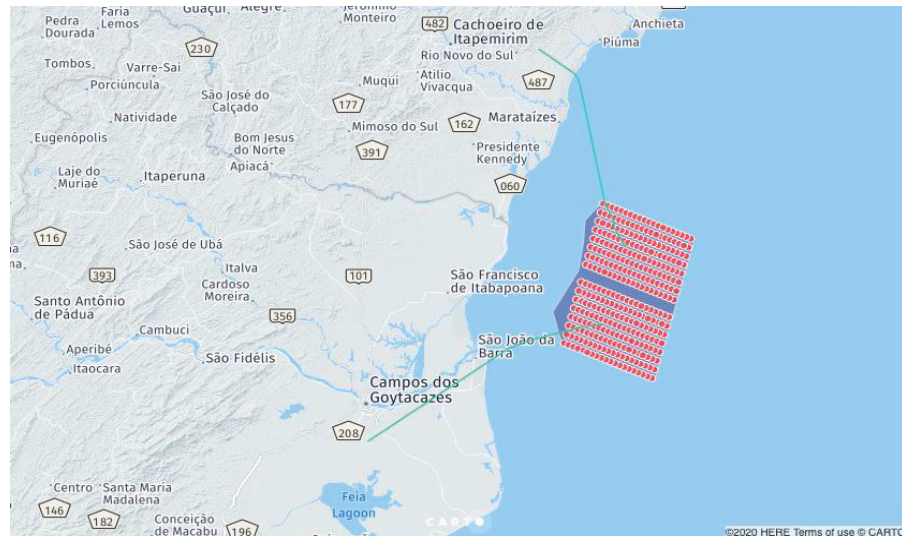
A energia eólica no Brasil passou por um período de desenvolvimento e crescimento, segundo a dissertação de (SILVA, 2023) e foi verificado que nos últimos dez anos ocorreram avanços que proporcionaram ao país se tornar o sexto maior produtor de energia eólica no mundo foi verificado. Segundo o autor, o crescimento desse tipo de energia é crucial, pois para que a economia brasileira possa alcançar um crescimento econômico benéfico, de cunho social e ambiental são necessários incentivos nessa geração. No entanto, mesmo que o crescimento apresentado na primeira década do século XXI tenha sido exponencial, a indústria de energia eólica ainda é relativamente um terreno fértil no Brasil e deve enfrentar várias etapas de desenvolvimento para que ocorra sua consolidação. Para isso, novas políticas públicas são necessárias.

A tese de (VILLELA, 2015) apresenta as regiões com maior atratividade econômica para a geração eólica, sendo que a região Sudeste tem menos significância e a região Nordeste as melhores para desenvolvimento dessa geração. O autor destaca as dez principais áreas para desenvolvimento, totalizando 126 GW de capacidade. Conclui o autor que o Brasil tem um potencial eólico significativo que pode ser implantado de forma sustentável se critérios de localização adequados forem aplicados.

3.2 ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

Os parques eólicos no Brasil estão concentrados principalmente nas regiões Nordeste, Sudeste e Sul, de acordo com estudos e projetos em andamento. O Nordeste se destaca pela maior quantidade de projetos em análise para licenciamento ambiental, com projetos como o Parque Eólico Mangará na costa do Piauí, o Parque Eólico Ibitucatu na costa do Ceará e o Parque Colibri na divisa entre o Rio Grande do Norte e o Ceará. Além disso, há projetos em estudo no litoral do Rio de Janeiro e entre o Rio e o Espírito Santo, conforme Figura 4.

Figura 4- Parques eólicos Aracatu I e Aracatu II serão instalados no Rio e no Espírito Santo.



Fonte: IBAMA (2025)

Alguns projetos em destaque incluem:

- **Alísios Potigüeres:** Em licenciamento pelo IBAMA, com capacidade de 1,85 GW.
- **Amazonita:** Em licenciamento pelo Ibama, com capacidade de 3 GW.
- **Aracatu:** Em licenciamento pelo Ibama, com capacidade de 3,84 GW.
- **Araioses:** Em licenciamento pelo Ibama, com capacidade de 2,81 GW.
- **Parque Mangara:** Na costa do Piauí, em avaliação de viabilidade.
- **Parque Ibitucatu:** Na costa do Ceará, em avaliação de viabilidade.
- **Parque Colibri:** Fronteira litorânea entre o Rio Grande do Norte e o Ceará, em avaliação de viabilidade.
- **Parque Mangará:** Localizado na costa do Piauí, está em fase de avaliação da viabilidade.
- **Parque Ibitucatu:** Localizado na costa do Ceará, também em avaliação de viabilidade.
- **Parque Colibri:** Situado na fronteira entre o Rio Grande do Norte e o Ceará, em avaliação de viabilidade.
- **Parque Caucaia:** Localizado no Ceará, com capacidade de 598 MW, planejado para ser instalado a 2-9 km da costa.
- **Parque flutuante no Rio de Janeiro:** A Petrobras registrou o primeiro projeto de eólica flutuante no estado, com capacidade de 3,2 GW, a ser instalado a 42 km da costa de Cabo Frio.

3.3 REGULAMENTAÇÃO

As questões ambientais relacionadas às lâminas das turbinas e seu efeito sobre as aves foram, em grande parte, resolvidas com o advento de turbinas de grande escala e a diminuição das velocidades de rotação dos rotores. Sendo uma forma de geração de energia praticamente segura para o meio ambiente, a instalação dessas turbinas passou a requerer estudos ambientais menos rigorosos e mais rápidos em comparação com as fontes tradicionais de eletricidade. Em muitos casos, é suficiente que as autoridades responsáveis definam as regiões autorizadas para sua instalação. Esse aspecto, junto com a produção em massa das turbinas, ajudou a tornar a energia eólica uma das tecnologias com maior crescimento na ampliação da capacidade de geração.

4 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO NO PARANÁ

Na cidade de Palmas, no estado do Paraná, foi estabelecido, em 1999, o primeiro parque eólico *onshore* da região Sul do Brasil. O empreendimento conta com uma estrutura composta por cinco aerogeradores do modelo E-40/500 kW, cada um com um rotor de 40 metros de diâmetro, instalados em torres de 45 metros de altura. Esse parque possui uma capacidade total instalada de 2,5 MW e gera anualmente cerca de 5.000 MWh. Já em 2019, Palmas recebeu uma segunda usina eólica em seu território, o Complexo de Geração Eólica Palmas II, que apresenta uma potência total projetada de 200 MW. Este novo complexo tem capacidade suficiente para atender o consumo de energia de uma cidade de aproximadamente 240 mil habitantes, alcançando uma potência quase 80 vezes superior à do parque pioneiro, construído pela Copel (COPEL, 2024).

A identificação do expressivo potencial eólico da região foi realizada por meio de medições de vento iniciadas em 1995, no âmbito do Projeto Ventar, coordenado pela Copel. Para avaliar o potencial eólico do Estado do Paraná, foram conduzidos testes preliminares em áreas com alturas de 50 m, 75 m e 100 m, revelando potenciais respectivos de 310 MW, 1.360 MW e 3.370 MW, considerando regiões com velocidades de vento iguais ou superiores a 7 m/s. Em 2005, ano em que o projeto foi

implementado, o consumo total de energia no Estado alcançou 22.020 GWh, enquanto a geração anual estimada por energia eólica era de 13.970 GWh, evidenciando que essa fonte renovável poderia atender a uma parcela significativa da demanda energética.

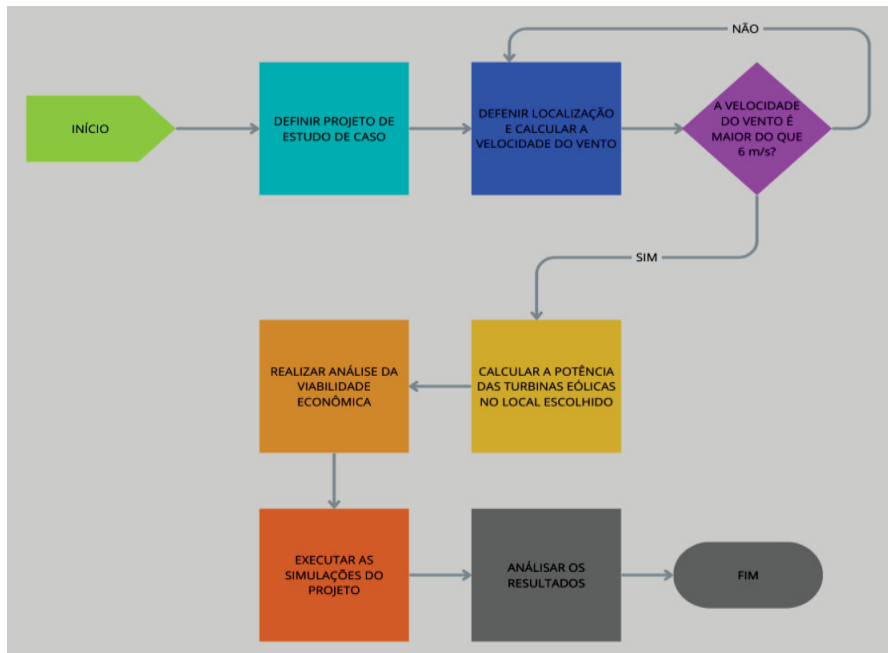
A energia eólica pode desempenhar um papel fundamental durante os meses de inverno no Paraná, considerando que o regime hidrológico tende a ser reduzido nessa estação. Essa diminuição impacta a eficiência das usinas hidrelétricas, como a de Itaipu, e pode levar a um aumento no custo da energia elétrica. No entanto, durante esse período, os ventos se tornam mais intensos e sua densidade aumenta cerca de 2%, facilitando o movimento das pás dos geradores eólicos e potencializando sua capacidade de geração de energia (COPEL2024).

Para utilizar os ventos como fonte de energia, é crucial realizar uma previsão precisa da velocidade do vento. É necessário analisar sua variação ao longo do dia, das estações do ano e com a altitude, pois a identificação do potencial eólico de uma região é uma etapa essencial no desenvolvimento de um projeto eólico. Parques eólicos com fundações fixas são geralmente instalados em águas rasas, com profundidades que variam entre 30 e 60 metros, localizados a uma distância crescente da costa, frequentemente em torno de 70 quilômetros. Além disso, suas localizações devem ser planejadas de modo a não interferir nas rotas regulares de navegação, em instalações estratégicas ou em zonas de importância ecológica. Esses parques podem cobrir áreas superiores a 300 km².

4.1 FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DO PROJETO

O desenvolvimento de um projeto precisa ser extremamente planejado para que sua execução seja realizável e viável. Uma ferramenta útil será o fluxograma apresentado na Figura 5, cujas etapas devem ser seguidas durante o projeto.

Figura 5 - Fluxograma de Etapas do Projeto.



Fonte: (Autora, 2025).

O fluxograma dará as diretrizes para a viabilidade do projeto, começando em procurar um estudo de caso para que as etapas possam ser identificadas e assim tomadas às decisões do profissional, sendo cada etapa descrita neste capítulo.

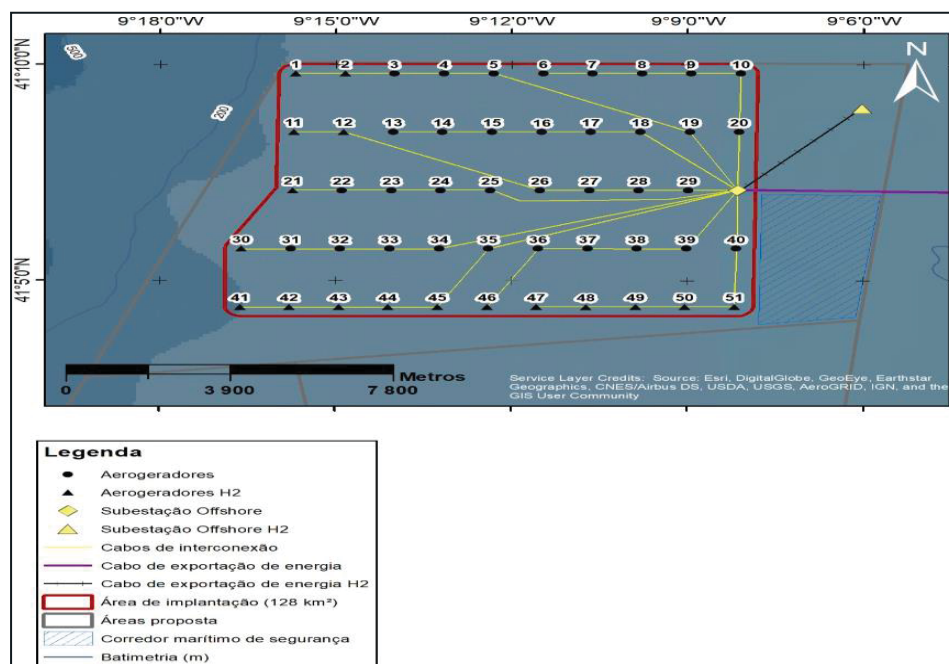
A etapa seguinte descrita é a localização da escolha do local e principalmente se existe a velocidade do vento mínima para o funcionamento dos aerogeradores, se a resposta for afirmativa será necessário fazer o cálculo de potência dos aerogeradores, caso negativo, será feito um novo levantamento de local para a instalação do parque eólico. Na sequência, é feita a viabilidade econômica do projeto e começar a fazer as simulações das curvas de Weibull, que confirmarão a viabilidade e por fim analisar os resultados.

4.2 DEFINIÇÕES DE UM PROJETO PARA ESTUDO DE CASO

O estudo de caso analisado foi o parque eólico Âncora ao largo de Leixões-Vila Nova de Gaia em Portugal. O projeto foi escolhido para análise por apresentar todas as fases necessárias para sua implantação, inclusive as etapas de licenciamento ambiental.

O projeto estudado incluía, em mar aberto, uma rota para os cabos elétricos de exportação de energia, cuja área calculada foi de aproximadamente 41 km² e que se situava a partir da orla marítima até o local de instalação, sendo que o total da área utilizada era de aproximadamente 128 km². A estrutura das instalações compreende 51 aerogeradores de 15 MW cada, no total de 765 MW, conforme Figura 6.

Figura 6 - Disposição dos aerogeradores no parque eólico Âncora.



Fonte: ABRAMIC, 2023.

O *layout* dos aerogeradores foi determinado para uma quantidade de 4,76 MW/km² sendo estabelecida uma potência total unitária de 15 MW, conforme especificado no projeto. Assim, estipulou-se que os aerogeradores ficariam distantes de 2,5 km entre si. O parque conta ainda com uma subestação (SEO), localizada na extremidade do mesmo, a aproximadamente 40 km do ponto de conexão em terra. A SEO foi conectada a 6 fileiras, cada uma com 6 aerogeradores, e a outras 3 fileiras com 5 aerogeradores. Esta subestação possui um cabo de exportação que leva a energia até a costa, onde está ligado a um Posto de Corte em terra, que, por sua vez, será conectado à Subestação de Energia (SET) e da Rede Elétrica Nacional (REN) em solo.

Para transportar essa energia, reduzir ao máximo as perdas e otimizar a eficiência no transporte, tornou-se indispensável elevar a tensão utilizada. Na SEO

representada na Figura 7, prevista para a exportação a partir de um cabo de 220 kV em direção ao continente, optou-se por uma solução tecnológica baseada em fundações do tipo *jacket*. Esse tipo de SEO possui duas partes distintas: a seção superior, chamada *topside*, e a parte inferior, que corresponde à fundação composta por uma estrutura em treliça, cuja função principal é dar suporte ao *topside*.

Figura 7– Subestação eólica -SEO.



Fonte: ABRAMIC, 2023.

4.3 LOCALIZAÇÃO DO PARQUE EÓLICO DO ESTUDO.

Para a definição da localização do Projeto, torna-se imprescindível realizar análises detalhadas sobre o enquadramento da área de concessão de exploração (MARQUES, 2021). A escolha do local destinado à instalação do parque eólico é baseada nas áreas indicadas pelo relatório do *Global Entrepreneurship Monitor* (GEM), que é a principal referência mundial sobre empreendedorismo. Esse estudo abrange a evolução do empreendedorismo em diversos países e permite identificar os fatores críticos que incentivam ou dificultam as iniciativas empreendedoras, especialmente no contexto das áreas destinadas a projetos de energia renovável marinha.

A instalação de aerogeradores no mar demanda a execução de estudos aprofundados, não apenas para compreender melhor as características específicas da área selecionada para o parque eólico, mas também para mitigar riscos e evitar acidentes decorrentes da implantação em terrenos que não suportem adequadamente

esse tipo de infraestrutura. Por isso, foi indispensável investigar detalhadamente as condições da região.

As planícies litorâneas do Paraná têm sua formação geológica vinculada às oscilações do nível relativo do mar ao longo do tempo (eustasia), estendendo-se desde a base da Serra do Mar até o Oceano Atlântico. Elas possuem cerca de 105 km de comprimento e uma largura máxima de aproximadamente 55 km na região da Baía de Paranaguá. Essas planícies são profundamente cortadas pelas baías de Paranaguá e Guaratuba, geralmente apresentando altitudes inferiores a 20 metros acima do nível do mar, embora possam alcançar até 30 metros mais ao interior, na área do município de Morretes. Sua origem está diretamente relacionada às variações no nível relativo do mar ocorridas nos últimos milhares de anos.

A configuração atual do sistema natural resulta de processos ocorridos sobre o embasamento cristalino, com destaque para as variações do nível relativo do mar durante o período Quaternário. Esses processos deram origem, principalmente, a planícies arenosas de natureza fluvial e marinha, distribuídas em diferentes altitudes. É importante ressaltar que a planície litorânea apresenta dois compartimentos bem distintos: nas áreas próximas à Serra do Mar, predomina a formação por sedimentos mais argilosos, decorrentes do desgaste das montanhas; já nas proximidades do Oceano Atlântico, a planície é composta, em sua maior parte, por sedimentos arenosos de origem marinha (PESSANHA; MELO; ALMEIDA, 2022).

Neste caso específico, foi levado em conta o potencial eólico da área, as características físicas, biológicas e socioeconômicas da região, os condicionantes presentes na área de instalação e seu entorno, além da localização dos pontos de conexão com a infraestrutura elétrica já existente. Paralelamente, buscou-se minimizar ao máximo possível impactos em outras atividades marítimas e considerar a proximidade de grandes consumidores de eletricidade para facilitar os trabalhos relacionados à implementação deste parque eólico.

No município de Pontal do Paraná, o solo predominante é o tipo puxou, que se concentra no horizonte B e apresenta baixa drenagem. De maneira geral, os solos litorâneos do Paraná são muito porosos, altamente permeáveis, bem drenados e possuem grande profundidade. Esses solos são formados por diversos fatores, incluindo o clima, o material de origem, o relevo, a ação dos organismos e o tempo geológico (De Salles, 2022).

Os aerogeradores serão instalados dentro do parque eólico, mantendo-se afastados da costa. No âmbito terrestre, está planejada a implantação de um Posto de Corte o mais próximo possível da linha costeira. Esse posto será responsável por receber o cabo de exportação vindo do parque eólico e realizar a transição para uma subestação terrestre (SET) que integrará a rede elétrica. Contudo, as localizações exatas do Posto de Corte e da subestação da rede elétrica ainda não podem ser determinadas, pois dependem da definição e aprovação dos novos pontos de acesso e conexão à rede elétrica (De Salles, 2022).

É fundamental analisar a importância da região que abriga áreas de conservação ambiental, como o Parque Nacional de *Saint-Hilaire/Lange* (PNSHL). Esta unidade de conservação de proteção integral está localizada nos municípios de Matinhos, Guaratuba, Morretes e Paranaguá, e é gerenciada pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). Com uma extensão de 25.000 hectares, o parque desempenha um papel crucial na proteção de um dos trechos mais bem preservados da Mata Atlântica no Brasil, abrangendo parte da Serra do Mar paranaense conhecida como “Serra da Prata”.

Seus ecossistemas variam desde áreas situadas a 10 metros acima do nível do mar até montanhas que superam os 1.400 metros de altitude. Isso oferece um rico conjunto de ambientes que incluem formações de Floresta Ombrófila Densa em diferentes estágios: submontana, montana, alto-montana e campos de altitude. Além de sua relevância ambiental, o parque serve como refúgio para diversas espécies de flora e fauna ameaçadas de extinção, reforçando sua importância para a conservação da biodiversidade (EMBRAPA, 2024).

A Serra da Prata possui ampla disponibilidade hídrica, responsável por alimentar diversos mananciais superficiais que fornecem água de alta qualidade para grande parte da população que vive na região litorânea do Paraná. O Parque, em seu perímetro, está situado na área-núcleo da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica reconhecido pela UNESCO, sendo uma área de destaque para a preservação de aves e incluída nas Áreas Prioritárias para a Conservação da Biodiversidade, conforme definido pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA). Além disso, faz parte da área tombada da Serra do Mar em âmbito estadual e integra a Área de Proteção Ambiental (APA) Estadual de Guaratuba.

O Parque é uma área de alta fragilidade ambiental, marcada por extensos deslizamentos de solo e pedras que ocorreram no início de 2011 em função das chuvas intensas e prolongadas. Nos arredores, encontram-se inúmeras propriedades rurais dedicadas à agricultura e à piscicultura, além de áreas impactadas por intensa pressão urbanística, como balneários, e econômica, incluindo locais destinados a projetos governamentais nas áreas de transporte, mineração, entre outros. Localizado a menos de 100 km de Curitiba, o principal acesso ao Parque se dá pela BR-277, que liga Curitiba a Paranaguá. Sua Sede Administrativa está situada no sul do Parque, na cidade de Matinhos/PR, e pode ser acessada pela PR-508, conhecida como rodovia Alexandra–Matinhos (EMBRAPA, 2024).

4.4 DOCUMENTAÇÃO E SELEÇÃO DO LOCAL PARA A INSTALAÇÃO DOS AEROGERADORES.

Para o início do projeto, é indispensável a elaboração de um Plano de Dados Abertos (PDA), que serve como instrumento para planejar a disponibilização e manutenção de dados abertos nas organizações públicas, com validade de dois anos. Esse plano inclui o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) do projeto, desenvolvido em conformidade com as legislações pertinentes. A construção de um parque eólico, sendo um processo complexo, demanda várias etapas definidas com precisão de acordo com o projeto (MARQUES, 2021).

Em primeiro lugar é necessária fazer uma avaliação do potencial eólico, o que acontece antes de dar início à construção. Sabendo da importância de se fazer uma análise do potencial eólico do local, já que esse estudo envolve o estudo da velocidade e da regularidade dos ventos, fazendo-se indispensáveis para definir a viabilidade do projeto.

Em segundo lugar é feito o projeto e o planejamento, sendo feita a partir dos dados obtidos na avaliação eólica, os responsáveis desenvolvem o planejamento da localização dos aerogeradores, dando ênfase a uma otimização da eficiência energética e à integração de fatores ambientais, sabendo que um dos objetivos da avaliação é que o parque seja construído de forma sustentável.

O licenciamento ambiental e as autorizações que antecedem a realização do projeto analisam os impactos ambientais e tentam garantir que as regulamentações

sejam cumpridas. O objetivo desses estudos é a de que a construção do parque eólico seja concluída de maneira eficiente, tentando reduzir ao máximo os impactos negativos.

A infraestrutura civil especifica que os acessos e as fundações dos aerogeradores no local devem ser feitos de maneira eficaz e responsável, representando uma necessidade de projeto específico para essa etapa do processo. Como estrutura extremamente importante, as fundações devem ser desenvolvidas para conseguir sustentar as turbinas eólicas, garantindo estabilidade e resistência em longo prazo;

As instalações dos aerogeradores devem ser feitas de maneira estratégica, com cada unidade colocada de maneira a captar a maior quantidade de vento. Todo esse processo deve abranger a montagem dos aerogeradores e a sua conexão ao sistema elétrico, garantindo que haja eficiência esperada do parque eólico.

A supervisão e a regulamentação de parques eólicos e usinas geralmente estão sob a responsabilidade de órgãos governamentais específicos, variando conforme a jurisdição. É comum que agências voltadas para o meio ambiente e energia assumam esse papel. No Brasil, por exemplo, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) desempenham funções fundamentais na regulamentação e no monitoramento dessas iniciativas.

4.5 A CONSTRUÇÃO DE UM PARQUE EÓLICO ENVOLVE UMA VARIEDADE DE EQUIPAMENTOS ESPECIALIZADOS:

O autor MARQUES (2021) cita que para o desenvolvimento de um parque eólico são necessários diversos equipamentos técnicos e cita os indispensáveis. Começando pelas turbinas eólicas, essas devem ser as mais modernas em relação à eficiência energética e devem ser projetadas para maximizar a conversão de energia eólica em eletricidade, salienta que essas turbinas apresentam em diferentes tamanhos e modelos e devem ser adquiridas conforme as características eólicas do local.

Na sequência, o autor expõe que os guindastes utilizados para a instalação das turbinas eólicas têm a função de movimentação dos componentes pesados e que

os equipamentos de elevação devem garantir uma montagem segura e eficiente. Comenta que os veículos de transporte especializados devem ser utilizados na instalação do parque, já que as enormes pás das turbinas eólicas e outros componentes de grandes dimensões os requerem.

Para MARQUES (2021), em resumo, afirma que a criação de um parque eólico representa um grande desafio, requerendo um planejamento sério e detalhado, devendo ser feitas análises e cooperação entre diversos setores governamentais e privados envolvidos. Pois, além de ser uma fonte alternativa sustentável de energia, os parques eólicos também desempenham um papel específico na diminuição das emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa.

Para a definição da Localização do Projeto, conforme aponta o autor (De Salles, 2022), alguns critérios indispensáveis precisam ser atendidos, expõe a necessidade de que haja o enquadramento da área de concessão de exploração dentro do Mapa Eólico do Estado do Paraná, salienta a necessidade de identificação de locais que são sensíveis e estão situados próximos do local de implantação e da sua representação cartográfica. Define que a conformidade do projeto deve estar integrada com os instrumentos de gestão territorial, sabendo-se que existem restrições dentro do espaço marinho e da comunidade local. Descreve também que a área de implantação envolve diretamente diversos condicionantes impeditivos.

O autor faz a caracterização do projeto e aborda que devem seguir conforme cronograma as seguintes orientações: a descrição dos objetivos e justificação do projeto, especificando o motivo da sua implantação deve ser feita; a descrição do projeto, incluindo os principais processos tecnológicos envolvidos, salientado quais as tecnologias devem ser adquiridas para a implantação mais eficiente; a identificação das principais ações associadas às fases de construção, exploração e desativação, pois por regulamentação todas as etapas devem ser seguidas de forma responsável, sempre focando na menor degradação do ambiente e da comunidade a ser atingida. Identifica também que os tipos de materiais a serem utilizados ou produzidos para o desenvolvimento do projeto devem estabelecer critérios específicos de normas técnicas e regulamentação; faz também a identificação dos principais tipos de efluentes, resíduos e emissões previsíveis, nas várias fases da instalação do projeto, já que afetam diretamente a região ecológica.

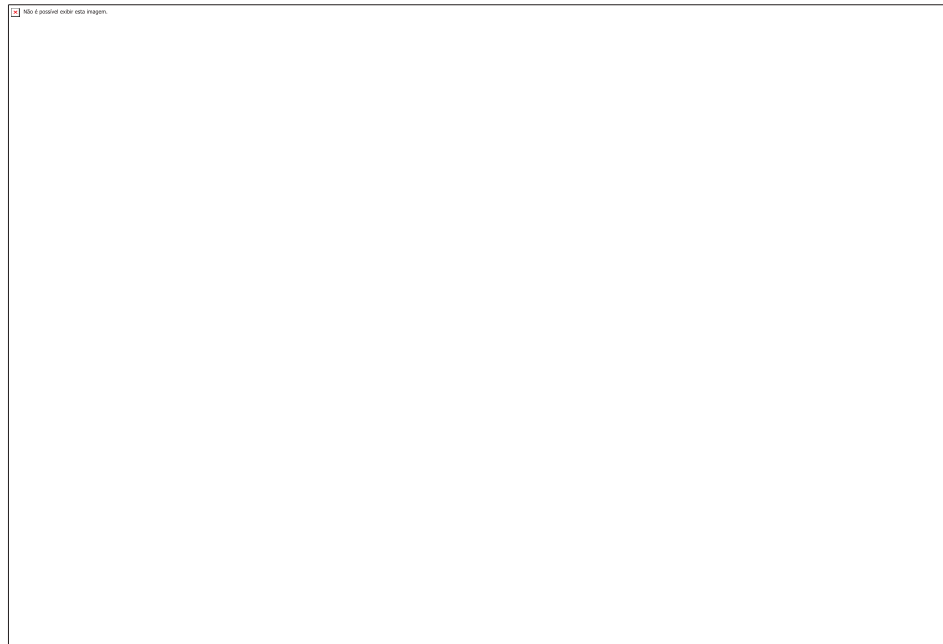
Avalia que a indicação de projetos associados ou complementares que abrangem toda a instalação do projeto deve ser feita por órgãos que estejam regulamentados e que tenham sua competência específica para desenvolver essa análise. Informa que a programação temporal das fases de construção, exploração e desativação e sua relação com o regime de licenciamento ou de concessão devem ser regidas e verificadas a cada etapa da instalação.

Conforme (MARQUES, 2021), a proposta metodológica para a análise das alternativas da instalação da estrutura deve atender a identificação do tipo de alternativas que o projeto prevê e equacionar ao nível da sua localização, dimensão, concessão, técnicas e processos de construção, operação e manutenção e desativação, e da calendarização das diferentes fases.

Apresenta também que a identificação de questões significativas, em que as ações ou atividades associadas às fases de construção, exploração e desativação, com potenciais impactos significativos devem apresentar os meios de mitigação para o desenvolvimento sustentável do projeto. Afirma também a importância da hierarquização dos descritores ambientais e dos potenciais impactos, já que esses devem ser estudados desde a primeira etapa, fazendo a identificação dos aspectos que possam constituir condicionantes. E finalmente, com extrema importância e total condicionante será a identificação das populações e de grupos sociais potencialmente afetados diretamente pela instalação do parque eólico.

Outro aspecto relevante é que a região possui elevados níveis de biodiversidade e abriga os últimos fragmentos remanescentes da vegetação original do Estado, incluindo a floresta pluvial atlântica, a mata de restinga e os manguezais. Além disso, há uma presença expressiva de avifauna e mastofauna características do Paraná, muitas das quais estão ameaçadas de extinção no bioma da Mata Atlântica, conforme Figura 8.

Figura 8- Reserva de Mata Atlântica no litoral do Paraná.



Fonte: (ICMBio, 2025)

O Lagamar, conhecido como Complexo Estuarino Lagunar Iguape-Paranaguá e englobando também uma parte do litoral sul de São Paulo, destaca-se por sua deslumbrante riqueza de manguezais bem preservados. Reconhecido pela União Internacional para a Conservação da Natureza (UICN), é considerado um dos mais importantes ecossistemas costeiros do mundo em relação à sua produção primária (DE ALMEIDA DE SOUZA, 2016).

Nas regiões Leste e Sul do litoral, localizam-se o Conjunto Estuarino Lagunar de Pontal do Paraná e Guaratuba, áreas ricas em manguezais e de alta importância ecológica. Essa diversidade biológica, fundamental para pesquisas e esforços de conservação dos recursos naturais regionais, aliada às crescentes condições de balneabilidade das praias e à ampla disponibilidade de áreas propícias ao turismo, torna o local alvo constante de pressões pelo desenvolvimento econômico. Essa situação se intensificou especialmente após a divulgação das reservas nacionais de petróleo no Pré-Sal, gerando uma sobreposição dos interesses locais em relação às prioridades do Estado e da Nação (DE ALMEIDA DE SOUZA, 2016).

4.6 VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO

No estudo da velocidade do vento no litoral paranaense, o autor (ARAGÃO ET al., 2019) destaca que o local possui uma densa cobertura vegetal, composta por árvores de porte médio e arbustos. Entre as espécies que integram essa vegetação, são mencionados os gêneros *Pisidium*, *Pithicolobium*, *Dodoneas* e *Erythrexylon*.

O autor destaca que, no Paraná, os sedimentos eólicos ocorrem ao longo de praticamente toda a costa, mesmo sem formar grandes feições. Esses sedimentos dão origem a cordões paralelos à linha costeira, que podem se estender por mais de 15 km em alguns casos. A largura dessas formações varia entre 20 e 80 metros, podendo alcançar mais de 250 metros em certos trechos. A altura geralmente se mantém abaixo de 6 metros em relação ao nível da planície, sendo mais comuns elevações entre 3 e 5 metros. Uma exceção notável são as dunas localizadas na Ilha do Mel, entre os morros Bento Alves e do Meio, que, devido ao seu posicionamento sobre um terraço elevado de cerca de 6 metros, chegam a atingir mais de 20 metros acima do nível do mar. O cordão seguinte, mais próximo do mar, apresenta menor altura em comparação ao anterior, predominando entre 3 e 4 metros. Longitudinalmente, esses cordões assumem uma forma mais sinuosa, com frequentes concavidades voltadas para o lado de barlavento e interrupções em vários trechos. A vegetação é menos densa e menos desenvolvida que a dos cordões mais internos, sendo distribuída de forma irregular.

Afirma (ARAGÃO ET al., 2019) que na face de sotavento ocorrem pequenas árvores e arbustos, formando uma cobertura contínua e na face de barlavento, ao contrário, existem áreas com vegetação arbustiva e herbácea rala e até ausente.

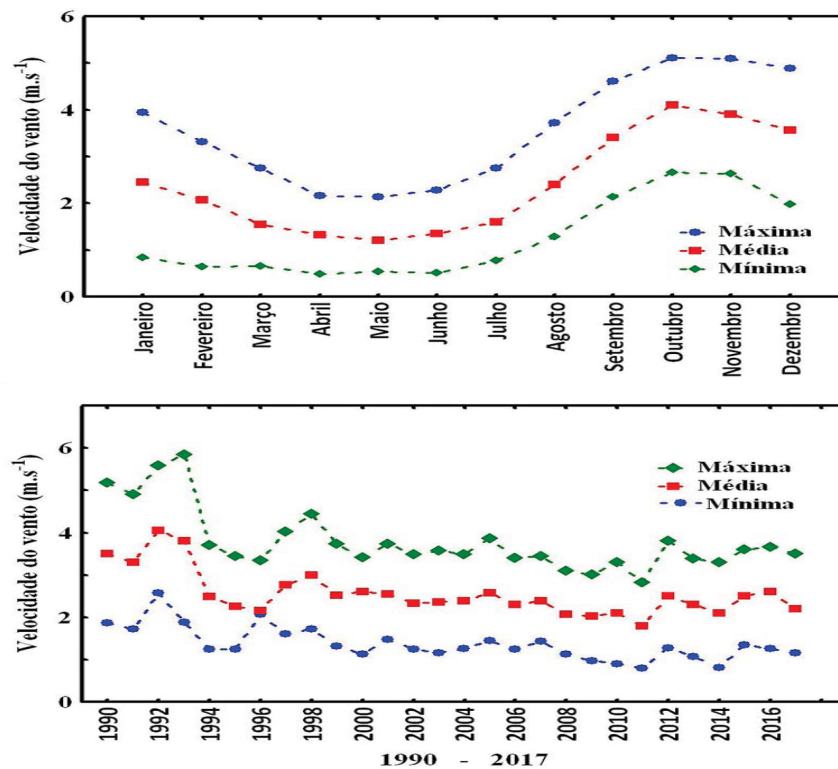
Situando-nos em relação a seus estudos sobre as características da velocidade e direção dos ventos, os autores (VITERBO ET AL, 2018) salientam como é imprescindível para os setores da sociedade, sob aspecto ambiental e econômico a necessidade de avaliar o regime dos ventos em multiescala (anual, mensal e horária) no município de Pontal do Paraná (PR). Os autores utilizaram os dados horários (12, 18 e 0 TMG), expressão que no contexto de meteorologia refere-se à direção do vento, onde:

- 12: Indica a direção do vento em graus; correspondendo ao Nordeste.
- 18: Indica a direção do vento em graus, correspondendo ao Sudeste;

- 0: Indica a direção do vento em graus, correspondendo ao Norte.

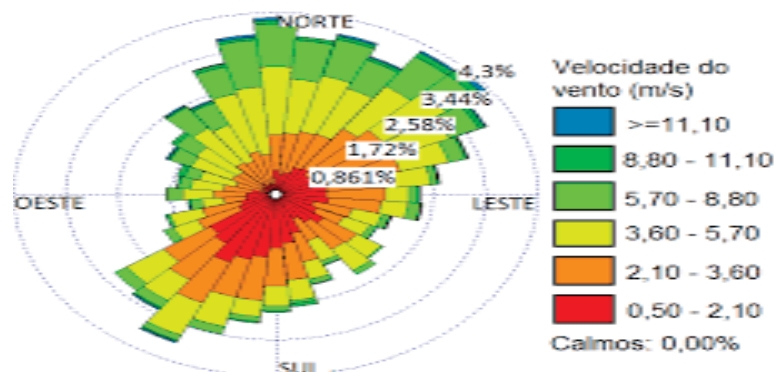
A direção do vento é medida em graus, com 0 graus sendo Norte e 90 graus Leste. As indicações 12, 18 e zero TMG referem-se às direções do vento em diferentes alturas ou locais das estações meteorológicas de 1976 a 2017. A Figura 9 apresenta o histograma, e a Figura 10 mostra a rosa dos ventos, ambos simulados pelo programa WRPLOT versão 8.0.0.

Figura 9- Gráfico da velocidade dos ventos ($m.s^{-1}$) em Pontal do Paraná.



Fonte: (KEMENES, 2018).

Figura 10- Rosa dos ventos ($m.s^{-1}$) em Pontal do Paraná.



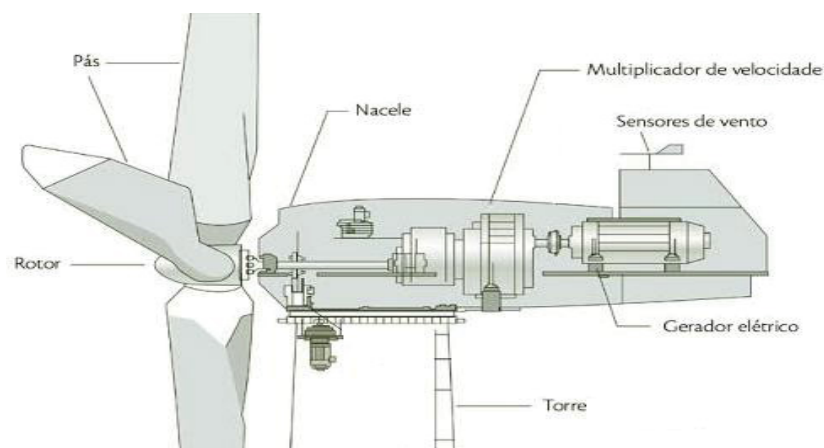
Fonte: (KEMENES, 2018).

A pesquisa revelou que os ventos predominantes são de nordeste (18,5%) e leste (15,2%) devido à Alta Subtropical do Atlântico Sul. Em Paranaguá, os ventos de sul (15,3%) são mais frequentes, influenciados pelo relevo e pela brisa marítima. A velocidade média anual dos ventos foi 2,19 m/s em Curitiba e 2,15 m/s em Paranaguá, com maiores velocidades entre setembro e março. O aumento da velocidade dos ventos ocorre às 15 horas, especialmente em Paranaguá.

4.7 POTÊNCIA DO VENTO

A potência de entrada de um aerogerador eólico, Figura 11, é obtida convertendo-se a força do vento em um binário atuando sobre as pás do rotor. A quantidade de energia transferida ao rotor pelo vento depende da densidade do ar, da área abrangida pelo círculo desenvolvido pelas pás do rotor e da velocidade do vento (MARTINS ET al., 2010).

Figura 11– Aerogerador- parte técnica.



Fonte: (Portal Eólico, 2024).

A expressão da energia cinética contida na massa de ar em movimento é expressa pela Equação (1):

$$E = \frac{1}{2} * m * V^2 \quad (1)$$

Onde:

- m é a massa do fluido, em kg;
- V é a velocidade do vento, em m/s.

A potência do vento pode ser descrita pela Equação (2), abaixo representada:

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

Onde:

- P = Potência do vento (W);
- ρ = Densidade do ar no local (kg.m^{-3});
- A = Área varrida pelas pás do rotor (m^2);
- V = Velocidade do Vento (m.s^{-1}).

Para a análise das turbinas eólicas, são consideradas a energia anual gerada, a Equação (3) e para o fator de capacidade, dado na Equação (4).

$$EAG = \sum P_i * f_i * T \quad (3)$$

$$FC = \frac{EAG}{P_N * T} \quad (4)$$

Onde:

- P_i é a potência produzida por uma turbina (obtida pela curva característica da máquina, dada pelo fabricante) submetida à velocidade i na altura do eixo da turbina, em kW;
- f_i é a frequência desta velocidade;
- T é o tempo em horas (8760h por ano);
- P_N é a potência nominal da turbina, em kW.

Para o projeto de um parque eólico, utiliza-se a Equação (5) para avaliar a energia anual gerada em um estudo preliminar:

$$EAG_{Total} = n * FC * P_N * \eta_e * \eta_d \quad (5)$$

Onde:

- n sendo o número de turbinas;

- η_e a eficiência global do parque;
- η_d o fator de disponibilidade.

A velocidade do vento varia com a altura em relação à superfície, conforme o perfil de velocidades da camada limite atmosférica. Utilizando medições realizadas a uma altura de referência, é possível avaliar a velocidade do vento em qualquer altura empregando a Equação (6), para uma superfície plana e sem efeitos térmicos relevantes.

$$V_h = V_{ref} * \frac{\ln \frac{h}{z_0}}{\ln \frac{h_{ref}}{z_0}} \quad (6)$$

Onde:

- h_{ref} é a altura onde foram realizadas as medições, em m;
- V_{ref} é a velocidade em h_{ref} , em m/s;
- h é a altura desejada, em m;
- z_0 é a altura de rugosidade do solo, em m.

Com essas equações sendo resolvidas, será possível encontrar valores da curva de Weibull para comparar com as simulações computacionais e assim encontrar uma margem de erro entre o calculado e o simulado. Esses resultados conseguem mostrar a viabilidade técnica e após a confirmação dessa metodologia poder questionar se a viabilidade financeira será alcançada também.

Em posse desses estudos, tornará possível a inicialização do projeto e iniciará os contatos com os órgãos governamentais: federais estaduais e municipais para dar sequência de instalação.

4.8 RENDIMENTO DE BETZ

O físico alemão Albert Betz definiu, no ano de 1919, o que hoje é denominada Lei de Betz, que somente foi publicada no seu livro *Wind Energie*, em 1926. A Lei de Betz demonstra que quando o vento passa pela turbina eólica, o rotor diminui a velocidade do vento, absorvendo sua energia cinética e transformando-a em energia mecânica necessária para provocar a rotação do rotor. Isso significa que o vento se

desloca com maior velocidade antes de chegar à turbina do que após passar por ela (MORAES, 2018).

Betz provou ainda que a velocidade com que o vento efetivamente passa pelo rotor é a média entre a velocidade que chega e a velocidade que sai do rotor. Demonstrou ainda que, da potência total existente em uma corrente de vento, no máximo 59,3% pode ser efetivamente aproveitada, já que a restante é perdida ao passar pela turbina. Este valor é chamado de *Rendimento Limite de Betz*, que indica o valor máximo do rendimento que uma máquina eólica pode atingir. Assim, este aproveitamento máximo ocorre quando a velocidade que sai da turbina é igual a 1/3 da velocidade que entra. Utilizando a Equação 7, a fórmula geral para o cálculo da potência (W) de um aerogerador passa a ser:

$$P = \frac{1}{2} * cp * n * \rho * A * V^3 \quad (7)$$

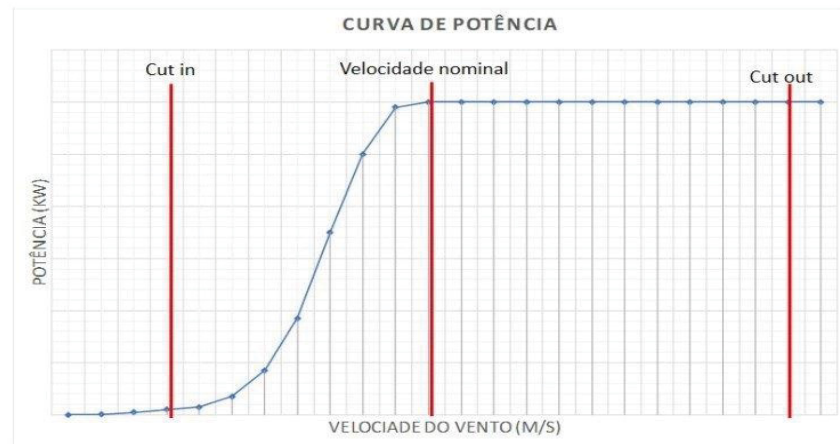
Onde:

- cp= Coeficiente de potência de Betz;
- n = Eficiência eletromecânica.
- ρ = Densidade do ar no local (kg.m^{-3});
- A = Área varrida pelas pás do rotor (m^2);
- V= Velocidade do Vento (m.s^{-1}).

É importante observar que a potência do vento é proporcional ao cubo de sua velocidade, de modo que pequenos aumentos de velocidade produzem consideráveis acréscimos de potência (MORAES, 2018).

Após a massa de ar passar pelas pás do aerogerador, ocorre uma queda brusca da pressão. Esta pressão eleva-se novamente até o valor original após a turbina eólica. A Figura 12 mostra a curva de potência de um aerogerador quando atinge a velocidade nominal do vento e sua estabilização.

Figura 12- Curva de potência de um aerogerador típico.



Fonte: (Portal Eólico, 2024).

4.9 DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DE WEIBULL

A distribuição estatística de *Weibull* foi desenvolvida na década de 1930 pelo físico sueco *Wallodi Weibull* (DALMAZ ET al., 2007). A distribuição de *Weibull* é muito utilizada em estudos de tempo de vida de equipamentos e estimativas de falha. Para representar o regime de ventos no local, a função estatística mais adequada é a curva de distribuição de *Weibull*.

Essa distribuição de *Weibull* tem sido uma ótima ferramenta quando há necessidade de descrever as características do vento em determinadas condições, sendo empregada nos trabalhos de avaliação de potenciais eólicos. Essa função apresenta os dados coletados e retoma como o desvio padrão das análises, sendo que este resultado apresenta um parâmetro estatístico, já que gera informações sobre as imprecisões que podem ocorrer devido às velocidades previstas dentro do período de investigação dos dados (PETRY MATTUELLA, 2007). A distribuição de Weibull é dada pela Equação (8) (DE SALLES, 2014) e (DANTAS, 1997):

$$f_V = \frac{k}{c} * \frac{v^{k-1}}{c} * e^{-\frac{v^k}{c}} \quad (8)$$

Onde:

- f_v = função densidade de probabilidade;
- k = parâmetro de forma (adimensional e positivo);

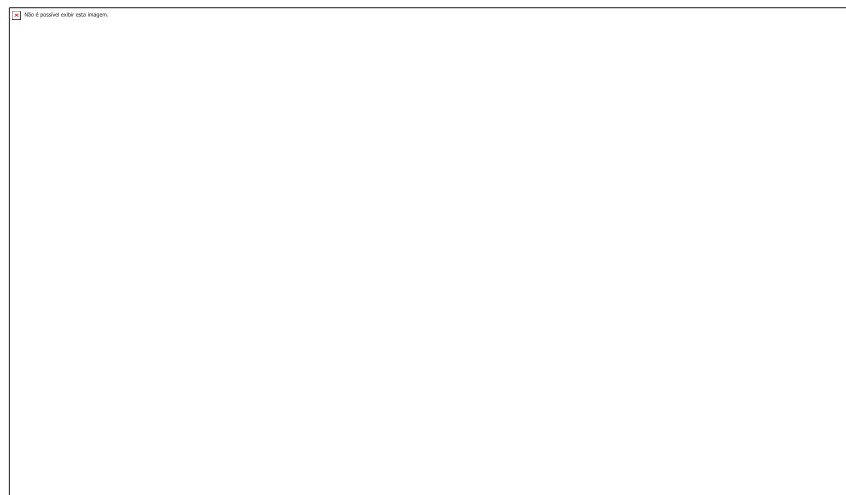
- c = parâmetro de escala (dimensão de velocidade e positivo);
- v = velocidade do vento.

Os fatores k e c são de grande importância para a avaliação das condições do local de estudo. As curvas formadas a partir dos eixos $f(v)$ e v/c indicam a influência do fator k na curva de distribuição de *Weibull* (MIRSHAWKA, 1979).

Cada fabricante cria especificações para suas várias categorias de turbinas eólicas e oferece aos seus consumidores, permitindo que eles escolham informações sobre seu projeto. Para cada caso em que um parque eólico seja montado em uma área onde a média anual da velocidade dos ventos é considerada, o engenheiro verifica as informações fornecidas e assim opta por instalar dispositivos que funcionem de maneira mais eficiente.

A curva de potência de um aerogerador é um gráfico que define qual será a potência elétrica disponível no equipamento para uma determinada velocidade de vento, conforme Figura 13.

Figura 13- Curva do Coeficiente de potência do aerogerador.



Fonte: Adaptado de: (BARRA, 2022).

Essa curva é importante para avaliar o desempenho do aerogerador. A potência começa em zero em baixas velocidades, aumenta com a velocidade do vento, alcança um máximo e depois diminui ou se estabiliza.

A representação da potência elétrica gerada em função da velocidade do vento é essencial para avaliar o desempenho do aerogerador, pois permite identificar a potência disponível em diferentes condições de vento. Sendo assim, apresenta um

comportamento que se inicia com a potência zero em baixas velocidades de vento, aumenta progressivamente com o aumento da velocidade, alcança um ponto de máximo, e então diminui ou se estabiliza. Os principais parâmetros são:

- Velocidade de corte: A velocidade do vento a partir da qual a turbina eólica é desligada para proteger o equipamento;
- Velocidade nominal: A velocidade do vento na qual a turbina atinge sua potência nominal.

A análise da curva de potência permite identificar se a produção de energia está acima ou abaixo do esperado, o que pode ser crucial para a gestão e o planejamento de projetos eólicos.

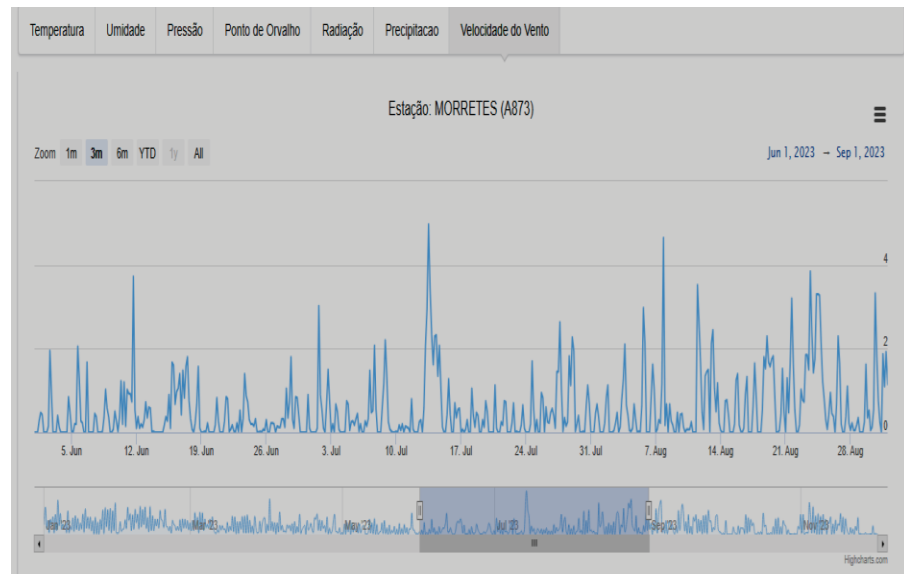
5 DADOS HISTÓRICOS DA VELOCIDADE DO VENTO E SIMULAÇÃO COM SOFTWARES COMPUTACIONAIS

Para podermos simular a velocidade dos ventos em uma determinada região é crucial o recolhimento de dados históricos através de fontes confiáveis. O Instituto Nacional de Meteorologia – INMET possui um extenso arquivo de dados históricos, desde o ano 2000, para a consulta pública, assim como os simuladores do IMPE (**Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**), do CLIMATEMPO e o *COPERNICUS DATA SCIENC*. Essas fontes foram usadas de base para o estudo de viabilidade técnica e a estação física utilizada para a coleta de dados foi a de Morretes/PR, número de referência A873.

5.1 ANÁLISE DE DADOS

As análises abrangeram um período de dois anos, exatamente de julho/2023 a setembro/2025. As Figuras a seguir apresentam a sequência de simulações em diferentes *softwares* computacionais para analisar a velocidade do vento na localização exata do projeto. A Figura 14 apresenta a simulação no site do INMET para a velocidade do vento na estação Morretes, no período de junho a agosto de 2023.

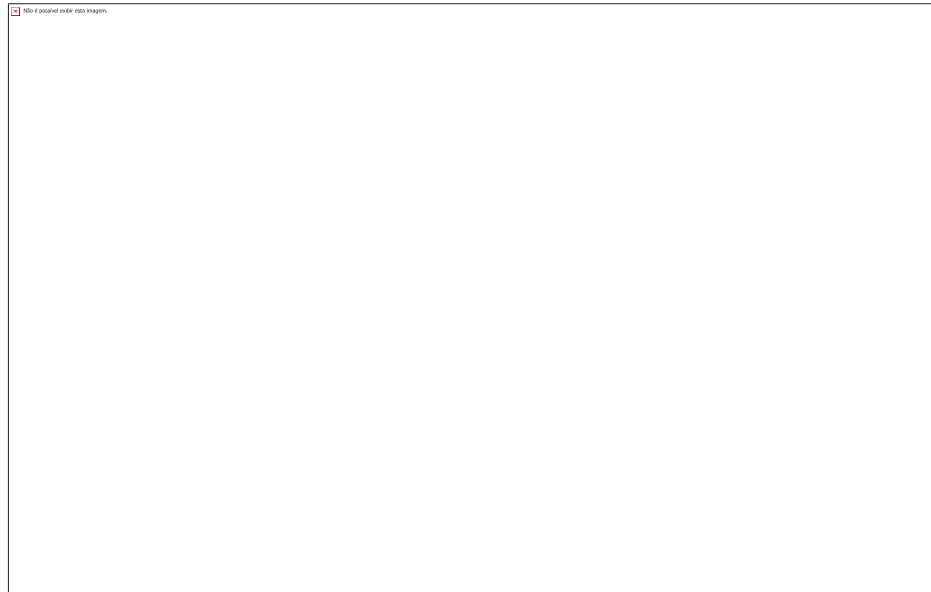
Figura 14- Análise da velocidade do vento para estação Morretes no período de junho a agosto/2023, INMET.



Fonte: (Elaborado pela autora, 2025).

Verificou-se que a velocidade do vento nesse período ficou abaixo de 3 m/s na sua maioria de tempo analisado, apenas apresentado um pico de aproximadamente 5 m/s em meados de julho/2023. A Figura 15 apresenta a coleta dos dados do período de junho a dezembro/2023, se ocorre alguma variação maior do que nos períodos anteriores.

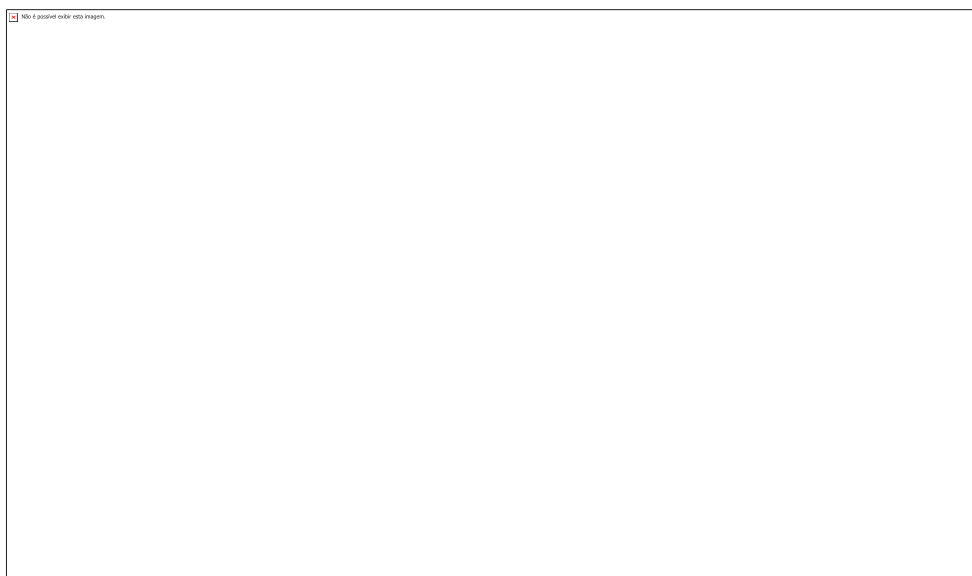
Figura 15- Análise da velocidade do vento para estação Morretes no período de junho a dezembro/2023, INMET.



Fonte: (Elaborado pela autora, 2025).

Verificado para o período citado que a velocidade do vento não ultrapassa os 4 m/s. Na Figura 16, é simulada a velocidade do vento para o mês de janeiro de 2024, ainda pelo simulador do site do INMET.

Figura 16- Análise da velocidade do vento para estação Morretes no mês de janeiro/2024, INMET.

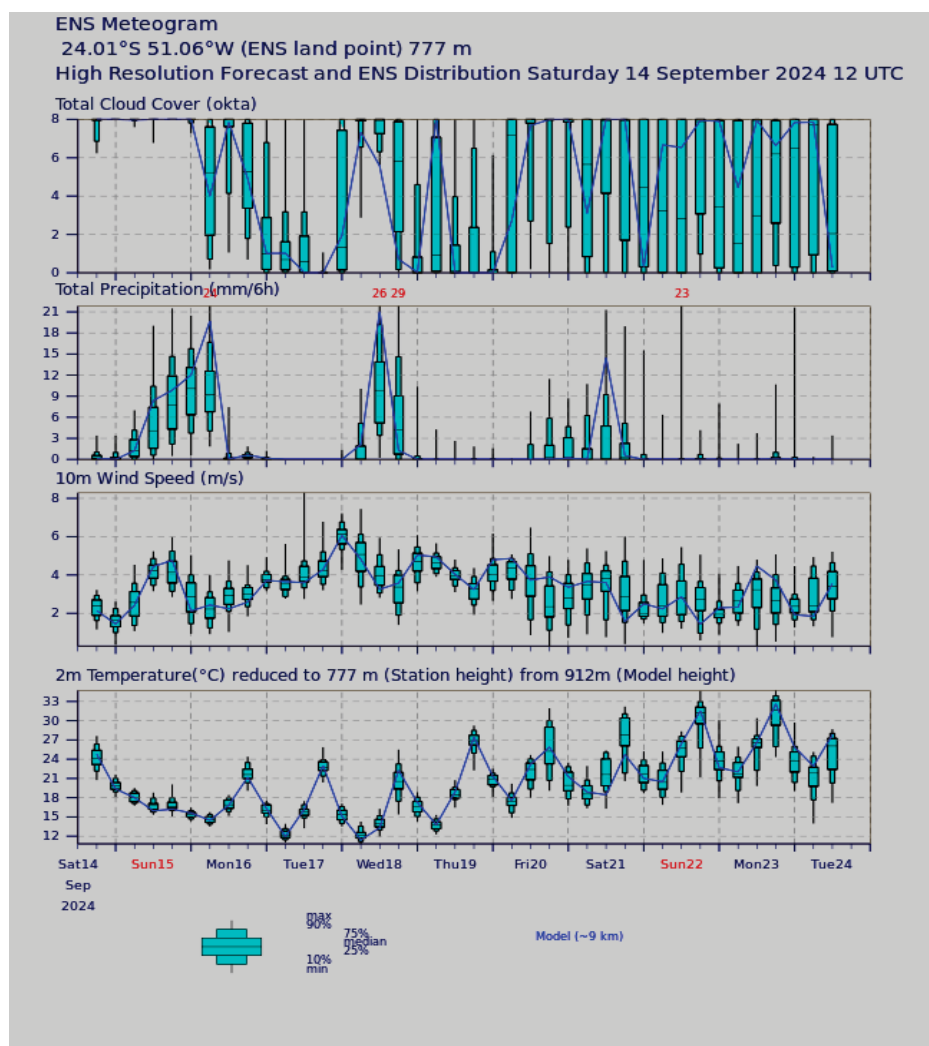


Fonte: (Elaborado pela autora, 2025).

Verificou-se apenas um pico em 09 de janeiro que quase alcançou os 6 m/s, no restante do período permaneceu abaixo de 4 m/s.

A Figura 17 apresenta a coleta de dados feita pelo *software COPERNICUS* em 14/09/2024, com análise horária, analisando vários parâmetros, como precipitação, cobertura de nuvens, velocidade do vento e temperatura para a localidade do projeto, Litoral do Paraná.

Figura 17- Velocidade do vento, precipitação e temperatura em Pontal do Paraná simulados no *software COPERNICUS* em 14/09/2024.

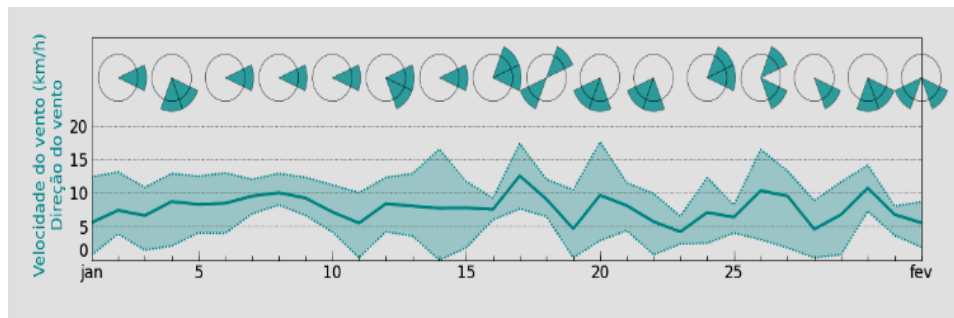


Fonte: (Elaborado pela autora, 2025).

Verificou-se para a data específica, somente no horário das 07h da manhã houve um pico de velocidade do vento em 6 m/s, em todos os outros horários a velocidade permaneceu abaixo dessa referência. A Figura 18 apresenta a análise da

velocidade do vento através do site do IMPE, testando a velocidade do vento, em km/h, para o mês de janeiro/2025.

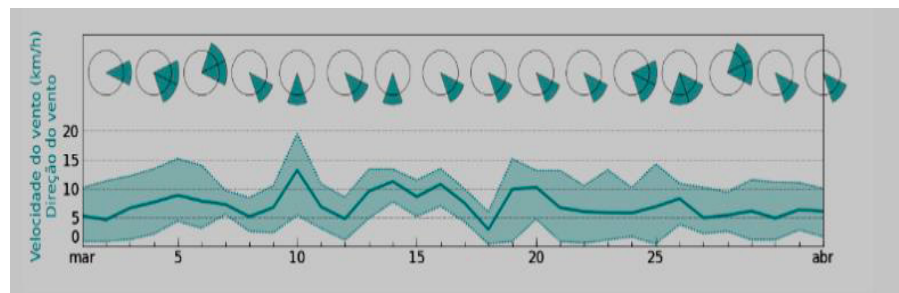
Figura 18- Análise da velocidade do vento para estação Morretes no mês de janeiro/2025, IMPE.



Fonte: (Elaborado pela autora, 2025).

Verificou-se que o único pico foi de 12 km/h, o que equivale a 3,34 m/s, no dia 17 de janeiro de 2025, os outros valores marcados ficaram bem abaixo. A mesma verificação foi feita para o mês de abril de 2025, pelo site do IMPE, conforme a Figura 19.

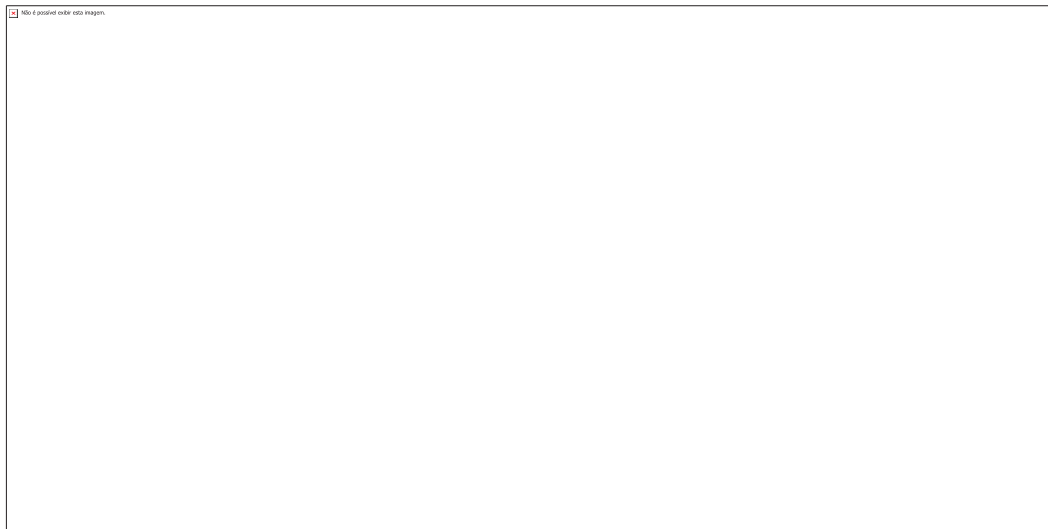
Figura 19- Análise da velocidade do vento para estação Morretes no mês de abril/2025, IMPE.



Fonte: (Elaborado pela autora, 2025).

Também foi encontrado um máximo de velocidade marcado em 11 km/h, que equivale a 3,06 m/s. Testando uma nova simulação, agora para o site do CLIMATEMPO, para verificar se havia alguma alteração, essa marcação foi feita do dia 01 a 04 de maio de 2025, conforme a Figura 20.

Figura 20- Simulação velocidade vento em Pontal do Paraná para 04/05/2025, CLIMATEMPO.



Fonte: (Elaborado pela autora, 2025).

Também foi encontrado um pico máximo de marcação no dia 02 de maio para 3,2 m/s para vento normal e 4,3 m/s para rajadas de vento. A Figura 21 mostra a simulação para os dias 05 a 07 de maio de 2025, no site do CLIMATEMPO.

Figura 21 - Condições de vento e temperatura em Pontal do Paraná para 05, 06 e 07 de maio de 2025, CLIMATEMPO.

| MON, MAY 5 | | | | | | | | TUE, MAY 6 | | | | | | | | WED, MAY 7 | | | | |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------|-----|-----|-----|-----|
| 00 | 03 | 06 | 09 | 12 | 15 | 18 | 21 | 00 | 03 | 06 | 09 | 12 | 15 | 18 | 21 | 00 | 03 | 06 | 09 | 12 |
| ↙ | ↘ | ↘ | ↘ | ↘ | ↘ | ↘ | ↘ | ↘ | ↘ | ↘ | ↘ | ↘ | ↘ | ↘ | ↘ | ↘ | ↘ | ↘ | ↘ | ↘ |
| 2.7 | 3.5 | 2.7 | 2.4 | 1.6 | 1.9 | 3.3 | 5.2 | 5.6 | 4.3 | 3.1 | 3.7 | 3.1 | 1.9 | 4.4 | 4.7 | 5.5 | 4.8 | 4.2 | 3.1 | 2.4 |
| 4.3 | 4.9 | 4.2 | 3.4 | 3.0 | 2.8 | 4.6 | 7.0 | 7.5 | 6.4 | 4.4 | 5.1 | 4.8 | 3.2 | 6.0 | 6.3 | 7.6 | 6.5 | 5.8 | 4.9 | 3.7 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| ☁ | ☁ | ☁ | ☁ | ☁ | ☁ | ☁ | ☁ | ☁ | ☁ | ☁ | ☁ | ☁ | ☁ | ☁ | ☁ | ☁ | ☁ | ☁ | ☁ | ☁ |
| 1.1 | 1.1 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.9 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 |
| 9' | 9' | 9' | 9' | 9' | 9' | 9' | 9' | 10' | 10' | 10' | 10' | 10' | 10' | 10' | 10' | 10' | 9' | 9' | 9' | 4' |

Fonte: (Elaborado pela autora, 2025).

Marcou-se 5,6 m/s em vento normal no dia 06 de maio e 7,6 m/s em vento de rajada no dia 07 de maio. Cronologicamente, avançando para o mês de julho de 2025, simulado no site do IMPE, conforme a Figura 22.

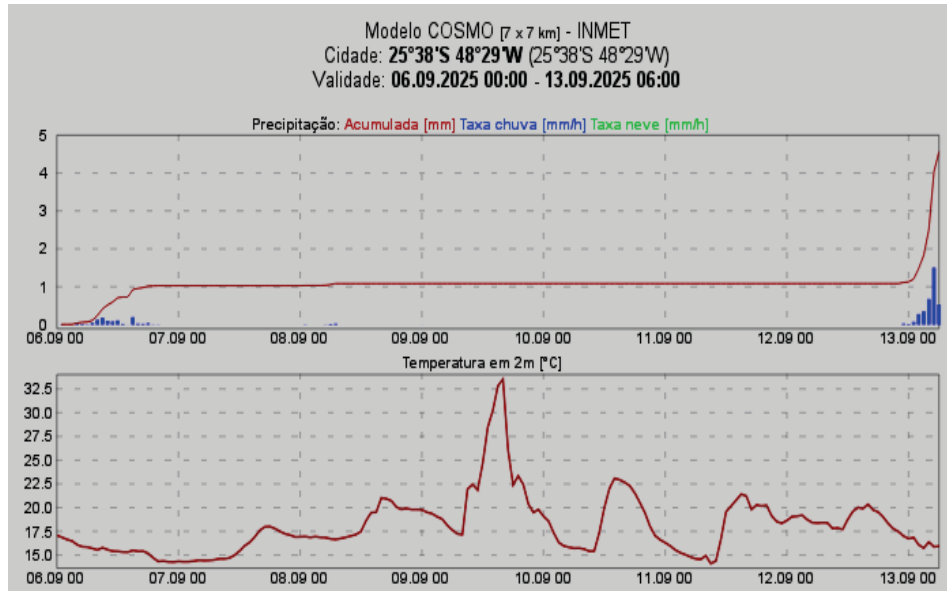
Figura 22- Análise da velocidade do vento para estação Morretes no mês de julho/2025, IMPE.



Fonte: (Elaborado pela autora, 2025).

A única data que houve algum pico foi o dia 01 de julho que marcou 18 km/h, o que significa 5 m/s, as demais marcações estavam todas abaixo da referência. A Figura 23 mostra a análise da velocidade do vento, em m/s, para a estação Morretes para os dias 06 a 13 de setembro de 2025 pelo site do INMET, analisando também a precipitação e temperatura da região.

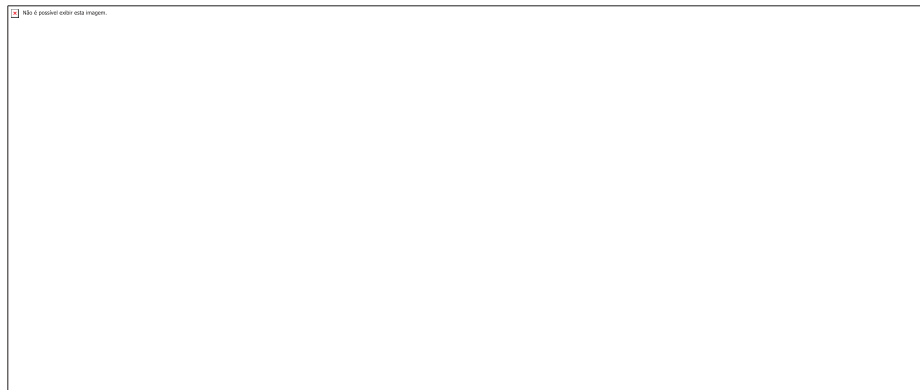
Figura 23- Análise da velocidade do vento para estação Morretes no dia 06/09/2025, INMET.



Fonte: (Elaborado pela autora, 2025).

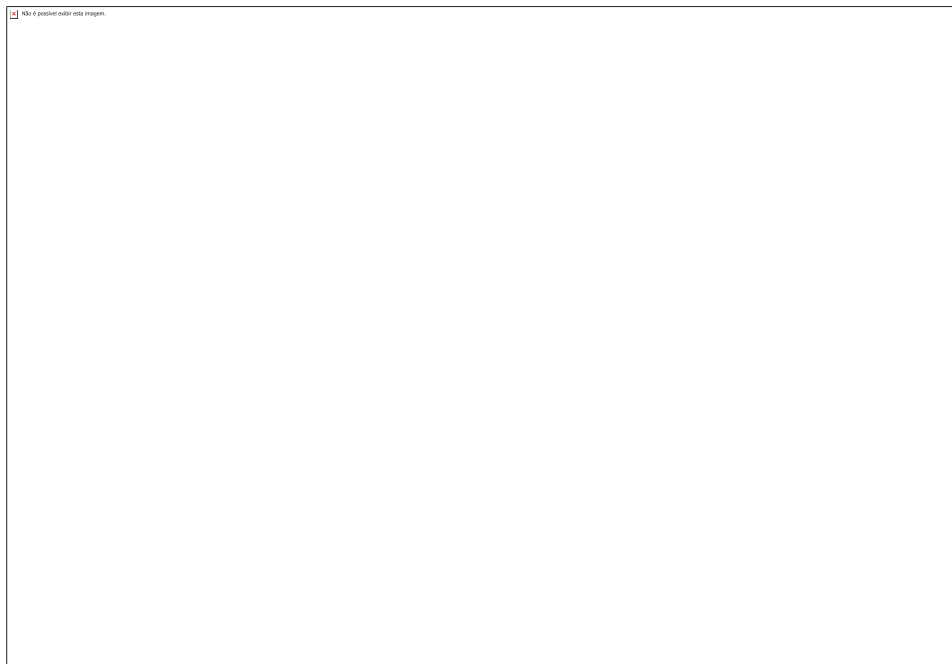
Pode-se verificar que nesse período houve picos de 10, 11 e 12 m/s, mas apareceram em forma de exceção. As Figuras 24 e 25 apresentam a simulação para os meses de maio e setembro de 2025 para identificar a viabilidade de instalação do projeto, usando como local de leitura dos dados Pontal do Paraná no aplicativo *Windy* e *Meteoblue*.

Figura 24- Mapa do Litoral do Paraná pelo aplicativo Windy.



Fonte: Aplicativo *Windy*, 2025.

Figura 25- Mapa do Litoral do Paraná pelo aplicativo Meteoblue.



Fonte: Aplicativo *Meteoblue*, 2025.

No Litoral do Paraná, a velocidade média horária do vento não varia muito ao longo do ano, situando-se em torno de 2,00 m/s, embora possa haver picos em novembro com cerca de 3 m/s e meses mais calmos em junho com 3,36 m/s.

Com todas essas simulações, verificou-se que em raríssimos momentos a velocidade do vento no Litoral do Paraná chegou ao valor de referência de 6 m/s.

5.2 MAPEAMENTO DO LITORAL DO PARANÁ PELO FATOR DE FORMA K DE WEIBULL

Analisando o Atlas Eólico do Estado do Paraná, foi possível encontrar o mapeamento do fator de Forma k de Weibull, conforme a Figura 26, o que mostra o valor de 1,7, significando não ter uma quantidade de vento significativa para o nosso projeto.

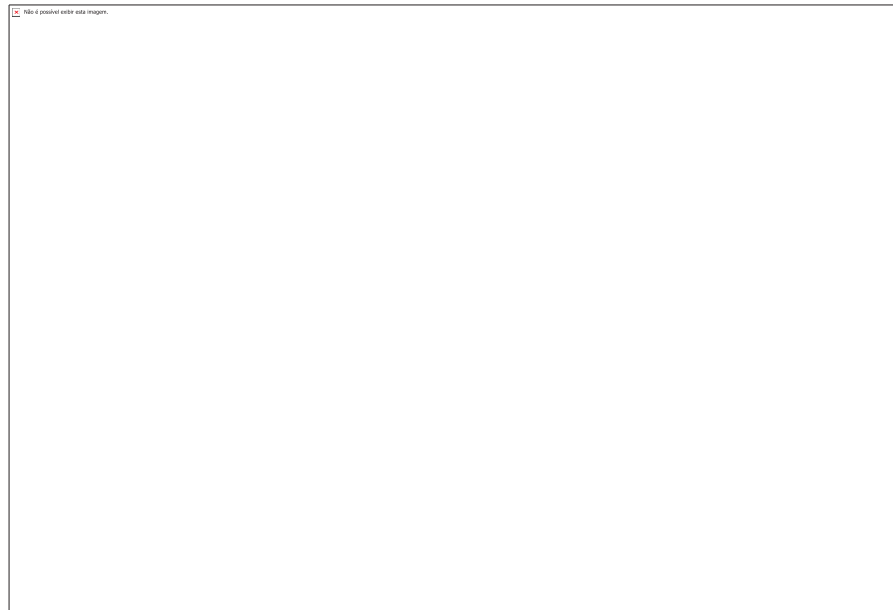
Figura 26– Fator de Forma k de Weibull.



Fonte: Atlas Eólico do Estado do Paraná, 2025.

A Figura 27 apresenta os parâmetros gráficos para o fator de forma de Weibull em relação a velocidade do vento em m/s.

Figura 27– Curvas de Weibull



Fonte: Atlas Eólico do Estado do Paraná, 2025.

Verificou-se nessas curvas que o valor de $k=1,7$, encontrado para o nosso litoral está em uma frequência de vento de 5 m/s. O que não é suficiente para a viabilidade técnica do nosso projeto.

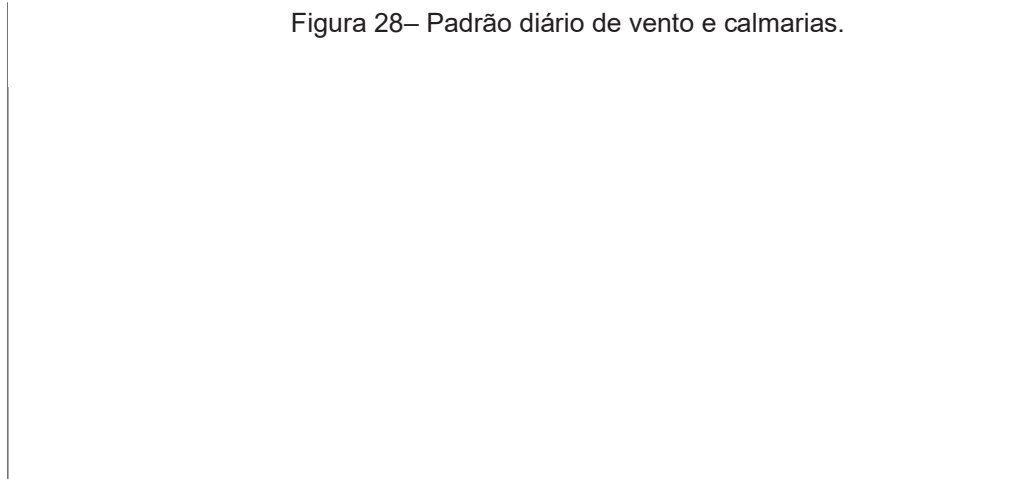
5.3 SIMULAÇÕES DE POTÊNCIA DE TURBINAS PARA PARQUES EÓLICOS SOFTWARE LIVRE ALWIN

O *software* utilizado para simular as turbinas dos aerogeradores foi o ALWIN, os dados recolhidos pelo usuários são usados para uma melhor avaliação do potencial eólico no projeto, pois analisa a velocidade do vento, a partir dos dados técnicos e dos gráficos de potência fornecida pelos fabricantes das turbinas. A interpretação dos dados pelo aplicativo diferencia os equipamentos utilizados para a medição fazendo uma média entre eles, decorrente da diferença entre as massas e inércia dos equipamentos. Os períodos de calmarias foram analisados, conforme Figura 28.

Tais dados oferecem períodos em que não foram produzidos energia, ou seja, períodos inaceitáveis de produção de energia que poderão inviabilizar o empreendimento se forem períodos significativos. As variações rápidas de potência

associadas a calmarias e turbulências do vento são importantes informações em um estudo eólico, onde tais processos podem gerar fadiga do equipamento mais rapidamente.

Figura 28– Padrão diário de vento e calmarias.

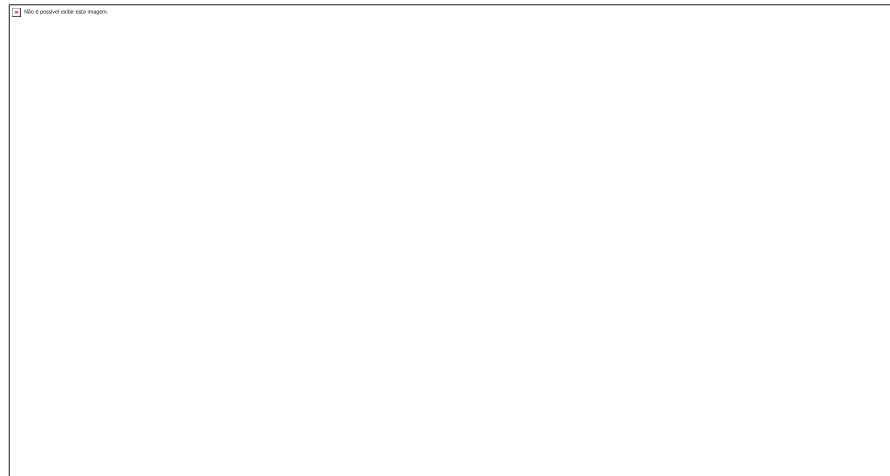


Fonte: PETRY & MATTUELLA (2007).

O gráfico A representa o padrão diário das velocidades do vento (azul) e dos desvios padrões (salmão) do vento no período de 24 horas. O gráfico B representa a duração do vento com as indicações de calmarias para velocidades menores que 3.0 m/s (azul) e 5.0 m/s (salmão).

O gráfico que representa a potência das turbinas eólicas referenciam tecnicamente o valor de potência unitário de determinado aerogerador, conforme Figura 29. Esses valores são recolhidos em utilização real dos equipamentos, por anemômetros no local onde serão instalados. Esses dados são de extrema importância no momento da instalação do parque eólico, pois são o que determinam o cálculo e assim a viabilidade técnica do projeto. Vários estudos na área já foram desenvolvidos para ajudar os projetistas a direcionar a coleta de dados e assim encontrar um local ideal para a instalação do projeto (PETRY & MATTUELLA, 2007; DALMAZ et al., 2007).

Figura 29– Curva de potência do aerogerador WKA 450 kw.



FONTE: PETRY & MATTUELLA, 2007.

5.4 CALCULADORA DE TURBINA EÓLICA DA MNI CALCULATOR

Na expectativa de simular mais dados para o projeto utilizou-se a Calculadora de turbinas eólicas da MNI Calculator, também é um *software* computacional e que faz o cálculo da energia gerada por turbinas utilizando a velocidade do vento na região, para ver se existe a viabilidade técnica. Para isso foi especificado os tipos de turbinas eólicas que existem no mercado:

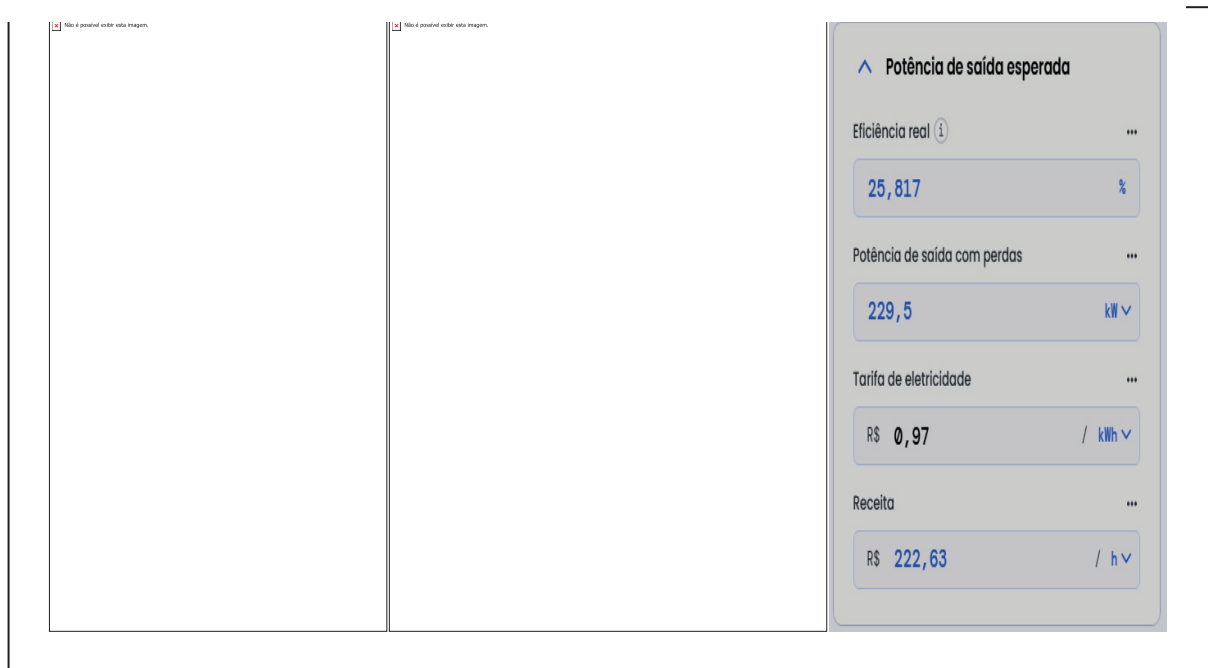
Temos dois tipos de turbinas eólicas:

- As Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (**TEEH**), também conhecida como **HAWT**, do inglês *Horizontal-Axis Wind Turbine*, tem pás que giram em torno de um eixo horizontal. Essas são as turbinas eólicas *onshore* mais comuns, geralmente instaladas em colinas e em outras áreas que recebem muito vento, mas também são amplamente utilizadas.
- As Turbinas Eólicas de Eixo Vertical (**TEEV**) ou **VAWT**, do inglês *Vertical-Axis Wind Turbine*, por outro lado, giram em torno de um eixo vertical.

A eficiência das turbinas de eixo horizontal (relação entre a potência do vento e a potência de saída) é normalmente maior, possuem algumas desvantagens. Como as lâminas estão sujeitas à força da inércia, que muda de direção, estas recebem uma carga alternada que geralmente prejudica a integridade das lâminas. Além disso, o gerador é colocado muito acima do solo, o que torna os reparos e a manutenção

dispendiosos. Foi possível encontrar a capacidade de geração das turbinas eólicas através da velocidade do vento, conforme a Figura 30. A turbina usada para a simulação da calculadora *MNI CALCULATOR* foi a GE-HALIADÉ-X, com 107 m de diâmetro:

Figura 30 – Simulação feita com a MNI CALCULATOR.



Fonte: (Elaborada pela autora, 2025).

A análise da Figura 29 representa os seguintes resultados:

A Potência Média que o aerogerador deveria trabalhar seria de 450 kW em relação ao tempo estudado média, mas na realidade, submetido a simulação produziu apenas 229,5 kW.

A Energia Média, que representa a representação da energia total gerada pelo aerogerador a partir dos dados da velocidade do vento que foram inseridos, devem servir para que sejam comparados no aplicativo do ALWIN e devem ser o mais real possível.

Já o Fator de Capacidade, que significa a porcentagem de aproveitamento do aerogerador em relação ao tempo medido, referenciado na Figura 28, onde apresenta o resultado do que foi estudado para um aerogerador de 450 kW, os valores encontrados para esse FC foi de 25,817% como a média da potência do conversor em determinado período de estudo e descobriu-se que essa porcentagem foi a que realmente foi aproveitada.

Considerando a distribuição de Weibull, esse resultado encontra-se no percentual de 30%, e é o que foi considerado o mais real. Segundo Martinez (2003), devido à característica inconstante dos ventos, valores próximos de 100% nunca serão alcançados, o que inviabiliza o projeto.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO

A velocidade média do vento dos três anos de dados da estação meteorológica de Pontal do Sul é de 3,43 m/s, sendo considerado um valor baixo para a geração, segundo os valores citados por Feitosa ET al. (1993) e Dalmaz ET al. (2007). Outro fator que reforça essa hipótese é a velocidade de arranque, cuja maioria dos modelos existentes no mercado começam a funcionar com velocidades acima de 3 m/s, como pode ser visto na curva de potência da Figura 29. Ventos com menores velocidades que estas podem avariar as turbinas eólicas devido aos esforços de fadigas transitórios que podem ser considerados piores do que os esforços recebidos quando as turbinas estão em movimento, como os estocásticos e cíclicos (DALMAZ ET al. 2007; AMENEDO & FEITO, 2003; MANWELL ET al., 2002). Assim, a média dos ventos da estação analisada permite afirmar que é possível haver geração de energia por fontes eólicas, mas utilizando equipamentos que tenham baixa velocidade de arranque ($< 3,0$ m/s) para haver um melhor aproveitamento dos ventos, pois a média é considerada baixa, mas as turbinas ficarão boa parte do tempo ociosas.

6.2 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

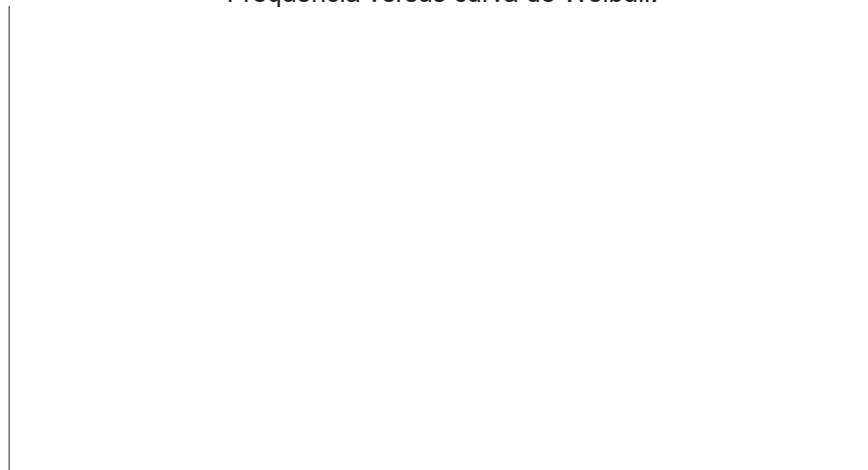
É possível inferir que os dados coletados não estão dentro dos parâmetros para aproveitamento eólico, pois há uma discrepância entre os dados que foram medidos e os ideais de Weibull, sendo que a curva de Weibull, conforme Figura 31, também não acompanha corretamente o histograma das velocidades, mostrando que não há regularidade dos ventos em Pontal do Sul.

Isto pode ser reforçado observando os valores do fator de escala a e de forma k , sendo analisados esses valores pode-se afirmar que os dados não são ideais para a geração eólica. O valor encontrado de a (3,86 m/s) está bem próximo da velocidade

média de Pontal do Sul (3,43 m/s), mas como discutido no item 4.2, esses valores não são ideais para o aproveitamento eólico.

O fator de forma k (1,71) também não é aceitável, pois está bem distante do valor que seria ideal de 3 como afirma Martinez (2003), mostrando irregularidade nos padrões das velocidades dos ventos. A Figura 30 apresenta um gráfico da frequência dos ventos versus a escala de Weibull, pelo *software Wind Speed Statistics* para o período do estudo e verificou-se também a baixa frequência e o fator de forma c de 1,68.

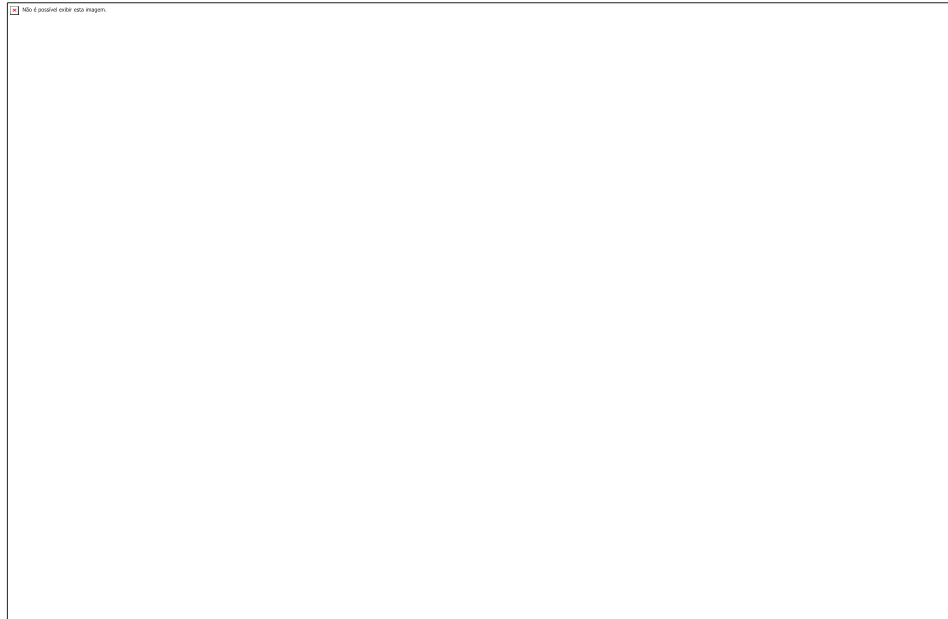
Figura 31– Simulação feita com o *Wind Speed Statistics* para a Frequência versus curva de Weibull.



Fonte: (Elaborado pela autora, 2025).

Observando a linha vermelha que representa o valor de a , juntamente com a curva de Weibull em preto, é possível observar o efeito do fator de forma c nos dados. Se o valor de c estivesse próximo de 3, o pico da curva de Weibull estaria mais estreita, sendo que o traço em vermelho estaria no cento do pico, indicando assim, a configuração ideal de regularidade das velocidades dos ventos para a geração eólica. Analisando também, pelo *software Wind Speed Statistics* o período de calmaria para a região verificou-se, conforma a Figura 32 que são muito extensos.

Figura 32– Simulação feita com o *Wind Speed Statistics*, para calmarias na região.



Fonte: (Elaborado pela autora, 2025).

Analisou-se que as calmarias em Pontal do Sul, conforme o gráfico A representa o padrão diário das velocidades médias (azul) e dos desvios padrões (salmão) do vento em 24 horas e o gráfico B representa duração das calmarias em minutos com velocidades menores que 1.0 m/s (azul) e 2.0 m/s (salmão).

Analisando os dados, é possível concluir que os períodos de calmarias são extensos, não sendo atrativos para a geração eólica e relacionando esses valores com a distribuição de Weibull (Figura 32), é possível afirmar que as maiores ocorrências de vento são nas velocidades de até 2 m/s.

6.3 PREVISÃO DE ENERGIA GERADA NA ESCOLHA DE UM AEROGERADOR

Para simular alguns casos de energia gerada pela velocidade do vento no Litoral do Paraná, pesquisaram-se alguns aerogeradores que tem um arranque com velocidade de 2,5 m/s. O modelo escolhido foi o AEROGERADOR ENERCON E-44, levando em consideração a rugosidade da Tabela 1.

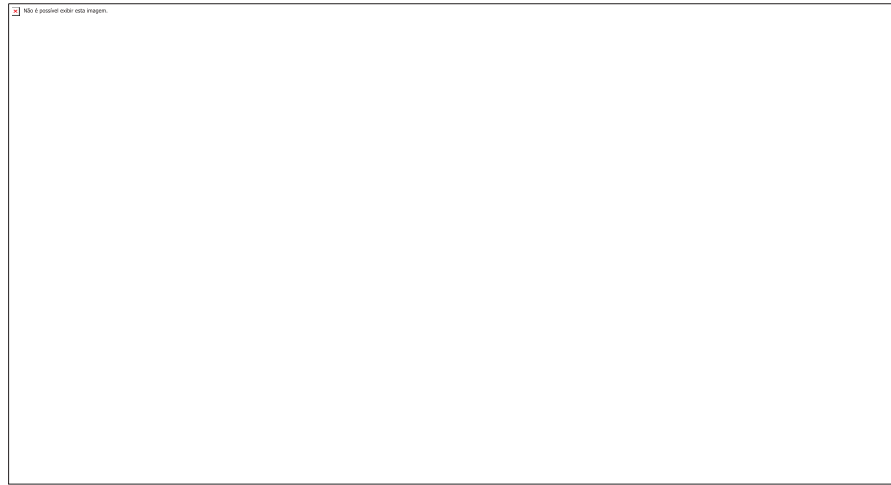
Tabela 1– Tabela de rugosidade Z0 (m).

| Tipo de Cobertura e/ou uso da terra | Faixa de Rugosidade Z ₀ [m] |
|--|--|
| Áreas urbanas | 0,4 – 3 |
| Florestas | 0,4 – 0,8 |
| Caatinga | 0,1 – 0,4 |
| Culturas agrícolas | 0,02 – 0,1 |
| Pastagens | 0,02 – 0,05 |
| Solo exposto | 0,001 – 0,01 |
| Corpos de água [lagos, oceano] <i>sem vento de superfície</i> | 0,0002 – 0,001 |

Fonte: Atlas Eólico do Estado do Paraná, 2025.

Analisando a energia produzida por esta turbina com a rugosidade de $Z_0 = 0,250\text{m}$, conforme Figura 33, pode-se afirmar que a previsão de produção com esta turbina seria baixa. O item *Average Power* nos indica qual a potência média que o aerogerador trabalharia durante o período estudado. O valor medido indicado foi 120,4 kW, sendo considerado um valor baixo, já que esse modelo é capaz de gerar 900 kW em média. O mesmo ocorre com item *Energy Measured*, o qual indica a energia que seria produzida durante o período dos dados analisados. O valor encontrado de 2.981 MWh é baixo. Quando se analisa juntamente com o *Capacity Factor*, que indica a porcentagem de tempo que a turbina realmente estaria produzindo energia pode-se concluir que ela trabalharia somente 13,2% do tempo em 3 anos. Utilizando a porcentagem que seria ideal, o valor de geração elétrica aceitável para esta turbina, com a rugosidade 1, seria de 6.775 MWh no período estudado.

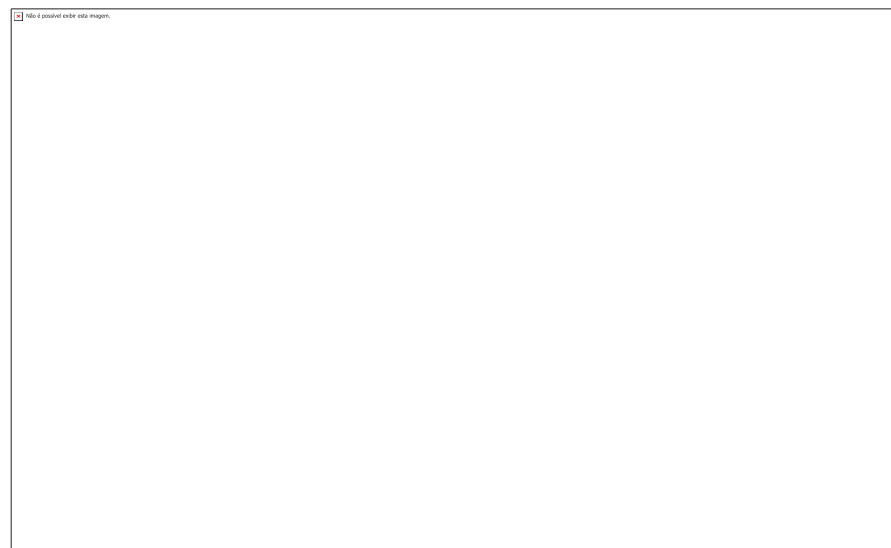
Figura 33– gráfico de energia gerada pelo aerogerador ENERCON e-44 com rugosidade $z_0 = 0,250$ m onshore.



Fonte: SOFTWARE ALWIN, 2025.

Analisando a energia produzida por esta turbina com a rugosidade $Z_0 = 0,0002$ m (Figura 33), pode-se determinar que a previsão de produção desta turbina também é baixa, o *Average Power* indica que a potência média seria de 63,5 kW, considerado um valor baixo, já que esse modelo é capaz gerar 900 kW em média.

Figura 34– gráfico de energia gerada pelo aerogerador ENERCON E-44 para uma rugosidade $Z_0 = 0,0002$, referente ao oceano.



Fonte: SOFTWARE ALWIN, 2025.

Analisando a energia produzida por esta turbina com a rugosidade $Z_0 = 0,0002$ (FIGURA 34), pode-se afirmar que a previsão de produção com esta turbina

também é baixa. O *Average Power* indica a potência média de 71,7 kW, considerado um valor baixo, já que esse modelo é capaz gerar 800 kW, em média e o *Energy Measured*, que indica a energia gerada, o valor encontrado de 1.775,5 MWh pode ser considerado baixo, pois quando é analisado o *Capacity Factor*, pode-se determinar que ela trabalhe somente 8,9% do tempo, considerando o período de 3 anos. Utilizando a porcentagem que seria o ideal, o valor de geração elétrica aceitável para esta turbina, com a rugosidade $Z_0=0,0002$ seria de 5.984,8 MWh, no período estudado.

Na avaliação geral, as simulações mostraram que os aerogeradores ficaram abaixo dos valores ideais para a geração eólica, indicando que a região de Pontal do Sul é inviável para a instalação de uma fazenda eólica, visto que as turbinas não trabalhariam nem na metade da sua capacidade total, podendo gerar prejuízos para um futuro investimento.

Outro problema encontrado foi em relação à rugosidade. Os valores de geração elétrica utilizando a rugosidade $Z_0= 0,002$, que é em ambiente marinho, deveriam ser maiores do que os valores encontrados em terra segundo DELONG & WESTGATE (2005), o que não ocorreu, sendo está uma grande desvantagem.

Segundo Elias (2008) um local ideal para a geração eólica necessita comportar no mínimo 100 MW de capacidade instalada, cujo total de turbinas necessárias utilizando o modelo E-44 para alcançar essa capacidade, seria de 137 turbinas. Utilizando valores monetários para o Brasil, fornecidos por ANEEL (2005) e Molly (2005), onde todos os kW que a turbina pode produzir equivale R\$7.500, o custo de cada turbina E-44 seria de R\$ 675.000,00, sendo que o valor total de 137 turbinas seria de aproximadamente R\$ 975.000.000,00 não levando em consideração os custos de instalação e das fundações.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tentando analisar a viabilidade técnica do estudo do potencial eólico no Balneário de Pontal do Sul, no Município de Pontal do Paraná – PR bem como o melhor tipo aerogerador a ser empregado, chegou-se as seguintes conclusões

Os resultados encontrados nas simulações não foram satisfatórios, estando muito abaixo do que seria necessário para a geração eólica.

Com base nos parâmetros da Distribuição de Weibull e do Fator de Capacidade (*Capacity Factor*), os valores encontrados foram baixos, demonstrando que as turbinas ficariam ociosas grande parte do tempo, não retornando o valor que seria investido, gerando mais despesas, como a manutenção desses equipamentos. A velocidade média encontrada de 3,43 m/s é considerada baixa segundo Dalmaz ET al. (2007) e Feitosa ET al. (1993), sendo necessários ventos médios superiores a 6 m/s em média.

Os valores de Fator de Capacidade máximos foram de 8,9% da potência da turbina, utilizando o melhor modelo para a região, o ENERCON E-44, cujos valores são enormemente baixos.

A região apresentou uma tendência de direção dos ventos entre os setores W, S e L, sendo que os setores SSW, S, SSE, ESE e, foram os que tiveram as direções mais significativas, ocorrendo ventos com mais frequência no setor S (4,7 %), seguido por E (4,6 %).

Os dados de calmarias mostraram-se importantes, pois revelaram que os ventos de Pontal do Sul (31,4%) ficaram abaixo da velocidade de 2,0 m/s, tendo períodos máximos nessa velocidade de até 26 h seguidas, sendo um tempo extremamente longo para a geração eólica. Estes também revelaram que as maiores velocidades de vento em Pontal do Sul ocorrem no período da tarde e noite, mesmo assim com velocidades baixas, não passando de 4,5 m/s em média.

O Brasil se destaca como um exemplo de matriz energética renovável, e a inovação tecnológica, assim como a identificação de áreas apropriadas para a instalação de parques eólicos, são essenciais. A validação das equações do projeto foi fundamental para a análise da viabilidade da implantação de um parque eólico no litoral do Paraná, exigindo uma revisão cuidadosa da literatura e contribuições especializadas para garantir a precisão do projeto.

Os resultados das simulações não validaram a viabilidade, pois a velocidade do vento na região não alcançou a velocidade mínima de 6 m/s para atingir a potência útil dos aerogeradores. Sem essas medições, o investimento na instalação poderia ser comprometido, resultando em prejuízos significativos para todos os envolvidos no projeto.

O contínuo estudo e validação, juntamente com a adequação às legislações e normas, são necessários para a expansão da matriz energética renovável e para tornar a geração de energia eólica uma realidade cada vez mais abrangente.

7.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como trabalho futuro pretende-se continuar com o desenvolvimento de geração sustentável de energia, buscando fontes de aprimoramento de tecnologias e de aumento de área de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABEEólica, Associação Brasileira de Energia Eólica, 2024, citado uma vez na página 12.
- ABRAMIC, A., Cordero-Penin, V., Haroun, R., 2023. Environmental impact assessment framework for offshore wind energy developments based on the marine Good Environmental Status. *Environmental Impact Assessment Review* 97, 106862.
- ALEP, Assembléia Legislativa do Paraná, 2025. Citado 1 vez na página 11.
- AL/RN. Regulamentação do Hidrogênio Verde, 2024. Citado 1 vez na página 31.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, “Energias Renováveis no Brasil”, 2025. Citado uma 1 vez na página 18.
- ARAGÃO, Jéssica da Silva ET al. Estudo do uso de energia renovável nas zonas costeiras por ondas, marés, e ventos, 2019. Citado 1 vez na página 45.
- ARBOIT, Natan Karina Swarowski ET al. Potencialidade de utilização da energia geotérmica no Brasil—uma revisão de literatura. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 26, p. 155–168, 2013. Citado 2 vez na página 30.
- ASIM, Taimoor ET al. A review of recent advancements in wind turbine technology. *Energies*, MDPI, v. 15, n. 2, p. 579, 2022. Citado 3 vezes nas páginas 21, 23.
- BARBOSA, L. R. D. (2025). O uso de parques eólicos offshore para descarbonização das operações de exploração e produção de petróleo e gás natural: Avaliação de áreas potenciais no Sudeste do Brasil (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo). Citado 1 vez na página 22 .
- BARBOSA, Robson. Inserção da energia eólica no Brasil: análise de princípios e experiências regulatórias. 2018. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. Citado 1 vez na página 23.
- BARRA, Matheus Martins; TEIXEIRA, Wesley Carminati. Energia eólica: panorama atual e perspectivas futuras. *Caderno de Estudos em Engenharia Elétrica*, v. 4, n. 1, 2022. Citado 1 vez na página 24.
- BEZERRA, Francisco Diniz. Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia. Banco do Nordeste do Brasil, 2021. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29. COPEL. Energia Renovável. *Energies*, MDPI, v. 15, n. 2, p. 579, 2024. Citado 2 vez na página 34.

CABRAL, M.J. (coord.), Almeida, J., Almeida, P.R., Delliger, T., Ferrand de Almeida, N., Oliveira, M.E., Palmeirim, J.M., Queirós, A.I., Rogado, L., Santos-Reis, M. (eds.) (2023). Livro Vermelho dos Vertebrados de Portugal. Instituto da Conservação da Natureza. Lisboa. 659 pp.

CAVALCANTE, Leonardo Gondim; LEITE, Adriana de Oliveira Sousa. Aplicação da Matriz de Leopold como ferramenta de avaliação dos aspectos e impactos ambientais em uma fábrica de botijões. **Revista tecnologia**, v. 37, n. 1/2, p. 111-124, 2016.

CUNHA KEMERICH, Pedro Daniel da ET al. Paradigmas da energia solar no Brasil e no mundo. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 20, n. 1, p. 241–247, 2016. Citado 1 vez na página 20.

DANTAS, Hugo Werner Fortunato. Desenvolvimento energético e energia eólica na ordem jurídica do Brasil: aspectos Institucionais e Socioambientais. 2013. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Citado 1 vez na página 26.

DE SALLES, Ana Claudia Nioac. Metodologias de análise de risco para avaliação financeira de projetos de geração eólica. 2014. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro Rio de Janeiro, Brazil. Citado 1 vez na página 49.

DE ALMEIDA DE SOUZA, T., & de Oliveira, R. C. (2016). Alterações ambientais no complexo estuarino-lagunar de cananeia-iguape: a influência do canal artificial do "valo grande". *Boletim de Geografia*, 34(3).

EIA. Tipos de Energia Renováveis, 2024. Citado 2 vezes nas páginas 17, 19. EPE. Normas reguladoras do sistema elétrico. [S.l.: s.n.], 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt>. Acesso em: 15 de julho de 2024. Citado 8 vezes nas páginas 15–17, 19–21, 29.114

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. "Ecossistemas do Paraná", 2024. Citado 1 vez na página 33.

GEOPAR. Batimetria do Litoral Sul - ZEE-PR Litoral (ID: 0). [S.l.: s.n.], 2024. Disponível em: https://geopr.iat.pr.gov.br/server/rest/services/00_

KEMENES, Alexandre. (2018). Variação climatológica e influência dos eventos climáticos extremos sobre a Planície Litorânea do Paraná-2018.

MIRSHAWKA, Victor. O modelo de Weibull e aplicações a confiabilidade. 1979. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1979. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/45/45133/tde-20230303-170043/>. Acesso em: 19 jan. 2026.

- MORAIS, Jorge Lopes. Projeto aerodinâmico de pás de uma turbina eólica. 2018.
- PORTAL EÓLICO, 202.4 “Turbina eólica , seu funcionamento e seus componentes”. Disponível em <http://www.portaleolico.com/index.php?r=site/login> >Acesso em 27/01/2025.
- PUBLICACOES/zeelit_batimetria_litoral_s/FeatureServer/0/. Acesso em: 05 de novembro de 2024. Citado 3 vezes nas páginas 55, 56, 61.
- GOLDEMBERG, José. Biomassa e energia. Química nova, SciELO Brasil, v. 32, p. 582–587, 2019. Citado 1 vez na página 29.
- GONCHAROV, Daniel. Análise de projeto de parque eólico e oportunidades em alto mar para empresas de óleo e gás no Brasil. 2021. Tese (Doutorado). Citado 1 vez na página 24.
- GORAYEB, Adryane; BRANNSTROM, Christian. Licenciamento Ambiental e Oposição Social à Energia Eólica: estudo de caso com foco no social gap em comunidade litorânea do Ceará, Brasil’. Magazine of Geography (Recife), v. 37, n. 3, 2020. Citado 1 vez na página 25.
- GWEC. Brasil permanece em sexto lugar no Ranking mundial de energia eólica, 2024. Citado 3 vezes nas páginas 15, 22, 109.
- IBAMA, Instituto Brasileiro de Meio Ambiente. Parques eólicos offshore Aracatu I e Aracatu II serão instalados no Rio e no Espírito Santo, 2025. Citado página 26.
- ICMBio, “Reserva de Mata Atlântica no litoral do Paraná”, 2025. Citado na página 38.
- INTELBRAS. Energia solar no Brasil e suas definições, 2024. Citado 1 vez na página 21.
- LAGE, Elisa Salomão; PROCESSI, Lucas Duarte. Panorama do setor de energia eólica. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2013. Citado 1 vez na página 27.
- MATTAR, Cristian; BORVARÁN, Dager. wind power simulation by using WRF in the central coast of Chile. Renewable energy, Elsevier, v. 94, p. 22–31, 2016. Citado 1 vez na página 26.
- NOGUEIRA, Erika Carvalho. ANÁLISE DA INSERÇÃO DA GERAÇÃO EÓLICA NO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL. 2020. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Citado 1 vez na página 26.
- OBBERDIEK, Heiko. The bookmark package. [S.I.], dez 2011. Disponível em: <ftp://ftp.ctan.org/tex-archive/macros/latex/contrib/oberdiek/bookmark.pdf>. Citado 1 vez na página 44.

OZATO, Jorge Yuri ET al. Análise estocástica da competitividade de uma usina eólica (UEO) na costa brasileira através do Levelized Cost of Energy (LCOE). Universidade Federal de Itajubá, 2023. Citado 1 vez na página 23.

PESSANHA, José Francisco Moreira; MELO, Albert Cordeiro Geber de; REZENDE, BÁRBARA RAQUEL MENDONÇA. Complementaridade entre fontes renováveis através da Análise de Componentes Principais. Universidade Federal Fluminense, 2020.

SILVA, Clinton Pereira da ET al. Avaliação do Impacto do Tipo de Aerogerador e da Altura de Instalação sobre os Parâmetros Energéticos de um Parque Eólico. Revista Brasileira de Energia| Vol, v. 28, n. 2, 2022. Citado 1 vez na página 45.

SILVA, Jose Alderir. Energia Eólica no Brasil: Avanços e Desafios. Princípios, v. 42, n. 167, p. 179–202, 2023. Citado 1 vez na página 28.

SOUZA MENDONÇA, Anny Key de; BORNIA, Antonio Cezar. Energia eólica aerotransportada: Uma revisão da tecnologia. Mix sustentável, v. 6, n. 1, p. 105–121, 2020. Citado 1 vez na página 27.

TUCHTENHAGEN, Patrícia Nunes. Variabilidade do vento e potencial para energia eólica no litoral Sul do Brasil. Brasil, 2019. Citado 1 vez na página 25. VIEIRA DOS SANTOS, Antonio. Memória histórica da cidade de Paranaguá e seu Município. Publicação da Secção de História do Museu Paranaense, Curitiba (Manuscritos originais de 1850), 2020. Citado 2 vez na página 14.

VILLELA, Priscilla Cardoso. Estudo da garantia física em empreendimentos energéticos baseados em fontes renováveis, 2015. Citado 1 vez na página 28.

VITERBO, Jean Carlo. Geração de energia elétrica a partir da fonte eólica . 2008. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. Citado 1 vez na página 45.116

WALTON, R Grace ET al. Insulin-resistant subjects have normal angiogenic response to aerobic exercise training in skeletal muscle, but not in adipose tissue. Physiological reports, Wiley Online Library, v. 3, n. 6, e12415, 2015. Citado 3 vez na página 44.

WILSON, Peter; MADSEN, Lars. The Memoir Class for ConFigurable Typesetting - User Guide. Normandy Park, WA, 2010. Disponível em: <<http://mirrors.ctan.org/macros/latex/contrib/memoir/memman.pdf>>. Citado 1 vez na página 24.

XAVIER, Thomaz; GORAYEB, Adryane; BRANNSTROM, Christian. Energia eólica e pesca artesanal: impactos e desafios na costa oeste do Ceará, Brasil. Geografia

Marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos. Rio de Janeiro: PGGM, p. 608–630, 2020. Citado 4 vezes nas páginas 25, 32, 33.

YAO, Zhengyi; LI, Xiaoying; XIAO, Jianhua. Characteristics of daily extreme wind gusts on the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Journal of Arid Land*, Springer, v. 10, p. 673–685, 2018. Citado 1 vez na página 45.