

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ANDRÉ ANDERSON DA LUZ DA COSTA

**MODELAGEM DA CURVA DE POTÊNCIA GERAL DO PARQUE EÓLICO
SOTAVENTO**

MEDIANEIRA

2023

ANDRÉ ANDERSON DA LUZ DA COSTA

**MODELAGEM DA CURVA DE POTÊNCIA GERAL DO PARQUE EÓLICO
SOTAVENTO**

Modeling of the overall power curve of sotavento wind farm

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Thiago Naufal Santelo.

MEDIANEIRA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ANDRÉ ANDERSON DA LUZ DA COSTA

**MODELAGEM DA CURVA DE POTÊNCIA GERAL DO PARQUE EÓLICO
SOTAVENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 23/junho/2023

Thiago Naufal Santelo
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcos Fischborn
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Evandro Andre Konopatzki
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

MEDIANEIRA

2023

Dedico este trabalho aos meus entes queridos,
amigos e a todos aqueles que, de alguma forma,
contribuíram para o meu desenvolvimento
intelectual.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo sustento e força nos momentos difíceis, aos meus pais por todo apoio e dedicação para me manter nos caminhos do conhecimento, ao professor Thiago Naufal Santelo pela dedicação e apoio na elaboração deste trabalho, aos professores Leandro Herculano da Silva, Diogo Marujo e Guilherme Descrovi Nabeyama que me ensinaram que a vida e o conhecimento vão muito além da academia, e principalmente ao meu grande amigo e irmão Carlos Maycon da que me ajudou em todos os momentos difíceis, como os períodos de provas e seminários, que foram enfrentados simultaneamente com o desempenho de trabalho externo.

Também gostaria de deixar registrado os meus agradecimentos a Universidade Tecnológica Federal do Paraná em especial ao corpo docente do curso de engenharia elétrica, sem eles, não poderia estar recebendo o título de engenheiro eletricista.

Somos uma forma de vida que se tornou
consciente de si mesma. Nosso destino é explorar
o universo e buscar o conhecimento.
(HAWKING, 2010).

RESUMO

O parque experimental Sotavento, na Galícia, passou por uma análise de desempenho de suas turbinas eólicas. Através da coleta de dados de velocidade do vento e potência ao longo do tempo, foi possível estimar a curva de potência geral do parque. Os resultados mostraram que o desempenho real é inferior ao esperado, indicando uma menor eficiência na conversão da energia cinética do vento em energia elétrica. Foi realizada uma análise da curva de regressão polinomial, revelando que modelos de grau mais elevado se ajustam melhor aos dados, porém, a partir do grau 6, não há ganhos significativos na qualidade do ajuste. Isso sugere que um polinômio de grau superior a 10 não é necessário para descrever os dados com precisão. A curva de geração teórica mostrou um potencial máximo de 17,86 MW, porém, o valor máximo observado na curva real foi de apenas 9,11 MW, representando cerca de 51% do potencial máximo. O parque também foi capaz de gerar energia em baixas velocidades do vento, com um valor mínimo observado de 0,29 MW. O fator de capacidade do parque foi calculado em 65,95%, indicando que ele é capaz de gerar em média quase dois terços da energia possível se estivesse operando continuamente em sua capacidade máxima. No entanto, a substituição de geradores ultrapassados por equipamentos mais modernos e eficientes poderia melhorar ainda mais a capacidade de geração de energia. Uma das limitações identificadas foi a baixa eficiência da tecnologia utilizada em certos pontos da curva de potência. No entanto, o retrofit com conversores de carga total é uma opção viável para aumentar a eficiência e a capacidade de geração sem substituir todas as turbinas, reduzindo os custos de modernização. A modernização traria benefícios como melhoria da eficiência e capacidade de geração, redução dos custos operacionais e aumento da vida útil dos equipamentos. Recomenda-se considerar a substituição de equipamentos ultrapassados por tecnologias mais eficientes para aproveitar melhor o potencial do parque. A análise da curva de potência é fundamental na avaliação da capacidade de geração de um parque eólico. Além disso, a utilização de algoritmos em linguagens de programação como Python, em plataformas como Jupyter Notebook, pode ser uma maneira eficaz de processar e analisar grandes volumes de dados, proporcionando resultados precisos e confiáveis não apenas na análise da curva de potência, mas também na análise de dados de velocidade do vento e previsão da produção de energia eólica.

Palavras-chave: energia eólica; energia elétrica - produção; análise de regressão; python (linguagem de programação de computador).

ABSTRACT

The Sotavento Experimental Park in Galicia underwent a performance analysis of its wind turbines. By collecting wind speed and power data over time, it was possible to estimate the overall power curve of the park. The results showed that the actual performance is lower than expected, indicating lower efficiency in converting the kinetic energy of the wind into electrical energy. A polynomial regression curve analysis was conducted, revealing that higher-degree models fit the data better. However, beyond degree 6, there are no significant gains in the quality of the fit. This suggests that a polynomial higher than degree 10 is not necessary to accurately describe the data. The theoretical generation curve showed a maximum potential of 17.86 MW, but the maximum value observed in the actual curve was only 9.11 MW, representing approximately 51% of the maximum potential. The park was also capable of generating power at low wind speeds, with a minimum observed value of 0.29 MW. The park's capacity factor was calculated at 65.95%, indicating that it is capable of generating on average almost two-thirds of the possible energy if it were operating continuously at its maximum capacity. However, replacing outdated generators with more modern and efficient equipment could further improve the energy generation capacity. One of the identified limitations was the low efficiency of the technology used at certain points in the power curve. However, retrofitting with full-load converters is a viable option to increase efficiency and generation capacity without replacing all the turbines, reducing modernization costs. Modernization would bring benefits such as improved efficiency and generation capacity, reduced operational costs, and increased equipment lifespan. It is recommended to consider replacing outdated equipment with more efficient technologies to better harness the park's potential. Power curve analysis is crucial in assessing the generation capacity of a wind park. Furthermore, utilizing programming language algorithms such as Python, in platforms like Jupyter Notebook, can be an effective way to process and analyze large volumes of data, providing accurate and reliable results not only in power curve analysis but also in wind speed data analysis and wind power production forecasting.

Keywords: wind power; electric power production; regression analysis; python (computer program language).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa.....	14
1.2	Objetivos	14
1.3	Objetivos específicos.....	14
2	TURBINAS EÓLICAS	15
2.1	Classificação dos tipos de turbina	15
2.2	Gerador de indução em gaiola de esquilo	16
2.3	Gerador de indução duplamente alimentado.....	16
2.4	Gerador síncrono a ímãs permanentes	17
2.5	Componentes dos geradores eólicos.....	18
2.6	Curva de potência	19
2.7	Fator de capacidade.....	21
2.8	Modelos de turbinas instaladas no Sotavento.....	22
2.9	Linguagem de programação python.....	22
3	METODOLOGIA	24
3.1	Algoritmo desenvolvido.....	24
3.2	Coleta de dados.....	25
3.3	Tratamento de dados	25
3.4	Cálculo de média para curva real.....	26
3.5	Cálculo do coeficiente de determinação R^2	27
3.6	Cálculo da curva teórica	28
3.7	Construção gráfica.....	28
3.8	Construção da curva de ajuste ao modelo R^2	29
3.9	Costrução da curva teórica	29
3.10	Análise estatística dos dados	29
3.11	Cálculo do fator de capacidade.....	30
4	RESULTADOS.....	30
4.1	Curva de potência real	30
4.2	Análise da curva de regressão.....	32
4.3	Curva de potência teórica.....	34
4.4	Curva teórica X curva real	36
4.5	Fator de capacidade do parque eólico Sotavento	37
5	CONCLUSÃO	39

5.1	Estudos futuros	40
	REFERÊNCIAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

A adoção de fontes alternativas de energia vem sendo exploradas desde a década de 1970, quando foi desencadeada a crise do petróleo levando diversos países a procurar mais segurança no fornecimento de energia e reduzindo assim a dependência da importação de combustíveis. Recentemente, as preocupações ambientais têm sido o maior impulsionador da busca de alternativas mais limpas para a produção de energia. Dentre essas alternativas, a energia eólica é uma opção bastante visada no setor energético. (IPCC, 2011).

Semelhante a um moinho de vento, uma turbina eólica consiste em pás que se movem com a velocidade do vento, fazendo com que o rotor gire. Este, por sua vez transmite a rotação multiplicada ao gerador, que converte essa energia mecânica em energia elétrica. Equipamento básico dos parques eólicos, os aerogeradores são estruturas gigantescas, pesando várias toneladas, que exigem logística complexa para o transporte e instalação. Esses dispositivos são conhecidos como gigantes da energia renovável (IPCC, 2011).

Através dos incentivos do governo local em busca de energias limpas, em especial a energia eólica, foi desenvolvido o Plano Eólico da Galícia. O governo optou por não restringir esse plano exclusivamente para o setor comercial, surgindo assim a ideia de criar um parque eólico rentável economicamente, com a intenção de promover o desenvolvimento nas áreas de informação, pesquisa e desenvolvimento. Deste projeto surgiu, em 1997, a Sotavento Galícia, SA, empresa responsável pelo funcionamento do parque eólico experimental Sotavento, inaugurado em 2001. Localizado no sudoeste da Europa, na Galiza, Espanha, o parque tem quatro finalidades distintas: ser um parque "vitrine" com diferentes tecnologias de parques eólicos, ser uma instalação de serviços para o setor de energias renováveis e para a poupança e eficiência energética, onde possam desenvolver projetos e atividades de pesquisa, ser um centro de formação e discussão de questões energéticas e tornar-se um centro informativo e promocional de energia renovável, econômica e eficiência energética. O parque experimental Sotavento possui uma potência de geração eólica superior a 17 MW, com uma média de geração de energia de 33 MWh. Este parque tem como objetivo ser uma vitrine para outros, onde podem haver mais de um modelo de turbina ou de tecnologia no mesmo parque eólico, já que conta com 24 geradores e 5 tipos de

tecnologias distintas em 9 modelos diferentes de turbinas. Além disso, o parque possui um campo de estudos voltado a pesquisas e desenvolvimento (Sotavento Galicia, S.A, 2020).

1.1 Justificativa

Na década de 90 houve uma expansão da geração eólica empregando geradores assíncronos. Tais geradores são de velocidade fixa, conexão direta à rede, empregam banco de capacitores para sua excitação e o controle de potência é restrito ao sistema de passo das pás.

Substituindo o sistema de conexão à rede por um conversor de frequência a turbina eólica ganha geração em velocidade variável, possibilidade de controle de potência pelo conversor de frequência, além de funções de proteção a ser gerenciadas pelo conversor sobre faltas oriundas da rede e do próprio gerador, reduzindo danos e tempos de indisponibilidades.

1.2 Objetivos

Desenvolver a curva de potência geral do parque eólico experimental Sotavento, onde estão instalados 24 aerogeradores assíncronos de conexão direta a rede.

1.3 Objetivos específicos

- Realizar o tratamento estatístico dos dados históricos de velocidade de vento e potência despachada, a fim de eliminar dados discrepantes;
- Classificar pontos da curva de potência dentro da faixa operacional, e pontos da curva de potência que identificam perdas de geração;
- Definir a curva de potência geral do parque eólico Sotavento;
- Comparar a curva de potência definida com a curva resultante da soma de curvas de potência de cada turbina do parque eólico;
- Calcular o fator de capacidade característico da instalação Sotavento.

2 TURBINAS EÓLICAS

As turbinas eólicas ou aerogeradores são dispositivos projetados para converter a energia cinética contida nos ventos em energia mecânica e posteriormente em energia elétrica, a conversão de energia ocorre quando as correntes de ar passam pelas pás do aerogerador causando a desaceleração do vento e por consequência provocando a queda de pressão estática do ar, tal diferença de pressão gera uma força de momento nas pás do gerador, que adquire movimento de rotação. Este movimento mecânico é transferido para uma caixa de multiplicadora onde ocorrerá a transformação de rotação, na qual temos uma baixa rotação na entrada do sistema e alta rotação na saída, de modo que a rotação entregue ao gerador seja a necessária para o seu funcionamento, e por fim ocorre a conversão em energia elétrica (PINTO, 2013).

Os geradores eólicos são classificados de acordo com a posição dos seus eixos centrais, são eles os de eixo vertical ou (*vertical axis wind turbine – VAWT*) e os de eixo horizontal (*horizontal Axis Wind turbine – HAWT*), que é o mais utilizado no mercado pela sua vantagem energética sobre a de eixo vertical, pois tem como característica principal o formato de pás do rotor, as quais, quando otimizadas, alcançam eficiência máxima quando a sustentação aerodinâmica é levada ao nível máximo. Geralmente são instalados entre 80 e 120 metros de altura, conseguindo assim o acesso a ventos com maiores velocidades, onde se pode obter alta eficiência energética, já que as pás encaram perpendicularmente o vento. As desvantagens deste tipo de gerador são relacionadas ao seu tipo de instalação, transporte e de necessitar de um sistema de controle de passo para girar as pás em direção ao (PINTO, 2013).

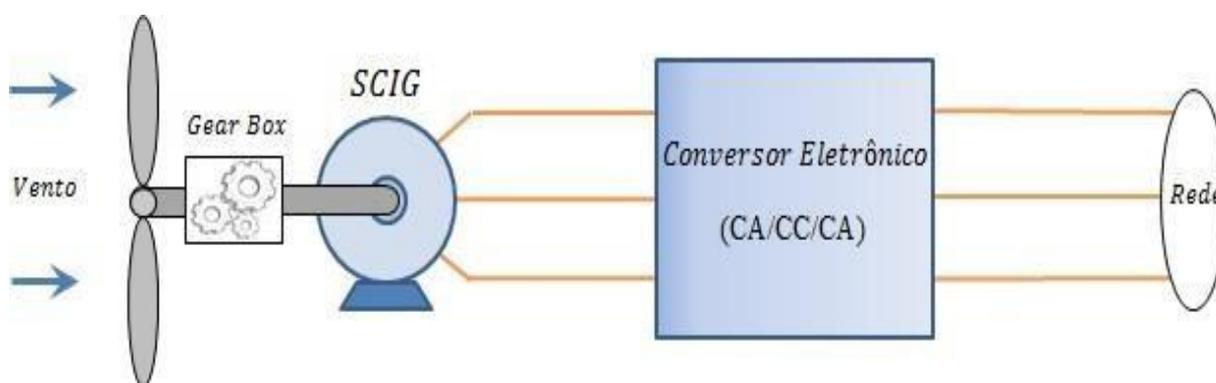
2.1 Classificação dos tipos de turbina

No total existem quatro tipos básicos de geradores que são utilizados no processo de geração de energia eólica, são eles: Gerador síncrono a ímãs permanentes, gerador síncrono com rotor excitado, gerador de indução em gaiola e gerador de indução duplamente excitado (VIANA, 2015).

2.2 Gerador de indução em gaiola de esquilo

Nos geradores de indução em gaiola de esquilo (SCIG) o dispositivo é conectado diretamente à rede elétrica por intermédio de um conversor estático de potência plena que faz o controle da velocidade do rotor, logo a velocidade de rotação é determinado pela frequência da rede. O conversor estático também proporciona o controle das potências ativas e reativas transferidas para a rede elétrica.

Figura 1 – Gerador de indução em gaiola de esquilo



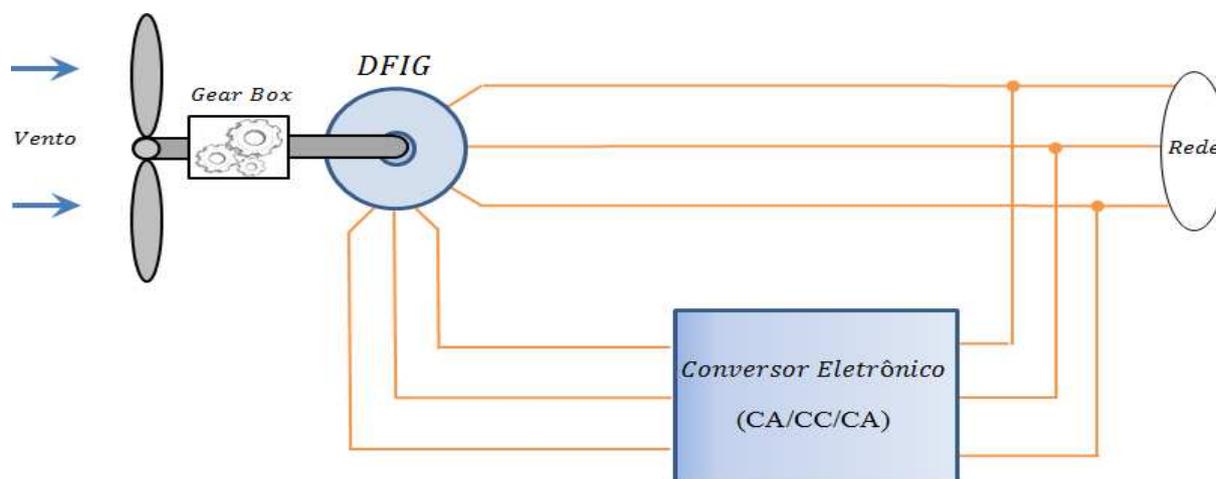
Fonte: Guilherme Viana Santos (2015)

O Conversor eletrônico tem como finalidade evitar que distúrbios de natureza elétrica sejam transferidos para o gerador. O Conversor deve ser projetado de acordo com a potência aparente nominal do gerador, logo este conversor é maior que os utilizados nos motores (VIANA, 2015).

2.3 Gerador de indução duplamente alimentado

O gerador de indução duplamente alimentada, também conhecido como Double Fed Generator (DFIG), é composto por um estator que é conectado diretamente à rede de energia elétrica e um circuito de rotor que é alimentado por um conversor estático bidirecional na topologia back-to-back. Esse conversor é responsável por regular a frequência de excitação do rotor, o que é fundamental para o controle da geração de energia elétrica (VIANA, 2015).

Figura 2 – Gerador de indução duplamente alimentado

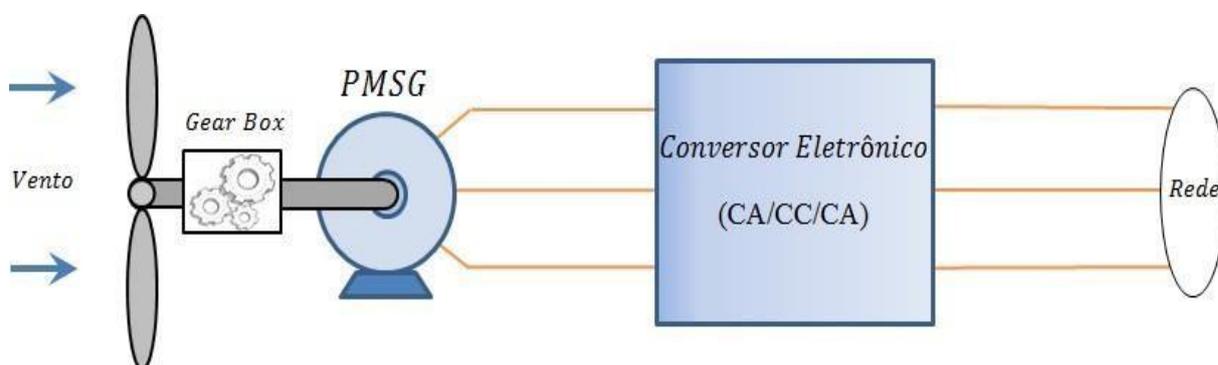


Fonte: Guilherme Viana Santos (2015)

O conversor eletrônico para o gerador de indução duplamente alimentado pode ser dimensionado de 25% a 30% da potência nominal do motor, permitindo o controle total completo da potência ativa e reativa, garantindo assim um menor impacto na rede elétrica. Este tipo de gerador precisa de mecanismos mecânicos como uma caixa de transmissão acoplada e anéis deslizantes no rotor. Os distúrbios da rede elétrica são diretamente transmitidos ao gerador (VIANA, 2015).

2.4 Gerador síncrono a ímãs permanentes

Figura 3 - Gerador síncrono a ímãs permanentes



Fonte: Guilherme Viana Santos (2015)

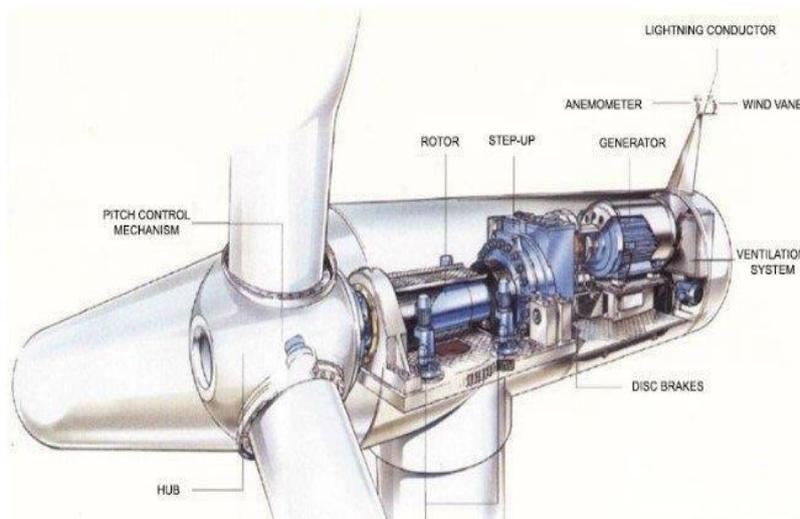
O gerador síncrono a ímãs permanentes, *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG), é conectado à rede através de um conversor de potência plena,

esta tecnologia tem como principais vantagens a sua capacidade de atuar em diferentes faixas de velocidade do vento, incluindo as altas, sua caixa de transmissão pode ser suprimida para geradores com elevados números de polos diminuindo os problemas mecânicos do sistema, possui controle completo de potência ativa e reativa, não possuem escovas. Porém, este tipo de gerador possui elevados custos em sua fabricação (VIANA, 2015).

2.5 Componentes dos geradores eólicos

Deve- As turbinas de eixo horizontal são amplamente utilizadas na geração de energia eólica em escala comercial e residencial, e os principais componentes utilizados na construção de turbinas eólicas de eixo horizontal estão descritos na figura 1.1.

Figura 4 – Componentes construtivos de turbinas eólicas



Fonte: Portal energias (2018)

Controlador pitch: Regula o ângulo de ataque das pás de rotor;

Rotor: Responsável por converter a energia cinética dos ventos em energia mecânica de rotação;

Caixa de multiplicação: Multiplica a baixa velocidade de rotação de entrada do sistema, para alta rotação na saída no eixo secundário;

Gerador elétrico: Responsável pela conversão da energia mecânica de rotação em energia elétrica;

Anemômetro: Equipamento responsável para indicar a velocidade e direção do vento;

Mecanismo de controle: Equipamento responsável pela orientação do rotor, controle de velocidade e controle de carga;

Torre: Responsável por elevar, sustentar e posicionar o gerador em uma altura conveniente;

Transformador: Equipamento que faz o acoplamento entre o aerogerador e a rede elétrica.

2.6 Curva de potência

A potência elétrica gerada por uma turbina eólica se dá pela função ao cubo da velocidade V do vento. A potência pode ser obtida através da seguinte equação:

$$P = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot v^3 \quad (1)$$

Onde:

P : Potência elétrica;

ρ : Densidade do ar [kg/m^3];

A : Área de varredura das pás do rotor [m^2];

v : Velocidade do vento [m/s];

C_p : Coeficiente aerodinâmico de potência do rotor, que depende da razão entre a velocidade tangencial da pá e a velocidade do vento e do ângulo pitch;

λ : Razão entre a velocidade tangencial da pá e a velocidade do vento. $\lambda = \omega \cdot r / v$ em que ω é a frequência [rad/s] e a velocidade angular do rotor, r [m] é o raio do rotor até a ponta da pá e v [m/s] é a velocidade do vento;

β : ângulo de inclinação do pitch.

De acordo com Custódio (2009), um gerador eólico ideal só tem capacidade de extração de apenas 59,3% da potência disponível no vento, já uma real, só conseguirá extrair parte deste total, por conta das perdas aerodinâmicas durante o processo de conversão de energia eólica.

A potência gerada em uma turbina eólica sofre variações proporcionais a variação da velocidade do vento, onde cada turbina tem sua curva característica de

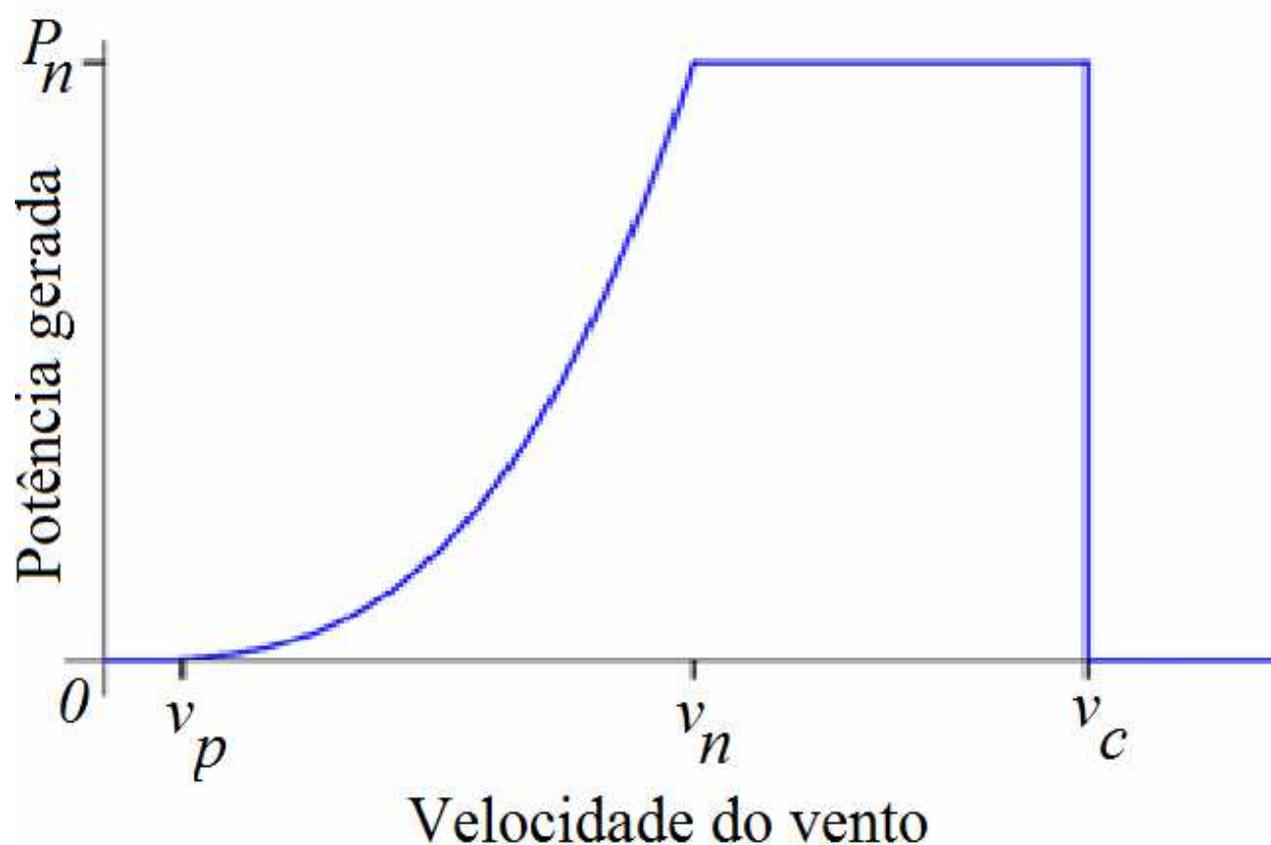
desempenho energético, com essa curva é possível fazer a previsão da produção de energia de uma turbina eólica, desconsiderando os detalhes técnicos dos seus componentes. Sendo assim, gráfico da curva de potência de um aerogerador é capaz de nos mostrar a produção máxima de energia elétrica em diferentes níveis de velocidade do vento. Ele nos aponta três pontos essenciais para a análise de desempenho, velocidade mínima, velocidade nominal e a velocidade de corte (HAWARY, 2018).

Velocidade mínima (V_p): Velocidade necessária para que a turbina consiga atuar;

Velocidade nominal (V_n): Geralmente é a velocidade ideal para o gerador atingir o máximo de potência a ser gerada;

Velocidade de corte (V_c): É a velocidade necessária para que o sistema de controle atue, desligando a turbina para evitar que a turbina seja danificada por operar em níveis de potências prejudiciais.

Figura 5 – Curva de Potência de turbinas eólicas



Fonte: José Francisco Moreira Pessanha (2010)

2.7 Fator de capacidade

O fator de capacidade é uma medida da eficiência operacional de uma usina de energia, geralmente expressa em percentual. Ele indica a quantidade de energia que a usina é capaz de produzir em relação à sua capacidade máxima de produção em um determinado período, como um ano (ENERGES, 2022).

O fator de capacidade é importante para determinar a viabilidade econômica de uma usina, bem como para planejar a geração de energia em uma rede elétrica. Usinas com fatores de capacidade mais altos são geralmente mais rentáveis e podem ser usadas para atender à demanda de energia de maneira mais eficiente (ENERGES, 2022).

A equação que descreve o fator de capacidade pode ser representada através da seguinte fórmula:

$$FC = (Et/Pxt) = \text{Energia anual} / (\text{potência} \times 8760) \quad (2)$$

Onde:

FC: É o fator de capacidade a ser calculado [%];

Et: É a energia produzida em um determinado período [MW];

P: É a potência instalada nominal instalada na usina [MW];

t: É o período em que a energia foi produzida [h].

Através da equação descrita na figura 5 podemos calcular o fator de capacidade de uma usina e assim realizar a análises profundas sobre as suas reais condições de funcionamento, por exemplo, se uma usina solar tem uma capacidade instalada de 100 MW e produz 80.000 MWh de eletricidade em um ano, seu fator de capacidade é de 80%. Isso significa que a usina produziu 80% da energia que poderia ter produzido se tivesse operado continuamente a plena capacidade durante todo o ano (ENERGES, 2022).

2.8 Modelos de turbinas instaladas no Sotavento

O parque eólico Sotavento possui 24 turbinas eólicas instaladas, com diferentes tecnologias e de diferentes modelos, dentre eles estão os seguintes modelos (Sotavento Galicia, S.A, 2020):

Tabela 1 – Descrição dos aerogeradores do Sotavento
CARACTERÍSTICAS DIFERENCIADORAS DE TURBINAS EÓLICAS

Tipos de turbina	Unidades instaladas	Potência (kW)	Tensão gerada (V)	Transformador (kVA)
Neg Micon NM-48 750	4	750	690	1,000
Gamesa G-47	4	660	690	775
Made AE-46	4	660	690	700
Izar-Bonus MK-IV	4	600	690	700
Ecotecnia 44/640	4	640 (2 x 320)	690	800
Neg Micon NM-52 900	1	900	690	1,000
Made AE-52	1	800	1,000	800
Made AE-61	1	1.32	690	1,400
Izar-Bonus 1.3 MW	1	1.3	690	1,600

Fonte: Sotavento Galicia (2020)

2.9 Linguagem de programação python

Python é uma linguagem de programação de alto nível, interpretada e multiplataforma. Ela foi criada em 1991 por Guido van Rossum, e seu nome é uma referência ao grupo de comédia britânico Monty Python (VAN ROSSUM, 1995).

Python é uma linguagem muito versátil e pode ser usada em diversos campos, como desenvolvimento web, análise de dados, inteligência artificial, automação, entre outros. Uma das razões para sua popularidade é sua sintaxe limpa e intuitiva, que a torna fácil de aprender e usar (GÉRON, 2017).

Outra característica importante do Python é sua comunidade ativa e colaborativa, que contribui para a criação de diversas bibliotecas e frameworks. Isso faz com que seja possível desenvolver soluções complexas de forma rápida e eficiente (VAN ROSSUM, 2000).

Uma das vantagens do Python é sua capacidade de lidar com uma grande quantidade de dados de forma eficiente, o que a torna uma escolha popular para análise de dados e aprendizado de máquina. Além disso, a linguagem suporta

programação orientada a objetos, funcional e procedural, dando aos desenvolvedores a flexibilidade de escolher a abordagem que melhor se adapta ao seu projeto (GÉRON, 2017).

A sintaxe do Python é bastante legível e consiste em blocos de código identados, o que a torna fácil de ler e entender. Isso também facilita a colaboração entre desenvolvedores, já que o código pode ser facilmente compartilhado e modificado (VAN ROSSUM, 1995).

Outra vantagem do Python é a disponibilidade de diversas ferramentas e recursos de desenvolvimento, incluindo ambientes de desenvolvimento integrado (IDEs), editores de código, depuradores, testadores e gerenciadores de pacotes (VAN ROSSUM, 2000).

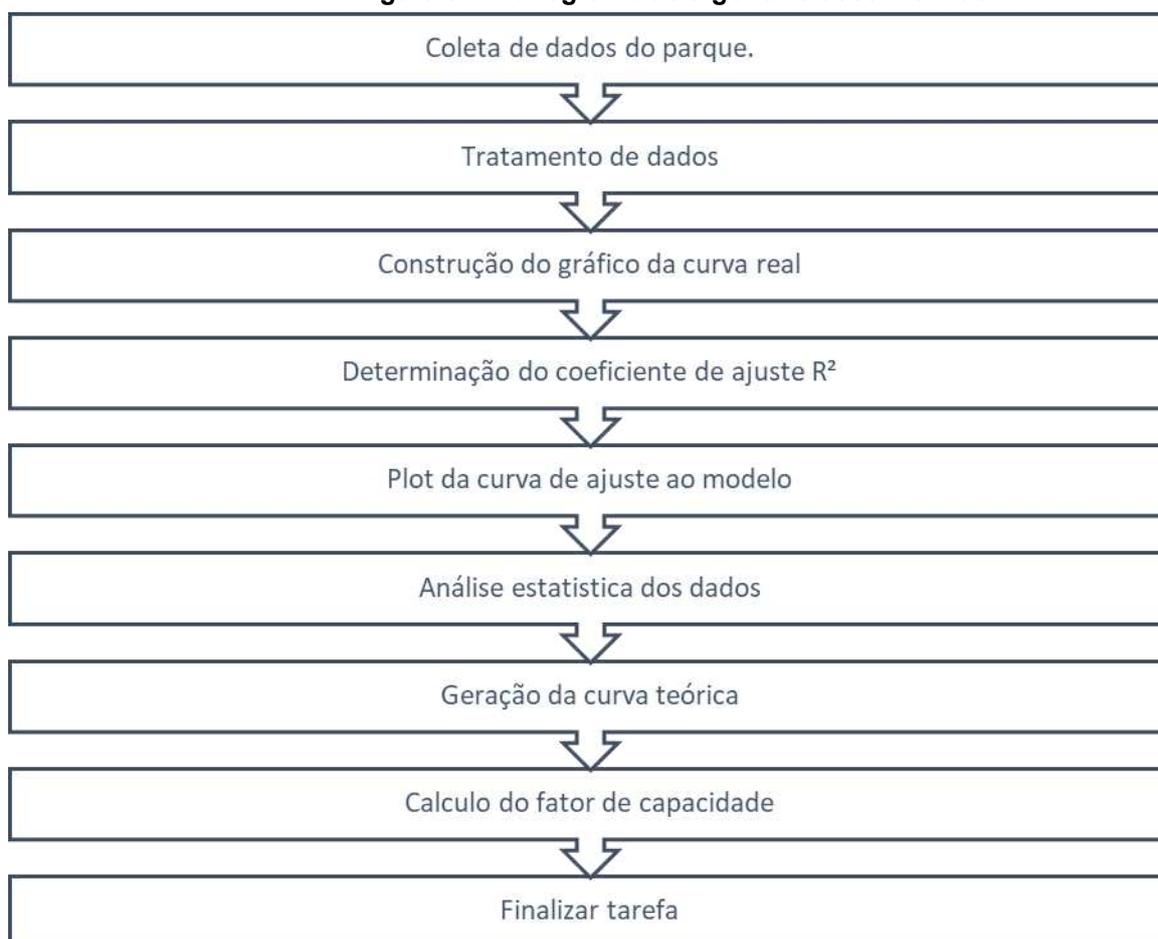
Em resumo, Python é uma linguagem de programação poderosa, fácil de aprender e usar, com uma comunidade ativa e muitas bibliotecas e frameworks disponíveis. Ela é uma escolha popular para desenvolvedores em diversos campos, incluindo análise de dados, aprendizado de máquina, desenvolvimento web e automação (GÉRON, 2017).

3 METODOLOGIA

3.1 Algoritmo desenvolvido

O fluxograma a seguir ilustra o funcionamento do algoritmo desenvolvido, destacando as etapas de coleta, tratamento e análise dos dados.

Figura 6 – Fluxograma do algoritmo desenvolvido



Fonte: Autoria própria (2023)

Parte Com o objetivo de avaliar o desempenho do parque eólico Sotavento, foi realizada a análise dos dados coletados, totalizando mais de 400 mil registros tratados. Esses dados foram coletados a cada intervalo de 10 minutos, abrangendo o período de 01/01/2020 a 05/12/2022. Para a realização dessa análise, foi desenvolvido um código para a análise de dados, utilizando a linguagem de programação Python por meio da plataforma Jupyter Notebook.

O código desenvolvido permite a análise de diversas variáveis, como a velocidade do vento, a potência gerada e o fator de capacidade do parque eólico. Com base nesses dados, é possível avaliar a eficiência da geração de energia elétrica do parque eólico e identificar possíveis melhorias para otimizar seu desempenho.

3.2 Coleta de dados

A coleta de dados foi realizada utilizando a página oficial do parque experimental Sotavento, que disponibiliza um histórico de dados de geração de energia ao longo dos anos. Essa fonte confiável fornece informações detalhadas sobre a produção de energia pelo parque, permitindo o acesso a dados relevantes para a análise. Os dados foram obtidos a partir dessa fonte e registrados em uma tabela no formato Excel, proporcionando uma organização estruturada e facilitando o tratamento e análise posterior dos dados.

3.3 Tratamento de dados

Após a coleta dos dados, uma etapa crucial foi o tratamento das informações. Essa etapa envolveu a utilização da plataforma Jupyter Notebook, uma ferramenta de programação interativa que suporta diversas linguagens de programação, incluindo o Python.

Inicialmente, a tabela de dados foi importada para o ambiente do Jupyter Notebook e transformada em um dataframe. Essa estrutura de dados tabular é amplamente utilizada para a manipulação e análise de dados no ambiente Python, permitindo a aplicação de uma série de operações e transformações.

Em seguida, foi realizada a exclusão dos dados irrelevantes para a análise em questão, como informações sobre direção e data. Essa exclusão possibilitou a redução do volume de dados, focalizando apenas nas variáveis essenciais para a análise da geração de energia.

Outro passo importante no tratamento dos dados foi a remoção de registros vazios ou com informações ausentes relacionadas à velocidade do vento e à energia gerada. Essa limpeza dos dados foi necessária para garantir a consistência e

confiabilidade das análises subsequentes, evitando distorções causadas por informações faltantes.

Além disso, foi realizada a conversão dos valores de energia para potência, permitindo uma análise mais adequada dos dados, pois a potência é uma medida mais diretamente relacionada à capacidade de geração de energia das turbinas eólicas.

Após a conversão para potência, os dados cujas velocidades do vento estavam abaixo de 3,5 m/s ou acima de 25 m/s foram excluídos. Essa ação foi baseada nas faixas de operação estabelecidas para o parque experimental Sotavento, que determinam os limites mínimo e máximo de velocidade do vento para a operação eficiente das turbinas. Portanto, os dados distantes dessas faixas foram considerados irrelevantes para a análise em questão.

Também foram identificados e removidos os dados discrepantes, que podem ser originados por erros de leitura ou medição. Essas inconsistências foram eliminadas para garantir a confiabilidade e integridade dos resultados.

3.4 Cálculo de média para curva real

Para realizar a descrição da curva de potência foi calculada a média simples da potência em relação a diferentes valores de velocidade.

Para calcular a média, a abordagem utilizada foi a média aritmética, que é uma das formas mais comuns de se obter uma média. Essa equação é definida pela soma dos valores e a divisão pelo número total de elementos. No caso do cálculo da média da potência para cada valor de velocidade, a equação de média utilizada pode ser expressa da seguinte forma:

$$\text{Média} = \text{Soma das potências} / \text{Número total de potências} \quad (3)$$

Ao agrupar os dados pelo valor de velocidade, todas as potências correspondentes a um valor específico de velocidade foram somadas, resultando na soma das potências para esse grupo. Em seguida, essa soma foi dividida pelo número de potências existentes nesse grupo, obtendo-se assim a média da potência para aquele valor de velocidade específico.

Dessa forma, a equação de média usada neste caso particular foi a média aritmética, onde a média da potência para cada valor de velocidade foi calculada somando-se as potências correspondentes a esse valor e dividindo-se pelo número de potências nesse grupo. Essa abordagem permite obter um valor representativo da potência para cada valor específico de velocidade considerado.

3.5 Cálculo do coeficiente de determinação R^2

Para obter o coeficiente de determinação, R^2 , em um modelo de regressão onde a variável dependente é a potência e a variável independente é a velocidade, foram seguidos os seguintes procedimentos:

- Ajuste do modelo de regressão: Foi realizado o ajuste de um modelo de regressão adequado, que relaciona a potência com a velocidade. Esse ajuste envolveu a escolha de um modelo específico, como regressão linear simples, e a estimativa dos coeficientes do modelo que melhor se ajustam aos dados.
- Cálculo da soma dos quadrados totais (SST): Foi calculada a SST, que representa a soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados da potência e a média dos valores observados da potência. A fórmula utilizada foi:

$$SST = \sum(y - \bar{y})^2 \quad (4)$$

Onde y representa o valor observado da potência e \bar{y} é a média dos valores observados da potência.

- Cálculo da soma dos quadrados dos resíduos (SSE): Foi calculada a SSE, que corresponde à soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados da potência e as previsões do modelo para a potência. A fórmula utilizada foi:

$$SSE = \sum(y - \hat{y})^2 \quad (5)$$

onde y representa o valor observado da potência e \hat{y} é a previsão do modelo para esse valor de potência correspondente à velocidade.

Cálculo do coeficiente de determinação, R^2 : Utilizando a fórmula abaixo, foi calculado o coeficiente de determinação, R^2 :

$$R^2 = 1 - (SSE / SST) \quad (6)$$

Quanto mais próximo R^2 estiver de 1, melhor o modelo explica a variação dos dados de potência em relação à velocidade. Um valor próximo de 0 indica que o modelo não é capaz de explicar a variação observada.

Por meio desses procedimentos, foi possível avaliar o ajuste do modelo de regressão aos dados, bem como determinar o quanto a velocidade pode explicar a variação observada na potência.

3.6 Cálculo da curva teórica

Para o cálculo da potência teórica foram realizadas as seguintes etapas:

- Coleta de informações do datasheet: Foram obtidos os datasheets de cada turbina no parque eólico, que contêm os dados técnicos e características específicas de cada turbina, como potência nominal, curva de potência, velocidade de corte, velocidade nominal, entre outros.
- Somatória dos pontos de geração: A partir das informações coletadas nos datasheets, foram considerados os pontos de geração de potência em uma faixa de velocidade de vento de 0 a 25 m/s. Esses pontos de geração foram somados para todas as turbinas do parque eólico.

Ao somar os pontos de geração, foi possível obter uma visão geral da potência gerada em cada faixa de velocidade de vento dentro do intervalo considerado.

3.7 Construção gráfica

Após o tratamento dos dados, foi realizada a construção de um gráfico de dispersão que representa a curva S do parque experimental Sotavento. Essa curva é amplamente utilizada na análise de dados de geração de energia eólica, fornecendo uma representação visual dos dados coletados.

Para a construção do gráfico, utilizou-se a biblioteca Plotly do Python, que oferece diversas funcionalidades gráficas, permitindo a criação de visualizações interativas e de alta qualidade. Com a utilização dessa biblioteca, foi possível gerar um gráfico de dispersão que ilustra a relação entre a velocidade do vento e a potência gerada pelo parque experimental Sotavento.

3.8 Construção da curva de ajuste ao modelo R^2

Uma vez encontrado o melhor coeficiente de ajuste, esse valor foi plotado juntamente com a curva real, proporcionando uma visualização comparativa entre a curva ajustada e os dados reais coletados. Essa análise comparativa permitiu avaliar a qualidade do ajuste da curva e a capacidade do modelo em representar a geração de energia pelo parque.

3.9 Construção da curva teórica

Além disso, foi gerada uma nova tabela contendo informações detalhadas sobre a geração de energia de cada uma das 24 turbinas presentes no parque. Essa tabela foi utilizada para realizar a soma ponto a ponto da geração de cada turbina, resultando em uma curva teórica de geração de energia para o parque como um todo. Essa curva teórica também foi plotada utilizando a biblioteca Plotly, permitindo uma comparação visual entre a curva teórica e a curva real.

3.10 Análise estatística dos dados

Após a construção dos gráficos, realizou-se uma análise estatística dos dados para obter informações relevantes sobre o comportamento das curvas de geração de energia. Para isso, foi desenvolvido um algoritmo utilizando a biblioteca numpy do Python.

Esse algoritmo permitiu calcular várias medidas estatísticas, incluindo média, mediana, desvio padrão, variância, valor máximo, amplitude, percentil 25 e percentil 75 de cada curva. Essas medidas estatísticas fornecem insights valiosos sobre a distribuição e características dos dados, permitindo uma análise mais aprofundada e

uma melhor compreensão dos padrões de geração de energia pelo parque experimental Sotavento.

Essas informações estatísticas são essenciais para uma análise aprofundada e uma interpretação mais precisa dos dados de geração de energia. Elas permitem identificar tendências, variações e características específicas das curvas, contribuindo para uma melhor compreensão do desempenho e comportamento do parque experimental Sotavento em relação à geração de energia eólica.

3.11 Cálculo do fator de capacidade

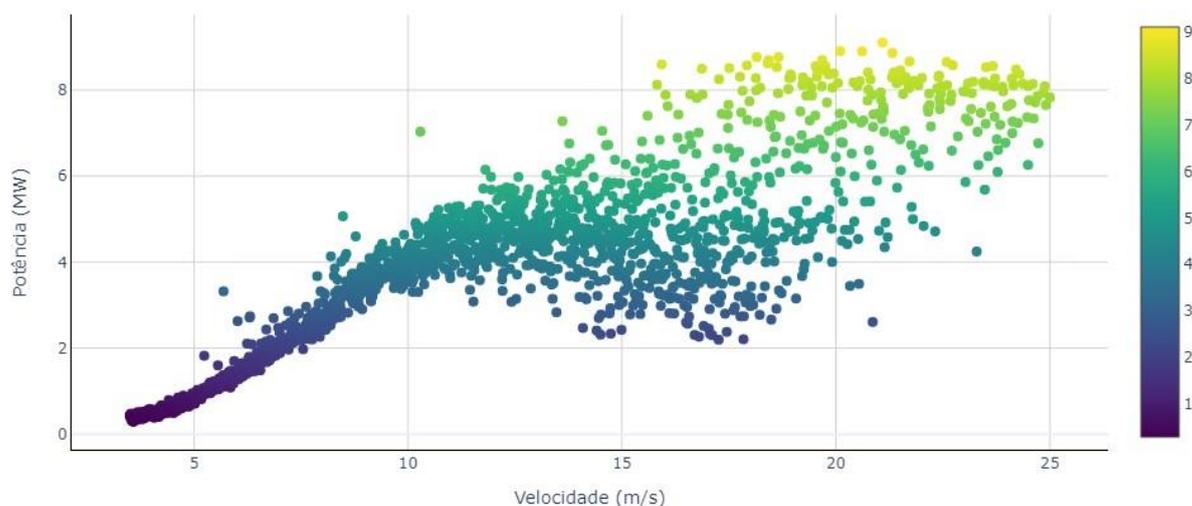
Após a análise estatística do modelo, foram coletados os dados da geração de energia mensal do parque no ano de 2021. Com base nesses dados, realizaram-se os cálculos para encontrar o fator de capacidade do parque.

4 RESULTADOS

4.1 Curva de potência real

Através da figura 7 é possível observar a curva de potência real do parque eólico de Sotavento, que foi gerada com base no algoritmo mencionado anteriormente. Essa curva oferece informações valiosas para a análise do desempenho real do parque eólico, permitindo uma avaliação mais precisa e detalhada de sua operação. Com essa curva, é possível identificar eventuais variações no desempenho ao longo do tempo, bem como comparar a geração real de energia com a capacidade máxima do parque. Dessa forma, é possível obter um melhor entendimento sobre o comportamento do parque eólico e buscar possíveis melhorias para otimizar sua operação e maximizar sua eficiência energética.

Figura 7 – Curva de potência do parque eólico Sotavento



Fonte: Autoria própria (2023)

Com base nas informações fornecidas sobre a curva S modelada, foi realizada uma análise estatística detalhada de seu comportamento.

Tabela 02 - Análise estatística da curva real

Métrica	Valor
Média	3.97
Mediana	4.05
Desvio Padrão	2.07
Variância	4.27
Máximo	9.11
Mínimo	0.29
Range	8.81
Primeiro quartil	2.51
Terceiro quartil	5.02

Fonte: Autoria própria (2023)

A média da curva S foi calculada em aproximadamente 3.97 MW, indicando a produção média de energia eólica no parque.

A mediana foi determinada em cerca de 4.05 MW, evidenciando que metade dos dados de produção estão abaixo desse valor e a outra metade acima. Essa medida é uma medida de tendência central robusta e menos influenciada por valores extremos.

O desvio padrão da curva S foi calculado em aproximadamente 2.07, representando a dispersão dos dados em relação à média. Quanto maior o desvio padrão, maior é a variabilidade dos dados.

A variância foi calculada em aproximadamente 4.27, fornecendo uma medida adicional da dispersão dos dados.

O valor máximo registrado na curva S foi de aproximadamente 9.11 MW, representando o pico máximo de produção de energia eólica durante o período analisado.

O valor mínimo foi de cerca de 0.29 MW, indicando o ponto mais baixo de produção no parque.

O range da curva S foi calculado em aproximadamente 8.81 MW, fornecendo uma visão da amplitude total dos dados.

O primeiro quartil, correspondendo a 25% dos dados abaixo desse valor, foi determinado em cerca de 2.51 MW.

O terceiro quartil, correspondendo a 25% dos dados acima desse valor, foi calculado em aproximadamente 5.02 MW.

Essas análises revelam que a curva S modelada do Parque Eólico Experimental Sotavento apresenta uma distribuição assimétrica. A produção média de energia eólica é de aproximadamente 3.97 MW, com uma mediana de 4.05 MW.

A variabilidade dos dados é moderada, conforme indicado pelo desvio padrão de 2.07 MW e variância de 4.27 MW². Além disso, foram registrados valores máximos de produção de energia eólica de 9.11 MW e mínimos de 0.29 MW.

A análise dos quartis revela uma distribuição desigual dos dados em ambos os lados da curva. Observa-se uma concentração relativamente maior de dados abaixo do terceiro quartil (5.02) em comparação com acima do primeiro quartil (2.51).

4.2 Análise da curva de regressão

Com base nos dados descritos na curva real do parque, foi realizada uma busca pelos melhores coeficientes de ajuste entre 1 e 10 através do código desenvolvido. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela abaixo:

Tabela 03 - Valores de regreção com graus entre 1 e 10

Grau	R ²
1	0.719664
2	0.737623
3	0.771606
4	0.771611
5	0.795823
6	0.795897
7	0.799400
8	0.799736
9	0.799853
10	0.799971

Fonte: Autoria própria (2023)

Com base nos dados de R² fornecidos, podemos fazer uma análise do ajuste dos modelos de regressão polinomial em relação ao grau do polinômio.

Ao observar os valores de R², que representam a proporção da variabilidade dos dados explicada pelo modelo, podemos perceber que à medida que o grau do polinômio aumenta, o R² também aumenta. Isso indica que os modelos de regressão polinomial estão se ajustando cada vez melhor aos dados à medida que se tornam mais complexos.

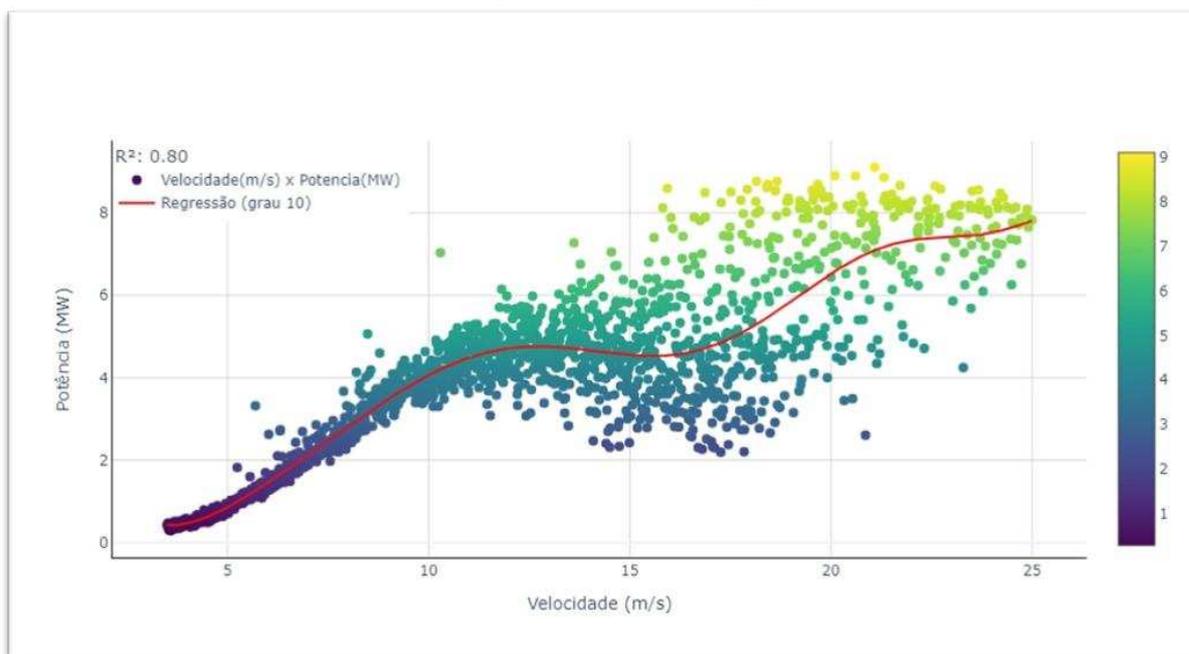
No início da sequência, com grau 1 e 2, os valores de R² estão relativamente baixos, indicando que esses modelos explicam uma menor proporção da variabilidade dos dados.

No entanto, a partir do grau 3, os valores de R² começam a aumentar significativamente, indicando um melhor ajuste aos dados. Esse aumento continua até o grau 5, onde o R² atinge o valor de 0.795823, indicando que esse modelo de polinômio de grau 5 explica cerca de 79,6% da variabilidade dos dados.

A partir do grau 6, os valores de R² continuam aumentando, mas em um ritmo mais lento. Isso sugere que a adição de termos de maior grau ao modelo não contribui significativamente para explicar a variabilidade dos dados.

Nos graus 7, 8, 9 e 10, os valores de R² ficam em torno de 0.799, indicando uma estabilização do ajuste do modelo. Isso sugere que a adição de mais termos de maior grau não melhora significativamente a capacidade de explicação dos dados.

Figura 8 – Curva de regressão



Fonte: Autoria própria (2023)

Portanto, pode-se concluir que, com base nos dados fornecidos, não há necessidade de usar um polinômio de grau superior a 10, uma vez que não há ganhos substanciais na qualidade do ajuste além desse ponto.

Através da escolha do melhor grau de ajuste o algoritmo foi capaz de nos dar a equação que descreve a linha de tendência dos dados.

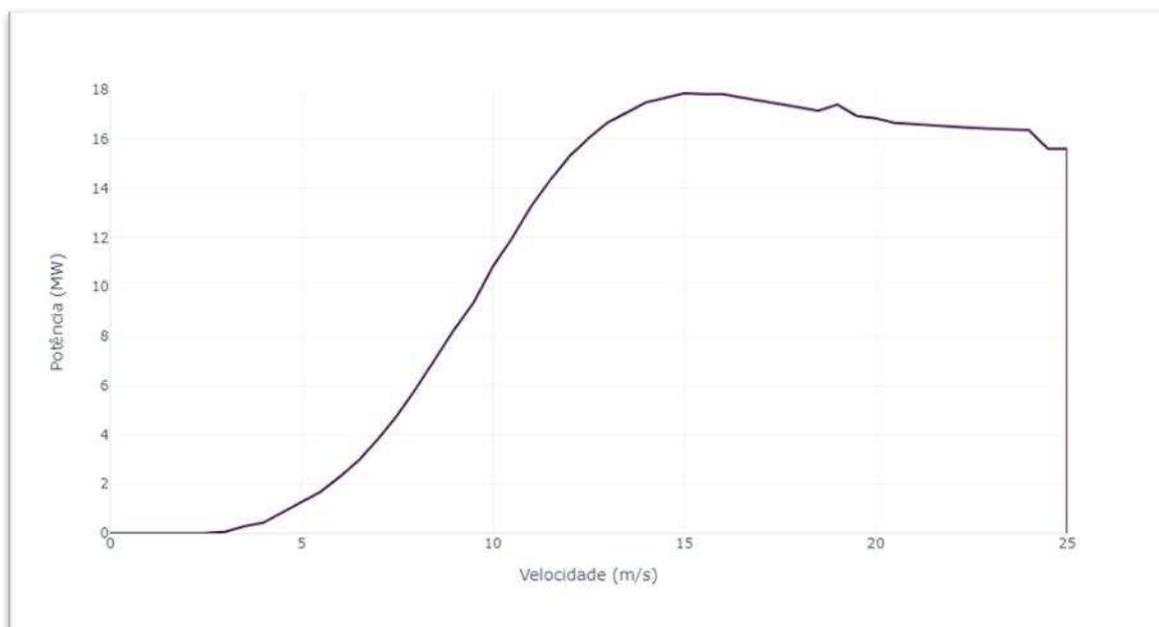
$$f(x) = -1.23e-09 x^{10} + 1.674e-07 x^9 - 9.862e-06 x^8 + 0.0003306 x^7 - 0.006973 x^6 + 0.09662 x^5 - 0.8898 x^4 + 5.356 x^3 - 19.99 x^2 + 41.8 x - 37.06$$

4.3 Curva de potência teórica

A partir dos dados coletados na tabela 1, foi possível somar todos os principais pontos de produção de energia em relação à velocidade do vento de cada turbina presente no parque eólico em análise. A partir desse cálculo, foi possível construir a curva de geração teórica do parque eólico estudado, que foi ilustrada na figura 9 abaixo. A curva gerada é uma representação gráfica do potencial máximo de geração de energia do parque eólico, considerando as características técnicas de cada turbina. A partir da análise dessa curva, é possível obter importantes

informações sobre o desempenho do parque eólico e sua capacidade de geração de energia elétrica em diferentes condições de vento.

Figura 9 – Curva de potência teórica do parque eólico Sotavento



Fonte: Autoria própria (2023)

Com base nos dados fornecidos da relação de velocidade x potência da curva S teórica do parque eólico, podemos realizar uma análise estatística descrita na tabela abaixo:

Tabela 04 - Análise estatística da curva teórica

Métrica	Valor
Média	11.09
Mediana	15.60
Desvio Padrão	7.04
Variância	49.50
Máximo	17.86
Mínimo	0.00
Range	17.86
Primeiro quartil	3.18
Terceiro quartil	16.91

Fonte: Autoria própria (2023)

Média: A média representa o valor médio de energia que deveria ser gerada. Neste caso, a média é de 11.09 MW.

Máximo: O valor máximo representa o valor de máxima geração de energia que deveria ser produzida no parque. Neste caso, o máximo é de 17.86 MW.

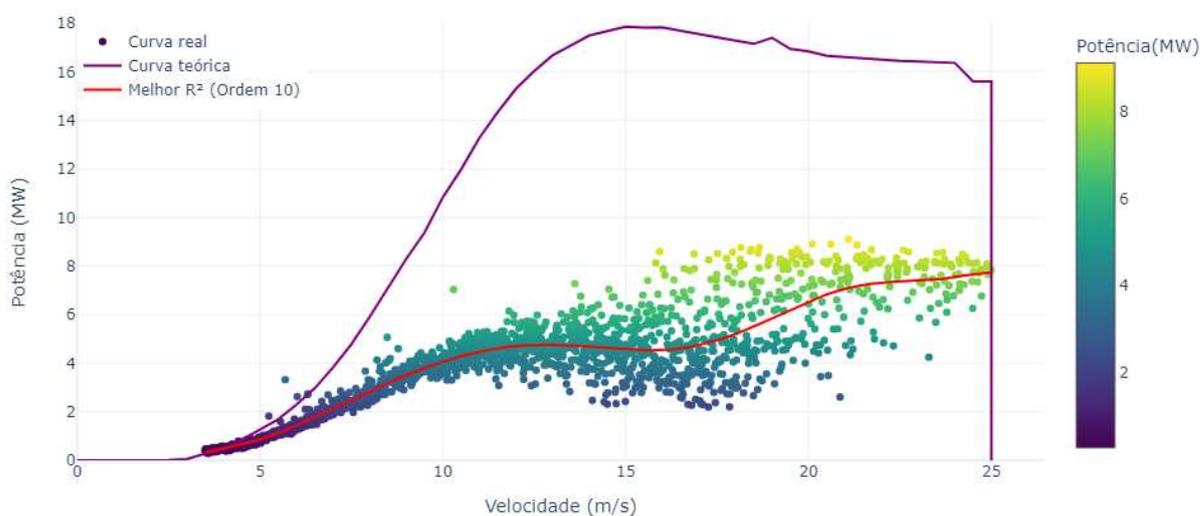
Mínimo: O valor mínimo é a representação do mínimo de energia que deveria ser gerada. Neste caso, o mínimo é de 0.00 MW, o que indica que todas as turbinas estão desligadas.

Range: O range é a diferença entre o valor máximo e o valor mínimo de geração de energia do parque. Neste caso, o range é de 17.86 MW, indicando qual deveria ser a faixa de operação.

4.4 Curva teórica X curva real

Agora com as duas curvas geradas podemos realizar a análise de comportamento da geração real em relação a geração teórica através da ilustração a seguir.

Figura 10 – Curva teórica x curva real



Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 05 - Análise estatística de comparação entre curvas

Métrica	Curva real	Curva teórica
Média	3.97	11.09
Mediana	4.05	15.60
Desvio Padrão	2.07	7.04
Variância	4.27	49.50
Máximo	9.11	17.86
Mínimo	0.29	0.00
Range	8.81	17.86
Primeiro quartil	2.51	3.18

Terceiro quartil	5.02	16.91
------------------	------	-------

Fonte: Autoria própria (2023)

Com base na análise estatística realizada, podemos inferir algumas informações sobre o parque eólico em questão:

Desempenho: A comparação entre a curva real e a curva teórica sugere que o desempenho real do parque eólico é inferior ao esperado teoricamente. Isso é indicado pela média e mediana mais baixas na curva real em comparação com a curva teórica.

Extremos: O valor máximo observado na curva real é 9.11 MW, enquanto na curva teórica é 17.86 MW. Isso indica que, embora os valores teóricos esperem um pico de produção de energia mais alto, a realidade do parque eólico mostra que esse pico é limitado em 51%.

O valor mínimo observado na curva real é 0.29 MW, indicando que o parque eólico é capaz de gerar energia mesmo em condições de baixa velocidade do vento. Já na curva teórica, o valor mínimo é 0.00 MW, considerando uma condição idealizada onde todas as turbinas estão desligadas.

4.5 Fator de capacidade do parque eólico Sotavento

Com base nos dados obtidos na geração de energia total do ano de 2021 podemos utilizar a equação 2 e assim calcular o fator de capacidade total do parque Sotavento.

Tabela 06 - Produção de energia mensal no ano de 2021

Ano 2021	Energia Produzida	Fator de capacidade mensal	Velocidade Média Mensal
Janeiro	5559.157	0.433672185	7.141612903
Fevereiro	10619.275	0.828414126	8.157857143
Março	8322.088	0.649209598	6.118387097
Abril	8312.852	0.648489094	5.54
Mai	10282.079	0.802109324	5.532258065
Junho	7371.176	0.575028552	4.830740741
Julho	5902.416	0.460449964	5.144193548
Agosto	6072.792	0.473741068	3.911290323
Setembro	5955.136	0.464562674	3.824
Outubro	8925.329	0.696268683	5.452903226
Novembro	9981.427	0.778655334	6.623666667
Dezembro	10921.749	0.852010251	10.4216129

Fonte: Autoria própria (2023)

O Parque Eólico Sotavento, em particular, foi avaliado utilizando a equação 02 e um algoritmo desenvolvido especificamente para esse fim, resultando na obtenção precisa do seu fator de capacidade. O resultado obtido foi de 65,95%, o que significa que o parque eólico é capaz de gerar em média quase dois terços da energia que seria possível se estivesse operando continuamente a sua capacidade máxima. Esse valor representa um desempenho satisfatório para o Parque Eólico Sotavento.

No entanto, é importante destacar que esse valor poderia ser ainda melhor se os geradores ultrapassados fossem substituídos por equipamentos mais modernos e eficientes. Os geradores ultrapassados podem limitar a capacidade de geração de energia do parque eólico e aumentar seus custos de manutenção e operação. Portanto, a substituição desses equipamentos pode aumentar ainda mais a eficiência do Parque Eólico Sotavento e sua capacidade de gerar energia elétrica de maneira sustentável e eficiente.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados, podemos concluir que o parque eólico de Sotavento possui um desempenho real inferior ao esperado teoricamente, indicando menor eficiência na conversão da energia cinética do vento em energia elétrica.

A análise da curva de regressão polinomial revelou que modelos de grau mais elevado se ajustam melhor aos dados, mas a partir do grau 6 não há ganhos substanciais na qualidade do ajuste, sugerindo que um polinômio de grau superior a 10 não é necessário para descrever os dados com precisão.

A curva de geração teórica mostrou que o potencial máximo de geração de energia do parque é de 17.86 MW, porém, o valor máximo observado na curva real foi de apenas 9.11 MW, representando cerca de 51% do potencial máximo. Além disso, o parque demonstrou ser capaz de gerar energia mesmo em condições de baixa velocidade do vento, com um valor mínimo observado de 0.29 MW.

O fator de capacidade do parque eólico de Sotavento foi calculado em 65,95%, o que significa que o parque é capaz de gerar em média quase dois terços da energia possível se estivesse operando continuamente a sua capacidade máxima. Embora seja um valor satisfatório, a substituição de geradores ultrapassados por equipamentos mais modernos e eficientes poderia melhorar ainda mais a capacidade de geração de energia do parque.

Uma das principais limitações do parque é a tecnologia utilizada, que apresenta baixa eficiência em certos pontos da curva de potência. No entanto, o retrofit com conversores de carga total pode ser uma opção viável para aumentar a eficiência e a capacidade de geração do parque, sem substituir todas as máquinas e reduzindo significativamente os custos de modernização.

Essa modernização traz benefícios como melhoria da eficiência e capacidade de geração, permitindo operar no potencial máximo do parque, além de contribuir para a redução dos custos operacionais e aumentar a vida útil dos equipamentos.

Em resumo, o parque eólico de Sotavento apresenta um desempenho real abaixo do esperado, porém, seu fator de capacidade é satisfatório. Para otimizar sua operação e maximizar a eficiência energética, recomenda-se considerar melhorias como a substituição de equipamentos ultrapassados por tecnologias mais eficientes,

o que pode aumentar a produção de energia eólica e aproveitar melhor o potencial do parque.

Além disso, o estudo ressaltou a importância da análise da curva de potência na avaliação da capacidade de geração de um parque eólico, bem como a relevância da modernização por meio do retrofit com conversores de carga total. Essas melhorias podem ser impulsionadas pelo uso de algoritmos em linguagens de programação como Python, em plataformas como Jupyter Notebook, que oferecem uma maneira eficaz de processar e analisar grandes volumes de dados, proporcionando resultados precisos e confiáveis não apenas na análise da curva de potência, mas também em outros aspectos da geração de energia renovável, como a análise de dados de velocidade do vento e a previsão da produção de energia eólica.

5.1 Estudos futuros

Com base nos resultados e conclusões deste estudo sobre o parque eólico de Sotavento, existem várias oportunidades para pesquisas futuras que podem contribuir para a melhoria contínua da eficiência e da capacidade de geração de energia renovável. Algumas sugestões para estudos futuros são:

- **Análise de tecnologias avançadas de conversão de energia:** Investigar e avaliar o desempenho de tecnologias emergentes de conversão de energia, como aerogeradores de eixo vertical ou sistemas híbridos que combinam energia eólica com outras fontes renováveis. Essas tecnologias podem oferecer vantagens em termos de eficiência, capacidade de adaptação a diferentes condições de vento e redução de impactos ambientais.
- **Otimização do arranjo dos aerogeradores:** Realizar estudos de otimização do layout do parque eólico, considerando fatores como a direção e a velocidade do vento, a influência de obstáculos no terreno e a interação entre os aerogeradores. Essas análises podem ajudar a identificar o posicionamento ideal dos aerogeradores para maximizar a geração de energia e minimizar as perdas por interferência.
- **Análise de dados de velocidade do vento:** Aprofundar a análise dos dados de velocidade do vento coletados no parque eólico de Sotavento, explorando

técnicas estatísticas avançadas e modelos de previsão para obter uma compreensão mais precisa do comportamento do vento na região. Isso pode permitir um melhor dimensionamento dos aerogeradores e uma previsão mais precisa da produção de energia eólica.

- Estudos de viabilidade econômica: Realizar análises de viabilidade econômica para avaliar o retorno do investimento em melhorias no parque eólico. Isso inclui considerar os custos de modernização, os benefícios esperados em termos de aumento da geração de energia, redução dos custos operacionais e prolongamento da vida útil dos equipamentos. Essas análises podem ajudar na tomada de decisões estratégicas para maximizar os benefícios financeiros e ambientais do parque.

Esses estudos futuros podem contribuir para o avanço do conhecimento e aprimoramento da tecnologia de energia eólica, impulsionando a transição para uma matriz energética mais sustentável e eficiente. Com a evolução contínua da tecnologia e a realização de pesquisas nesses tópicos, será possível explorar todo o potencial da energia eólica e maximizar os benefícios ambientais e econômicos dos parques eólicos, como o de Sotavento.

REFERÊNCIAS

- AMARANTE, O. A. C.; BROWER, M.; ZACK, J.; DE SÁ, A. L. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2001.
- ANAYA-LARA, O.; JENKINS, N.; EKANAYAKE, J. Wind Energy Generation: Modelling and Control. 1. ed. Chichester: Wiley, 2009.
- CHAPMAN, S. J. Electric Machinery Fundamentals. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2011.
- EL-HAWARY, M. E. Electrical Power Systems: Design and Analysis. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- ENERGES. Fator de Capacidade. Disponível em: <https://energes.com.br/fator-de-capacidade/>. Acesso em: 11 ago. 2022.
- FIELD, A. Descobrimo a estatística usando o SPSS. Porto Alegre: Artmed, 2009.
- FUNDAÇÃO de Interesse Galego. Fundación Sotavento Galicia. [S. l.], 16 dez. 2021. Disponível em: <https://www.sotaventogalicia.com/fundacion-sotavento-galicia/#empresa>. Acesso em: 18 jun. 2022.
- FUNIONAMENTO DE AEROGERADOR. [S. l.], 23 fev. 2022. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/pt-br/te-interessa/meio-ambiente/Paginas/como-funciona-um-aerogerador.aspx>. Acesso em: 19 jun. 2022.
- GERON, Aurélien. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems. O'Reilly Media, 2017.
- HAIR, J. F. et al. Análise multivariada de dados. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- IPCC. Special report on renewable energy Sources and climate change Mitigation, 2011. Disponível em: http://srren.ipccwg3.de/report/IPCC_SRREN_Full_Report.pdf. Acesso em: 29 out. 2011.
- ITAIPU BINACIONAL. Unidades Geradoras. 2020. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/energia/unidades-geradoras>. Acesso em: 23 mai. 2020.
- KIRTLEY, J. L. Electric Power Principles: Sources, Conversion, Distribution and Use. 2. ed. Hoboken: Wiley, 2014.
- MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. Estatística básica. 9. ed. São Paulo: Saraiva, 2017.
- PINTO, Milton de Oliveira. Fundamentos de energia eólica. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- POHLENZ, Vitor. Aplicação de Machine Learning e Ferramentas Estatísticas para Modelagem e Análise de Falhas em Aerogeradores. 2020. 109 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel) - Faculdade de Engenharia elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

SILVA, G. B. D. O. E. Desenvolvimento de uma Turbina Eólica de Eixo Vertical. Universidade Técnica de Lisboa, 2011. 98 p.

SOHONI, V.; GUPTA, S.; NEMA, R. A critical review on wind turbine power curve modelling techniques and their applications in wind based energy systems. Journal of Energy, Hindawi, v. 2016, 2016.

VAN ROSSUM, Guido. Tutorial de Python. Relatório técnico, Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam, 1995.

VAN ROSSUM, Guido. Python Reference Manual. Network Theory Ltd., 2000.