

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS CACHOEIRA DO SUL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

André Vinícius Lima do Nascimento

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE SIMULAÇÃO DE
TURBINAS EÓLICAS**

Cachoeira do Sul, RS
2024

André Vinícius Lima do Nascimento

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE SIMULAÇÃO DE TURBINAS
EÓLICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, da
Universidade Federal de Santa Maria, campus
Cachoeira do Sul (UFSM-CS, RS), como requi-
sito parcial para obtenção de grau de **Bacharel
em Engenharia Elétrica**.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Gustavo Guilherme Koch

Cachoeira do Sul, RS
2024

André Vinícius Lima do Nascimento

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE SIMULAÇÃO DE TURBINAS
EÓLICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, da
Universidade Federal de Santa Maria, campus
Cachoeira do Sul (UFSM-CS, RS), como requi-
sito parcial para obtenção de grau de **Bacharel
em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 7 de agosto de 2024:

Gustavo Guilherme Koch, Dr. (UFSM)

Dion Lenon Prediger Feil, Dr. (UFSM)

Diogo Ribeiro Vargas, Dr. (UFSM)

Cachoeira do Sul, RS
2024

RESUMO

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE SIMULAÇÃO DE TURBINAS EÓLICAS

AUTOR: André Vinícius Lima do Nascimento

ORIENTADOR: Gustavo Guilherme Koch

O aumento da necessidade de geração de energia elétrica devido ao crescimento populacional e à expansão econômica destaca a urgência de soluções energéticas eficientes e sustentáveis. A energia eólica surge como uma alternativa viável para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e minimizar os impactos ambientais. No Brasil, a energia eólica tem ganhado importância, contribuindo significativamente para a matriz energética do país, que é uma das mais limpas do mundo.

O presente trabalho tem como objetivo principal desenvolver um simulador de turbina eólica de velocidade variável, bem como um sistema de supervisão para testar a turbina em diferentes regimes de vento e pontos de operação. Os objetivos específicos incluem a revisão da literatura sobre sistemas de conversão eólica, desenvolvimento de modelos matemáticos de comportamento do vento, obtenção do perfil médio de vento para um cenário de estudo, aquisição da série temporal do vento incluindo turbulência e rajadas, desenvolvimento de um sistema de controle para uma turbina eólica estudada, implementação de uma plataforma de simulação com modelagem e análise dos componentes de uma turbina eólica e avaliação do desempenho do sistema de emulação em diferentes cenários operacionais.

A metodologia envolve o uso do *software* MATLAB/SIMULINK para modelagem e simulação das séries temporais do vento e do sistema de emulação do aerogerador. A modelagem da série temporal do vento inclui a utilização do filtro de Von Karman para simular a turbulência do vento, essencial para a simular diferentes cenários operacionais. O modelo do aerogerador será desenvolvido em software, abordando seus comportamentos construtivos e elétricos. A validação dos modelos será realizada comparando os resultados das simulações com dados teóricos e com estudos de caso.

O desenvolvimento da plataforma de simulação de turbina eólica, encorpara todos os modelos desenvolvidos nos passos anteriores, como a série temporal de vento e ajustes na turbina, permitindo a análise dos diversos componentes presentes numa turbina e gerando um relatório de desempenho.

Palavras-chave: Energia eólica, Simulação, Modelagem, Sistemas eólicos, Sustentabilidade.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A WIND TURBINE SIMULATION SYSTEM

AUTHOR: André Vinícius Lima do Nascimento

ADVISOR: Gustavo Guilherme Koch

The increasing need for electricity generation due to population growth and economic expansion highlights the urgency for efficient and sustainable energy solutions. Wind energy emerges as a viable alternative to reduce dependence on fossil fuels and minimize environmental impacts. In Brazil, wind energy has gained importance, contributing significantly to the country's energy matrix, which is one of the cleanest in the world.

This work aims to develop a variable-speed wind turbine simulator and a supervisory system to test the turbine under different wind regimes and operating points. The specific objectives include reviewing the literature on wind conversion systems, developing mathematical models of wind behavior, obtaining the average wind profile for a study scenario, acquiring the wind time series including turbulence and gusts, developing a control system for the studied wind turbine, implementing a simulation platform with modeling and analysis of wind turbine components, and evaluating the performance of the emulation system in different operational scenarios.

The methodology involves using MATLAB/SIMULINK software for modeling and simulating wind time series and the wind turbine emulation system. The wind time series modeling includes the use of the Von Karman filter to simulate wind turbulence, essential for simulating different operational scenarios. The wind turbine model will be developed in software, addressing its constructive and electrical behaviors. The validation of the models will be performed by comparing the simulation results with theoretical data and case studies.

The development of the wind turbine simulation platform incorporates all models developed in the previous steps, such as the wind time series and turbine adjustments, allowing for the analysis of various turbine components and generating a performance report.

Keywords: Wind energy, Simulation, Modeling, Wind systems, Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Crescimento da geração de Energia Elétrica oriunda da Energia Eólica.	12
Figura 2.2 – Evolução da Capacidade Instalada de Energia Eólica	12
Figura 2.3 – Atlas do Potencial Eólico Brasileiro desenvolvido pelo modelo Brams em médias anuais.	13
Figura 2.4 – Atlas Eólico para o Rio Grande do Sul à altura de 100 metros.	14
Figura 2.5 – Velocidade Média do Vento em Cachoeira do Sul.	15
Figura 2.6 – Fotografia do Anemômetro instalado na UFSM Campus Cachoeira do Sul. .	15
Figura 2.7 – Gráfico dos dados do Anemômetro instalado na UFSM Campus Cachoeira do Sul.	16
Figura 2.8 – Distribuição de Weibull dos dados do Anemômetro instalado na UFSM Campus Cachoeira do Sul.	16
Figura 2.9 – Camadas da Atmosfera	17
Figura 2.10 – Formação dos ventos devido ao movimento das massas de ar	18
Figura 2.11 – Esquema representativo da circulação geral da atmosfera terrestre.	19
Figura 2.12 – Circulação de ventos em escala local.(a) Brisa Marítima e (b) Brisa Terrestre.	20
Figura 2.13 – Circulação de ventos em escala local.(a) Brisa do Vale e (b) Brisa da Montanha.	20
Figura 2.14 – Variações de velocidade ao longo do tempo na Dinamarca.	23
Figura 2.15 – Esquema do perfil de velocidades sobre uma superfície plana.	25
Figura 2.16 – Gráficos de velocidade de vento com altura de acordo com a Lei de Potencia e a Lei Logarítmica.	28
Figura 2.17 – O fluxo de massa de ar com velocidade v através de uma área A (circular). .	29
Figura 2.18 – Área varrida pelas pás de uma turbina de eixo horizontal.	31
Figura 2.19 – Modelo de Darrieus.	31
Figura 2.20 – Curva de potência do vento em função de sua velocidade.	32
Figura 2.21 – Passagem de ar por uma turbina eólica de eixo horizontal.	32
Figura 2.22 – Coeficiente de Potência (C_p) versus Relação de Velocidade na Ponta (λ) para ângulo de passo β , para equações (2.28) e (2.29).	36
Figura 2.23 – Coeficiente de Potência (C_p) versus Relação de Velocidade na Ponta (λ) para ângulo de passo β , para equações (2.30) e (2.31).	36
Figura 2.24 – Coeficiente de Potência (C_p) versus Relação de Velocidade na Ponta (λ) para ângulo de passo β , para equações (2.26) e (2.27).	37
Figura 2.25 – Fluxo de ar decomposto em três categorias. U é o componente velocidade do vento ao longo do tempo t	38
Figura 2.26 – Representação do vento em velocidade média, ondulação e turbulência. ...	40
Figura 2.27 – Aproximação do Filtro de Von Karman no <i>software</i> MATLAB/SIMULINK	41
Figura 2.28 – Calculo da constante de tempo T_f do Filtro simulado no <i>software</i> MATLAB/SIMULINK	42
Figura 2.29 – Ganho K_f do Filtro de Von Karman simulado no <i>software</i> MATLAB/SIMULINK	43
Figura 2.30 – O ruído utilizado para ativar o filtro gerado no <i>software</i> MATLAB/SIMULINK	43
Figura 2.31 – Série Temporal de Vento modelado no <i>software</i> MATLAB/SIMULINK ...	44
Figura 2.32 – Resultado do modelo da Série Temporal de Vento <i>software</i> MATLAB/SIMULINK	

Figura 2.33 – Esquema abrangente de operação de um aerogerador.	45
Figura 2.34 – Esquema de Turbina Eólica Moderna.	46
Figura 2.35 – Aspectos de um perfil aerodinâmico.	48
Figura 2.36 – Escoamento ao longo do perfil.	49
Figura 2.37 – Forças Aerodinâmicas	50
Figura 3.1 – Fluxograma de desenvolvimento do projeto.	54
Figura 3.2 – Ilustração do cenário.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais características das escalas atmosféricas	21
Tabela 2.2 – Fator n para diferentes tipos de superfícies	26
Tabela 2.3 – Valores de comprimentos de rugosidade para diferentes terrenos	28
Tabela 2.4 – Valores propostos para os parâmetros de cálculo do $C_p(\lambda, \beta)$	35
Tabela 2.5 – Fatores de turbulência para diferentes terrenos	44
Tabela 2.6 – Comparação entre geração estimada com dados teóricos e dados reais de geração de energia eólica na Vila Santa Terezinha, Franca – SP.	51
Tabela 2.7 – Características Elétricas do Aerogerador TE24	52
Tabela 2.8 – Características Construtivas do Aerogerador TE24	52
Tabela 3.1 – Cronograma de ações	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	OBJETIVO GERAL	9
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	BRASIL E SEU MAPA EÓLICO	11
2.1.1	Mapeamento do Potencial Eólico	13
2.1.2	Cachoeira do Sul	13
2.2	ANÁLISE DOS VENTOS	17
2.2.1	Circulação dos Ventos	18
2.2.2	Classificação dos Movimentos Atmosféricos	20
2.2.3	Forças Fundamentais que Regem o Movimento do Vento	23
2.3	PERFIL DE VENTO	25
2.4	POTÊNCIA GERADA PELOS VENTOS	28
2.4.1	Avaliação da Energia Contida no Vento	29
2.4.2	Determinação da Energia Convertida em Potência Mecânica	32
2.5	CURVA COEFICIENTE DE PERFORMANCE (C_p)	33
2.6	SÉRIE TEMPORAL DO VENTO	37
2.6.1	Vento e Fluxo	37
2.6.2	Modelagem de Séries Temporais com o Filtro de Von Karman	39
2.7	PRINCÍPIOS DE FUNDAMENTO DAS TURBINAS EÓLICAS	44
2.8	COMPONENTES DE AEROGERADOR DE EIXO HORIZONTAL	46
2.9	PERFIL AERODINÂMICO	47
2.9.1	Coeficientes e Parâmetros Aerodinâmicos	49
2.10	CONTROLE DE ÂNGULO DE PASSO	51
2.11	CONTROLADOR YAW	51
2.12	TURBINA EÓLICA TE24	51
3	METODOLOGIA	53
3.1	CRONOGRAMA PARA DESENVOLVIMENTO DO TCC II	55
4	CONCLUSÃO	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1 INTRODUÇÃO

A crescente necessidade de geração de energia elétrica, impulsionada pelo aumento da população e pela expansão econômica, tem colocado em evidência a urgência de se encontrar soluções energéticas que sejam ao mesmo tempo eficientes e sustentáveis. Nos últimos anos, a busca por alternativas que reduzam a dependência dos combustíveis fósseis e minimizem os impactos ambientais tem se tornado uma prioridade global. Nesse contexto, fontes de energia renovável, como a energia eólica, emergem como opções viáveis e necessárias para atender à demanda crescente por eletricidade de forma ambientalmente responsável.

De acordo com a Agência Internacional de Energia (2024), o consumo mundial de energia elétrica cresceu cerca de 3,1% ao ano na última década, refletindo o aumento das atividades industriais e a melhoria dos padrões de vida. No Brasil, a Empresa de Pesquisa Energética (2024) destaca que, entre 2010 e 2020, o consumo de energia elétrica aumentou em média 4,2% ao ano, influenciado tanto pelo crescimento econômico quanto pelo aumento da população urbana.

Para atender ao crescente consumo de energia elétrica, muitos países têm recorrido ao aumento da geração a partir de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural. Esse incremento, porém, tem causado uma escalada significativa nas emissões de gases de efeito estufa, agravando o aquecimento global. Segundo Calijuri e Cunha (2013), "a matriz elétrica mundial é predominantemente fóssil, e os esforços para reduzir a dependência desses combustíveis de alto impacto ambiental são cruciais para mitigar as mudanças climáticas.". Este cenário evidencia a necessidade urgente de diversificar a matriz energética. Em resposta a isso, a comunidade internacional tem intensificado a busca por alternativas mais limpas, como a energia eólica, e promovido campanhas e acordos para incentivar o uso de fontes renováveis. Iniciativas como o Protocolo de Kyoto (Nações Unidas, 1997) e o Acordo de Paris (Nações Unidas, 2015), que introduzem mecanismos de crédito de carbono, têm sido fundamentais para estimular investimentos em tecnologias sustentáveis e reduzir as emissões globais de carbono.

O Brasil tem se destacado na implementação de energias renováveis, com uma matriz energética que é considerada uma das mais limpas do mundo. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2020), cerca de 83% da eletricidade gerada no país provém de fontes renováveis, com a energia hídrica sendo a principal contribuição. Nos últimos anos, a energia eólica tem ganhado uma importância crescente no cenário brasileiro. Em 2020, a energia eólica foi responsável por aproximadamente 10% da geração elétrica do Brasil, com uma capacidade instalada que ultrapassou 16 gigawatts (GW), segundo a ABEEólica (2020). Além disso, o país possui um vasto potencial de crescimento nesse setor. Estudos indicam que o Brasil tem capacidade para instalar mais de 500 GW de energia eólica, especialmente nas regiões Nordeste e Sul, onde os ventos são mais favoráveis. Este potencial coloca o Brasil em uma posição estratégica para expandir ainda mais sua capacidade de geração eólica, contribuindo significativamente para

a diversificação de sua matriz energética e para a mitigação dos impactos ambientais associados à geração de energia.

A expansão do setor de energia eólica no Brasil tem sido notável, impulsionada por investimentos substanciais tanto do setor público quanto do privado. Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) (2024), os investimentos acumulados em energia eólica no Brasil desde 2009 já superam a marca de R\$ 100 bilhões. Este influxo de capital tem permitido a construção de novos parques eólicos e a modernização de infraestruturas existentes, aumentando significativamente a capacidade de geração. Em 2020, foram investidos cerca de R\$ 13 bilhões em novos projetos, com previsão de investimentos adicionais de R\$ 62 bilhões até 2024, conforme relatado pelo BNDES (2024) e Estadão (2024). Este cenário de crescimento contínuo reflete a confiança dos investidores na energia eólica como uma fonte sustentável e lucrativa, além de demonstrar o compromisso do Brasil em se tornar um líder global na geração de energia renovável.

Portanto, é evidente que o campo de geração eólica ainda está em expansão. Dado esse aumento, torna-se cada vez mais necessário estudos para prever e reduzir a ocorrência de problemas diversos no controle de turbinas. Desta forma, o presente trabalho busca desenvolver uma plataforma de simulação de uma turbina eólica, afim de colaborar com estudos no setor e buscar a otimização da qualidade de energia produzida do vento, com o estudo de técnicas de modos de operação, velocidade e limitação de potência.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo do trabalho é desenvolver um simulador de turbina eólica de velocidade variável. Além disso, busca-se desenvolver um sistema de supervisão, possibilitando testar a turbina em diferentes regimes de vento e pontos de operação.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Revisão da literatura sobre sistemas de conversão eólica.
2. Obtenção do perfil médio de vento em Cachoeira do Sul.
3. Aquisição da série temporal do vento, incluindo turbulência e rajadas de vento.
4. Desenvolvimento de um sistema de controle para uma turbina eólica de 20 kW, abrangendo desde a velocidade mínima de *cut-in*, técnica de MPPT, limitação de potência e *cut-off*.

5. Implementação de uma plataforma de simulação que permita a modelagem e análise de todos os componentes de uma turbina eólica (com possibilidade de uso de Python).
6. Desenvolvimento de um sistema de supervisão utilizando Python.
7. Avaliação do desempenho do sistema de emulação em diferentes cenários operacionais.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está organizado da seguinte maneira:

O capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre os principais conceitos relacionados ao estudo. Neste capítulo é obtido e desenvolvido a análise dos ventos, perfil de vento, potência gerada pelos ventos, série temporal do vento e o mapa eólico do Brasil. Também são discutidos os modelos matemáticos e físicos que fundamentam a simulação de turbinas eólicas.

No capítulo 3 aborda os conceitos básicos de energia eólica e princípios fundamentais das turbinas eólicas. São descritos os componentes de um aerogerador de eixo horizontal, com destaque para a turbina eólica TE24, e as características técnicas e construtivas relevantes para o desenvolvimento do simulador.

No capítulo 4 é detalhada a metodologia utilizada para o desenvolvimento do sistema de simulação de turbinas eólicas. Inclui a descrição das ferramentas e técnicas empregadas, como o software MATLAB/SIMULINK, bem como os critérios e procedimentos para a modelagem e simulação das séries temporais do vento e do sistema de emulação do aerogerador.

No capítulo 5, são expostas as conclusões gerais do estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

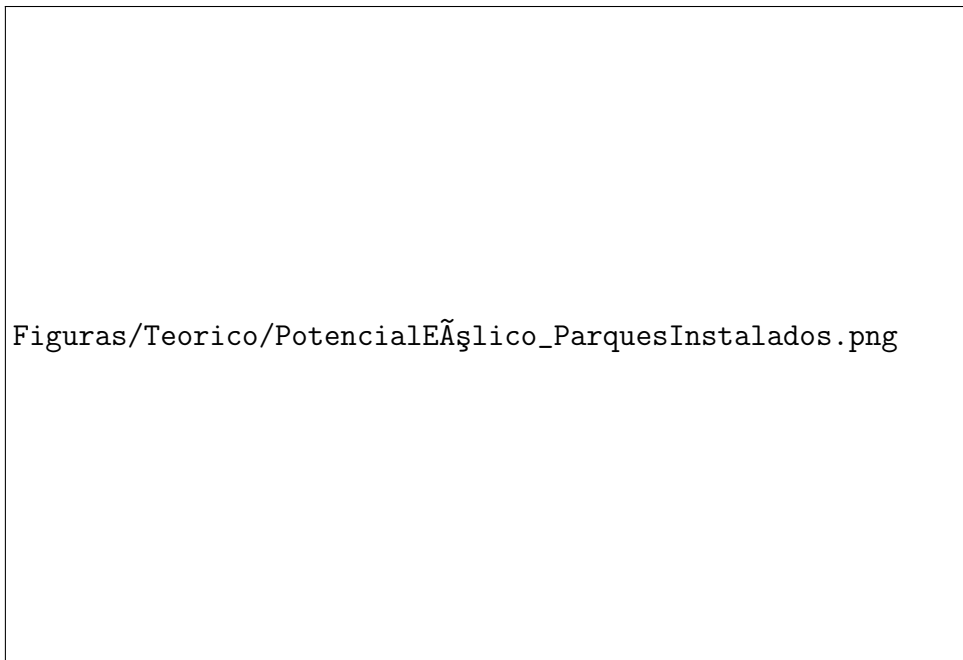
2.1 BRASIL E SEU MAPA EÓLICO

As energias renováveis têm ganhado destaque no cenário energético mundial devido à urgência de mitigar as mudanças climáticas e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. No Brasil, o potencial para a adoção de energias renováveis é vasto, dado seu território extenso e condições climáticas favoráveis. Entre as fontes renováveis, a energia eólica se destaca como uma das mais promissoras, contribuindo significativamente para a matriz energética do país.

O desenvolvimento da energia eólica no Brasil começou a se intensificar no início dos anos 2000, impulsionado por políticas públicas e incentivos governamentais. O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) (2024), lançado em 2002, foi um marco inicial, proporcionando contratos de compra de energia de longo prazo que atraíram investidores. A partir de 2009, a realização de leilões específicos para fontes renováveis, incluindo a eólica, promoveu uma expansão acelerada do setor, tornando a energia eólica uma das fontes mais competitivas no Brasil.

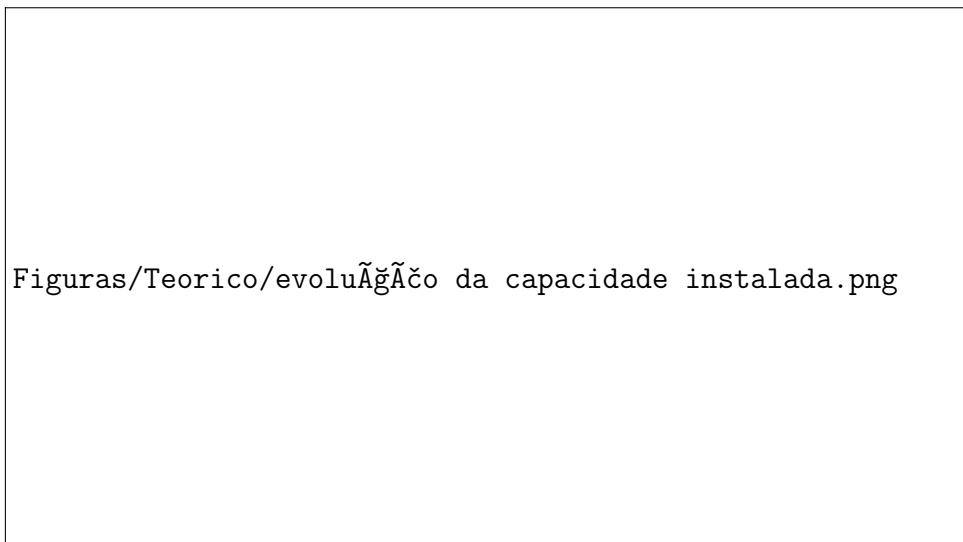
O Brasil rapidamente se tornou um dos maiores mercados para energia eólica no mundo. A capacidade instalada de energia eólica passou de menos de 1 GW em 2009 para mais de 20 GW em 2023, como destacado nas Figuras 2.1 e 2.2. Este crescimento foi suportado pela combinação de políticas públicas favoráveis, avanços tecnológicos, e a competitividade econômica da energia eólica.

Figura 2.1 – Crescimento da geração de Energia Elétrica oriunda da Energia Eólica.



Fonte: Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) (2017).

Figura 2.2 – Evolução da Capacidade Instalada de Energia Eólica



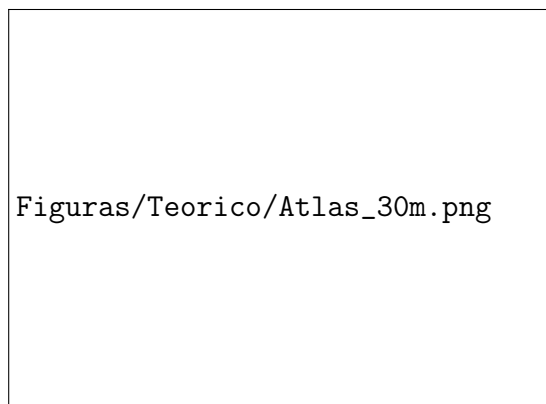
Fonte: Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) (2024)

As regiões Nordeste e Sul do Brasil são as que mais se destacam em termos de potencial eólico e número de parques eólicos instalados. O Rio Grande do Norte, a Bahia e o Ceará são os estados líderes na produção de energia eólica no país.

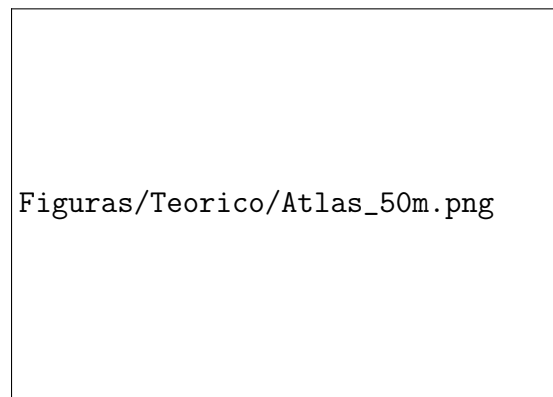
2.1.1 Mapeamento do Potencial Eólico

O mapeamento do potencial eólico no Brasil tem sido objeto de diversas pesquisas e estudos ao longo dos anos, realizados por instituições acadêmicas, governamentais e privadas. Esses estudos são fundamentais para identificar as regiões com maior capacidade para a geração de energia eólica e para orientar investimentos no setor. Um exemplo é o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB) com Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, representado na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Atlas do Potencial Eólico Brasileiro desenvolvido pelo modelo Brams em médias anuais.



(a) Velocidade média anual para a altura de 30 metros.



(b) Velocidade média anual para a altura de 50 metros.

Fonte: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB) (2013)

2.1.2 Cachoeira do Sul

Cachoeira do Sul, localizada no estado do Rio Grande do Sul, é uma cidade que destaca um significativo potencial eólico. A região Sul do Brasil, especialmente o Rio Grande do Sul, possui condições climáticas favoráveis que tornam a energia eólica uma alternativa viável e promissora, como visto na Figura 2.4. Assim, a análise das características eólicas de Cachoeira do Sul torna-se um cenário de interesse, não apenas por ser a cidade onde o trabalho está sendo desenvolvido, mas também pela oportunidade de explorar e modelar os recursos eólicos disponíveis.

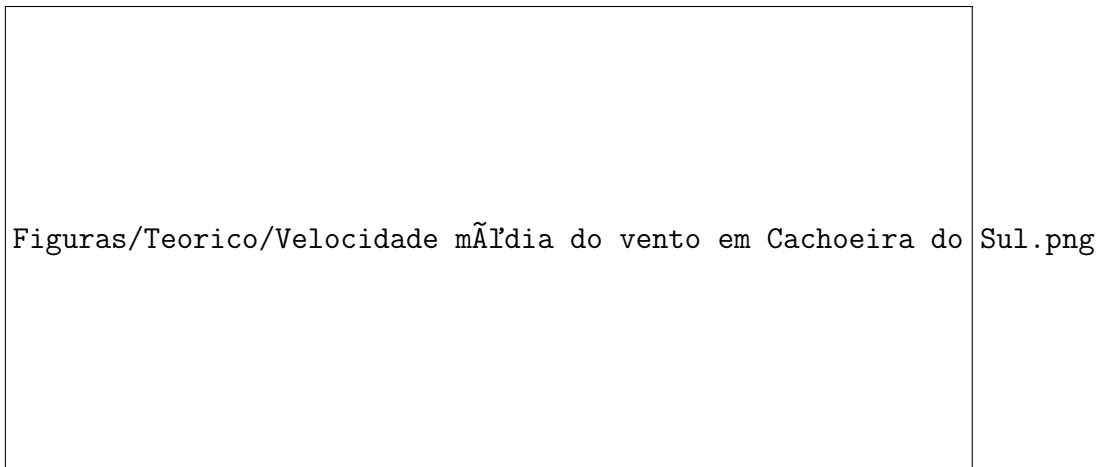
Figura 2.4 – Atlas Eólico para o Rio Grande do Sul à altura de 100 metros.



Fonte: Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) (2017)

A velocidade média de vento em Cachoeira do Sul é acima de $2,3 \frac{m}{s}$ a uma altura de 10 metros acima do solo, apresentando poucas variações sazonais, como representado na Figura 2.5. Esta velocidade de vento, embora moderada, indica um bom potencial para a geração de energia eólica.

Figura 2.5 – Velocidade Média do Vento em Cachoeira do Sul.



Fonte: WeatherSpark (2024)

Para efeitos de comparação foram obtidos dados de velocidade do vento na UFSM de Cachoeira do Sul, através de anemômetro já instalado, visto na Figura 2.6. Os dados de velocidade foram obtidos para o ano de 2023 com intervalo de uma hora a uma altura de aproximadamente três metros, gerando no gráfico da Figura 2.7. Para efeitos de análise, os dados obtidos foram inseridos na distribuição de Weibull visto na Figura 2.8.

Figura 2.6 – Fotografia do Anemômetro instalado na UFSM Campus Cachoeira do Sul.



Figura 2.7 – Gráfico dos dados do Anemômetro instalado na UFSM Campus Cachoeira do Sul.

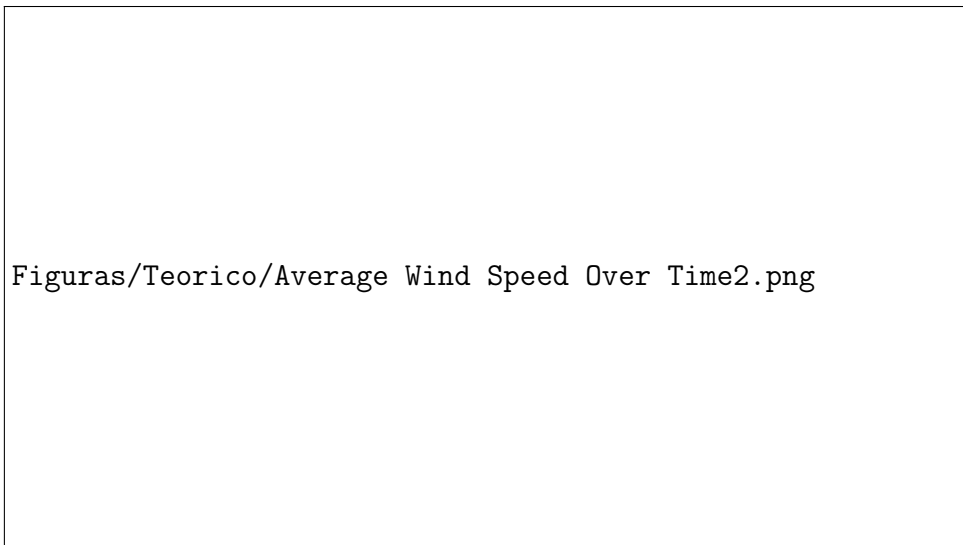


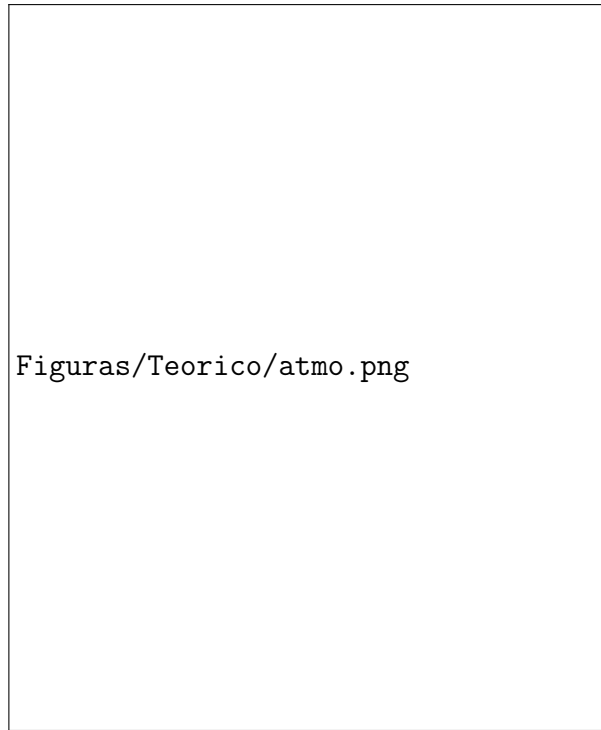
Figura 2.8 – Distribuição de Weibull dos dados do Anemômetro instalado na UFSM Campus Cachoeira do Sul.



Devido ao anemômetro estar muito próximo ao solo, os valores obtidos apresentam muitas variações. Conforme recomendado por Fadigas (2011), o ideal é que o anemômetro esteja posicionado à altura do cubo do aerogerador. Esta altura permite uma medição mais precisa e representativa das condições de vento que a turbina eólica se encontrará, minimizando as interferências causadas pela rugosidade do solo e por obstáculos próximos, resultando em dados mais confiáveis para a modelagem do vento e a operação eficiente dos aerogeradores.

2.2 ANALISE DOS VENTOS

Figura 2.9 – Camadas da Atmosfera



Fonte: Desconhecido (2019)

Entendendo que os principais fenômenos envolvendo vento está relacionado a troposfera, também é essencial entender que o ar se comporta como um fluido, que em movimento é percebido como vento. Assim como qualquer fluido, o ar está sujeito a influências físicas como variações térmicas e variação de pressão. Um bom exemplo está na radiação solar, que provoca variações de temperatura no ar, criando áreas de alta e baixa pressão que, por sua vez, geram movimento de ar das áreas de alta pressão para as de baixa pressão, resultando na formação de ventos.

Além dos efeitos térmicos, a topografia do terreno desempenha um papel crucial na modelagem e comportamento dos ventos. Montanhas, vales, florestas e corpos d'água modificam significativamente a direção e a velocidade dos ventos, gerando padrões complexos que precisam ser cuidadosamente estudados para a instalação eficiente de aerogeradores.

De acordo com Fadigas (2011), no passado os dados sobre recursos eólicos eram avaliados exclusivamente com base em critérios meteorológicos, considerando apenas o movimento das grandes massas de ar, tornando as informações insuficientes e inadequadas. Por exemplo, as torres meteorológicas não esclareciam as condições do vento em terrenos específicos nem a variação da velocidade do vento com a altura.

Nas últimas décadas, conforme destacado por Fadigas (2011), campanhas de medição de ventos começaram a ser realizadas em vários países. O objetivo dessas campanhas é obter uma

avaliação mais precisa das condições do vento em diferentes tipos de relevo, rugosidade do solo e alturas variadas, visando ao aproveitamento energético otimizado dos ventos. Atualmente, existem bases de dados e mapas eólicos com informações detalhadas coletadas ao longo de vários anos. Esses dados são provenientes tanto de torres anemométricas quanto de medições realizadas nas próprias centrais eólicas.

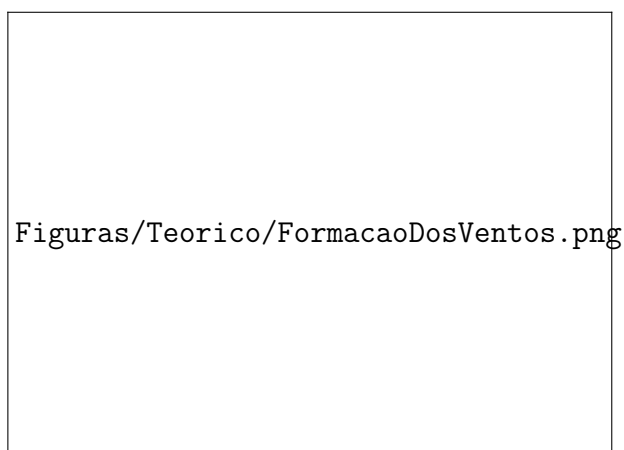
Entretanto, mesmo com a disponibilidade de mapas ou atlas eólicos, é fundamental realizar medições locais específicas para determinar o potencial eólico com precisão. Recomenda-se a instalação de torres anemométricas adaptadas ao terreno e à rugosidade local, preferencialmente posicionadas à altura do cubo do aerogerador. Abrangendo um período mínimo de um ano, para capturar a variabilidade sazonal e mensal dos ventos, garantindo uma avaliação completa do potencial eólico da região.

2.2.1 Circulação dos Ventos

Os ventos podem ser classificados de acordo com a circulação global ou local. Os de circulação global resultam da incidência solar desigual no planeta, variando conforme a distribuição geográfica, o período do dia e a distribuição anual (MARTINS; GUARNIERI; PEREIRA, 2008). Já os ventos de circulação local são influenciados por características específicas de uma região, como a topografia, a presença de corpos d'água e as diferenças de temperatura entre áreas adjacentes.

A radiação solar absorvida de maneira desigual pela Terra é mais intensa próximo a linha do Equador, gerando desequilíbrio em relação aos polos. Buscando o equilíbrio térmico, as massas de ar quente e úmida presente na região dos trópicos movimentam-se para os polos, enquanto as massas de ar fria e seca deslocam-se em sentido a linha do Equador, fechando o ciclo, conforme visto na figura 2.10.

Figura 2.10 – Formação dos ventos devido ao movimento das massas de ar

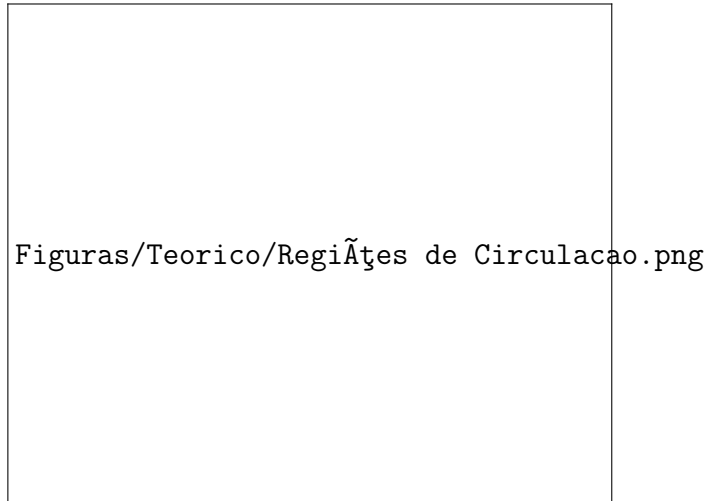


Figuras/Teorico/FormacaoDosVentos.png

Fonte: CEPEL (2001)

A rotação da Terra também influencia a formação dos ventos, criando padrões distintos: no Hemisfério Norte e no Hemisfério Sul. De acordo com Reboita et al. (2012) e Pinto (2014), devido à força de Coriolis, no Hemisfério Sul, o vento movimenta-se em direção do polo para o equador sofrendo um deslocamento de sentido negativo ao eixo X. Ao modo que o vento indo em direção ao polo oriundo do equador sofre um desvio positivo em relação ao eixo X, como visto na figura 2.11.

Figura 2.11 – Esquema representativo da circulação geral da atmosfera terrestre.



Fonte: Retirado (ROCHA et al., 2023) baseado em (REBOITA et al., 2012)

Devido à inclinação do eixo de rotação da Terra em relação ao plano de sua órbita ao redor do Sol, há variações sazonais na intensidade e direção do vento em qualquer lugar do planeta. Além do gradiente de pressão e da força de Coriolis (causada pela rotação da Terra), os ventos atmosféricos também são afetados por forças gravitacionais, inércia do ar e fricção com a superfície terrestre, resultando em turbulência.

Nas grandes altitudes, o ar se movimenta seguindo linhas de igual pressão, chamadas isolinhas. Esse movimento de massas de ar a mais de 600 metros de altitude é conhecido como ventos geotrópicos. Nessa altura, o fluxo de ar não é influenciado pela superfície terrestre. Em altitudes mais baixas, as diferentes superfícies da Terra, como oceanos, terras e vegetação, afetam significativamente o fluxo de ar devido a variações de pressão, diferentes níveis de absorção da radiação solar e umidade, influenciando o clima próximo à superfície. Esta região da atmosfera, onde os ventos são afetados pela superfície, é chamada de camada limite.

Além de movimentos em escala global (Equador - polos), também há formação de ventos em escala local, como "mar para o continente", "vales para as montanhas" e vice-versa.

As brisas marítimas e terrestres ocorrem em áreas costeiras devido às diferentes capacidades de absorção de calor da terra e do mar. Durante o dia, a terra aquece mais rapidamente que o mar, elevando a temperatura do ar sobre a terra e criando uma corrente de ar que sopra do mar para a terra, conhecida como brisa marítima. À noite, a terra esfria mais rapidamente que a água, resultando em uma corrente de ar que sopra da terra para o mar, chamada de brisa

terrestre, conforme demonstra a figura 2.12.

Figura 2.12 – Circulação de ventos em escala local.(a) Brisa Marítima e (b) Brisa Terrestre.

Figuras/Teorico/brisaMaritima_brisaTerrestre.png

Fonte: Adaptado da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2009)

Os ventos em regiões montanhosas e vales também seguem um padrão diário. Durante o dia, o ar frio nas montanhas se aquece e sobe, permitindo que o ar mais frio dos vales flua para substituir o ar quente que subiu. À noite, o processo se inverte: o ar frio das montanhas desce para os vales, enquanto o ar quente dos vales sobe em direção às montanhas, como ilustra a figura 2.13.

Figura 2.13 – Circulação de ventos em escala local.(a) Brisa do Vale e (b) Brisa da Montanha.

Figuras/Teorico/Brisa do Vale e da Montanha.png

Fonte: Adaptado da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2009)

2.2.2 Classificação dos Movimentos Atmosféricos

A formação dos ventos descrita anteriormente é apenas um exemplo dos muitos processos que ocorrem na superfície da Terra, muitos dos quais são influenciados por variações climáticas em diferentes escalas de tempo e espaço. Na meteorologia, há uma classificação específica para esses movimentos atmosféricos.

Utilizando a classificação de Lutgens e Tarbuck, descrito em (LUTGENS, 2012) e exemplificado em (PINTO, 2014), existem três grandes escalas de comprimento na meteorologia: microescala, mesoescala e macroescala. Esta última é subdividida em duas: escala sinóptica e escala planetária (ou global), como destaca a tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Principais características das escalas atmosféricas

Escala	Tamanho	Duração	Fenômeno
Microescala	Menos que 1 km	Segundos a minutos	Semanas a anos
Mesoescala	1 a 100 km	Minutos a dias	tempestades, tornados e brisa terrestre
Macroescala - Sinóptica	100 a 5000 km	Dias a semanas	Ciclones de latitudes médias, anticiclones e furacões
Macroescala - Planetária	1000 a 40.000 km	Semanas a anos	Ventos alísios e ventos do oeste

Os movimentos atmosféricos variam significativamente no tempo e no espaço, abrangendo intervalos que vão de segundos a meses e distâncias que variam de centímetros a milhares de quilômetros. As variações na velocidade do vento ao longo do tempo podem ser classificadas, de acordo com (PINTO, 2014), em várias categorias:

a) **Interanuais**

- **Período:** Ocorrem em períodos superiores a um ano.
- **Impacto:** Podem ter um impacto significativo na produção de energia em turbinas eólicas de grande porte.
- **Dados Necessários:**
 - * Mínimo de 30 anos de dados para determinar valores climáticos de longo prazo.
 - * Pelo menos 5 anos de dados para estabelecer uma média anual confiável de velocidade do vento para uma região específica.

b) **Anuais**

- **Período:** Ocorrências devido a variações relevantes na média mensal ou sazonal da velocidade do vento.

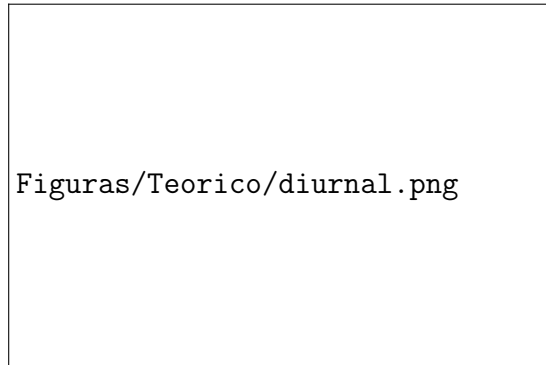
c) **Diurnas**

- **Localização:** Ocorrem em latitudes temperadas e tropicais.
- **Período:** Variam significativamente na escala diária.
- **Causa:** Devidas às diferenças de aquecimento na superfície terrestre durante o ciclo diário de radiação solar.
- **Exemplo:**
 - * Aumento da velocidade do vento durante o dia.
 - * Diminuição da velocidade do vento durante as horas noturnas, da meia-noite ao amanhecer.

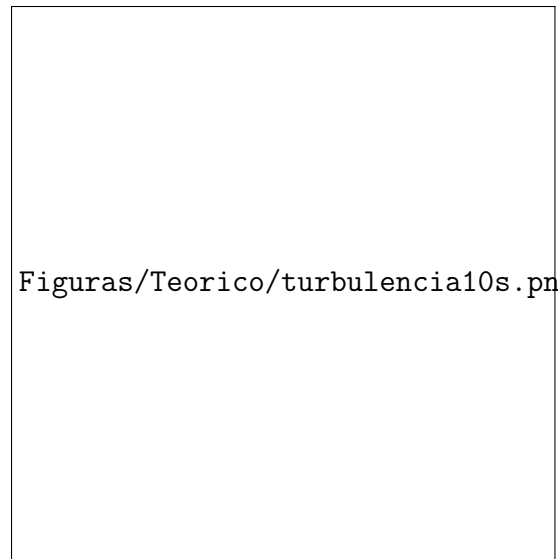
d) De Curto Prazo

- **Período:** Geralmente ocorrem em períodos de 10 minutos ou menos.
- **Exemplos:** Rajadas de vento e turbulências.
- **Turbulências:**
 - * **Definição:** Flutuações aleatórias na velocidade do vento que afetam a média geral.
 - * **Direções:**
 - Longitudinal (ao longo da direção do vento).
 - Lateral (perpendicular ao vento).
 - Vertical.
- **Rajadas:**
 - * **Definição:** Evento discreto dentro de um campo turbulento de vento.
 - * **Caracterização:** Medição de quatro fatores principais:
 - Amplitude.
 - Duração.
 - Variação máxima da rajada.
 - Tempo de resposta.
- **Impacto nas Turbinas Eólicas:** Flutuações turbulentas na velocidade induzem forças cíclicas na estrutura da turbina, causando problemas de estresse e fadiga. Além de que, influenciam diretamente na operação, controle da turbina eólica e na qualidade da potência gerada. A figura 2.14(b) demonstra uma variação típica de curta duração.

Figura 2.14 – Variações de velocidade ao longo do tempo na Dinamarca.



(a) Variações de velocidade do vento Diurno, intervalo de três horas.



(b) Variações de velocidade do vento em curta duração.

Fonte: Danish Wind Industry Association (2000)

2.2.3 Forças Fundamentais que Regem o Movimento do Vento

O vento é definido como o movimento das massas de ar na atmosfera. Este fenômeno pode ser analisado como uma interação dinâmica entre várias parcelas de ar em movimento contínuo. Esse movimento resulta da interação de diversas forças que se intensificam ou se atenuam mutuamente. As principais forças envolvidas são cinco:

a) Força do Gradiente de Pressão

- **Descrição:** A força do gradiente de pressão é responsável por mover o ar das áreas de alta pressão para as áreas de baixa pressão. Este fenômeno é ocasionado pelo aquecimento desigual da superfície terrestre devido à radiação solar, criando zonas distintas de alta e baixa pressão. O desequilíbrio resultante impulsiona o movimento do vento, que naturalmente se desloca da região de maior para a de menor pressão.
- **Importância:** Esta força é fundamental na formação de ventos e sistemas meteorológicos.

b) Força de Coriolis

- **Descrição:** A força de Coriolis, ou também efeito de Coriolis, nomeada em homenagem ao matemático e engenheiro Gaspard Gustave de Coriolis. É uma força inercial que é resultante da rotação da Terra, que causa movimentos circulares ou

em espiral entre os polos e o equador. Seu efeito é percebido na deflexão dos ventos: para a direita no hemisfério norte e para a esquerda no hemisfério sul.

- **Fórmula:** Para efeito de estudo em energia eólica, de acordo com Pinto (2014), a formula da força de Coriolis é dada por:

$$F_{co} = 2\Omega V \sin \Phi, \quad (2.1)$$

em que:

F_{co} é a força de Coriolis,

Ω é a velocidade angular da Terra (7.29×10^{-5} rad/s),

V é a velocidade da partícula (m/s),

Φ é a latitude da partícula em graus (em graus).

- **Importância:** Esta força é crucial na formação de correntes de vento de grande escala e fenômenos climáticos como ciclones.

c) Força Centrífuga

- **Descrição:** A força centrífuga é uma força aparente que atua sobre um corpo em rotação, afastando-o do centro de rotação.
- **Fórmula:**

$$F = m\omega^2 r \quad (2.2)$$

- **Importância:** Esta força é relevante em sistemas de referência rotativos e afeta o movimento de massas de ar em sistemas de baixa pressão.

d) Força de Atrito

- **Descrição:** A força de atrito é a força que resiste ao movimento relativo de superfícies ou camadas de ar em contato.
- **Importância:** Esta força reduz a velocidade dos ventos próximos à superfície da Terra e influencia a formação de padrões climáticos locais.

e) Força da Gravidade

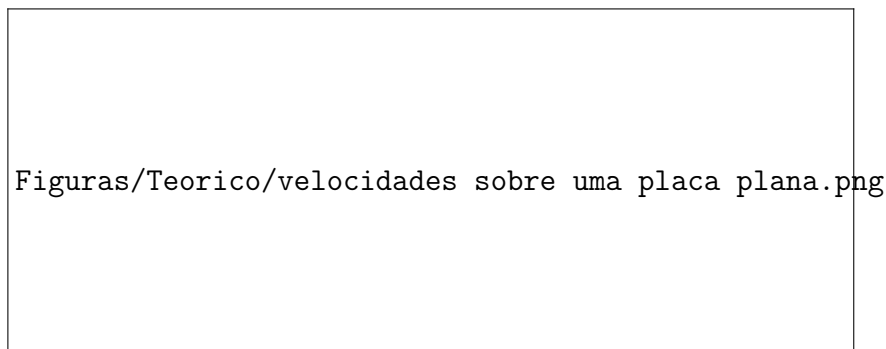
- **Descrição:** A força da gravidade é a força que atrai os objetos em direção ao centro da Terra.
- **Importância:** A gravidade é fundamental na manutenção da atmosfera terrestre e afeta o movimento vertical do ar.

2.3 PERFIL DE VENTO

Conforme demonstrado por estudos em mecânica dos fluidos, a velocidade de um fluido que flui próximo a uma superfície é reduzida a zero devido ao atrito entre o fluido e a superfície. Ao observar o perfil de velocidade do fluido em relação à altura, percebe-se que a velocidade aumenta de zero até alcançar a velocidade de escoamento (v). Essa variação é mais acentuada próxima à superfície e diminui em altitudes mais elevadas (BATCHELOR, 2000).

A região próxima à superfície, onde essa mudança rápida de velocidade ocorre, é denominada camada limite, como ilustrado na Figura 2.15(a). Dentro dessa camada, o ar geralmente apresenta turbulência, influenciada por fatores como densidade e viscosidade do fluido, rugosidade da superfície e a presença de obstáculos (SCHLICHTING, 2000).

Figura 2.15 – Esquema do perfil de velocidades sobre uma superfície plana.



(a) Alto efeito viscoso. (b) Baixo efeito viscoso.

Fonte: Passos (2014)

A potência contida no vento é função da densidade do ar, que, por sua vez, é influenciada pela temperatura e pressão, ambas variáveis com a altura em relação ao solo. Como os aerogeradores em operação comercial são instalados dentro da camada limite (até 150 m), é crucial compreender a distribuição da velocidade do vento com a altura. Isso é importante porque a velocidade do vento determina a produtividade de uma turbina instalada em uma torre de certa altura e influencia a vida útil das pás do rotor, que são submetidas a cargas cíclicas devido à turbulência do vento.

Os ventos turbulentos resultam da dissipação da energia cinética em energia térmica através da criação e destruição de pequenas rajadas progressivas. Esses ventos são caracterizados por várias propriedades estatísticas: intensidade, função densidade de probabilidade, autocorrelação, escala integral de tempo e função densidade espectral de potência. Detalhados com mais detalhes por Rohatgi e Nelson (1994), apud Manwell J.G. McGowan (2004).

Em estudos sobre o aproveitamento energético dos ventos, dois modelos matemáticos são comumente utilizados para representar o perfil vertical dos ventos: a lei da potência e a lei logarítmica (FADIGAS, 2011).

A lei da potência é um modelo simples derivado de estudos sobre a camada limite em

uma placa plana. É fácil de aplicar, mas não oferece alta precisão. A lei da potência é expressa pela seguinte fórmula:

$$V = V_r \left(\frac{H}{H_r} \right)^n \quad (2.3)$$

em que

- V = velocidade do vento na altura (H)
- V_r = velocidade do vento na altura de referência (medida)
- H = altura desejada
- H_r = altura de referência
- n = expoente da lei de potência

O expoente n representa a influência da natureza do terreno no perfil vertical da velocidade do vento e indica a correspondência entre o perfil do vento e o fluxo sobre uma placa plana. Além da natureza do terreno, o expoente n também é influenciado pela hora do dia, temperatura, parâmetros térmicos e mecânicos, e estação do ano. Em outras palavras, o expoente n não é constante e pode variar conforme as condições ambientais mudam ao longo dos meses. A Tabela 2.2 apresenta alguns valores de n para diferentes tipos de terrenos planos (FADIGAS, 2011).

Tabela 2.2 – Fator n para diferentes tipos de superfícies

DESCRIÇÃO DO TERRENO	FATOR n
Superfície lisa, lago ou oceano	0,10
Gramma baixa	0,14
Vegetação rasteira (até 0,3m), árvores ocasionais	0,16
Arbustos, árvores ocasionais	0,20
Árvores, construções ocasionais	0,22 – 0,24
Áreas residenciais	0,28 – 0,40

Fonte: Hirata (1985) apud Dutra (2001)

É preciso ter cautela ao aplicar a lei da potência em regiões com relevo acidentado, como terrenos montanhosos ou com depressões, e para alturas superiores a 50 metros.

O modelo baseado na lei logarítmica é mais adequado e realista para entender o perfil vertical do vento, pois considera que o fluxo atmosférico é altamente turbulento (TROEN; PETERSEN, 1989; SILVA, 1999; FADIGAS, 2011). Este modelo utiliza o parâmetro "L – comprimento de mistura", que incorpora a constante de Von Kármán K_c e o comprimento de rugosidade Z_o , reconhecendo que a superfície da Terra nunca é completamente lisa.

Para altas velocidades, o perfil vertical do vento é descrito pela lei logarítmica:

$$V(z) = \frac{v_0}{K_c} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (2.4)$$

em que

- $V(z)$ é a velocidade do vento na altura z ;
- z_0 é o comprimento de rugosidade que caracteriza a rugosidade do terreno;
- K_c é a constante de Von Kármán ($K_c = 0,4$);
- v_0 é a velocidade de atrito, relacionada com a tensão de cisalhamento na superfície τ e a densidade do ar ρ pela expressão $\tau = \rho v_0^2$;

Para velocidades moderadas, o perfil vertical do vento se desvia do perfil logarítmico quando z excede algumas dezenas de metros, devido às forças de empuxo da turbulência. Nesse caso, é necessário incluir parâmetros que descrevam o fluxo de calor na superfície. O perfil vertical genérico do vento é dado por:

$$V(z) = \frac{v_0}{k_c} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \psi \left(\frac{z}{L} \right) \right] \quad (2.5)$$

em que ψ é uma função dependente da estabilidade, sendo positiva para condições instáveis e negativa para condições estáveis. O comprimento de mistura L é definido por:

$$L = \frac{T_0 c_p v_0^3}{k_c g H_0} \quad (2.6)$$

em que:

- T_0 = temperatura absoluta
- H_0 = fluxo de calor na superfície
- c_p = calor específico do ar à pressão constante
- g = aceleração da gravidade

Para estimar a velocidade do vento de uma altura de referência Z_r para outro nível de altura Z , utiliza-se a seguinte equação:

$$\frac{V(z)}{V(z_r)} = \frac{\ln \left(\frac{z}{z_0} \right)}{\ln \left(\frac{z_r}{z_0} \right)} \quad (2.7)$$

A Tabela 2.3 apresenta os valores do comprimento de rugosidade para diferentes tipos de terrenos.

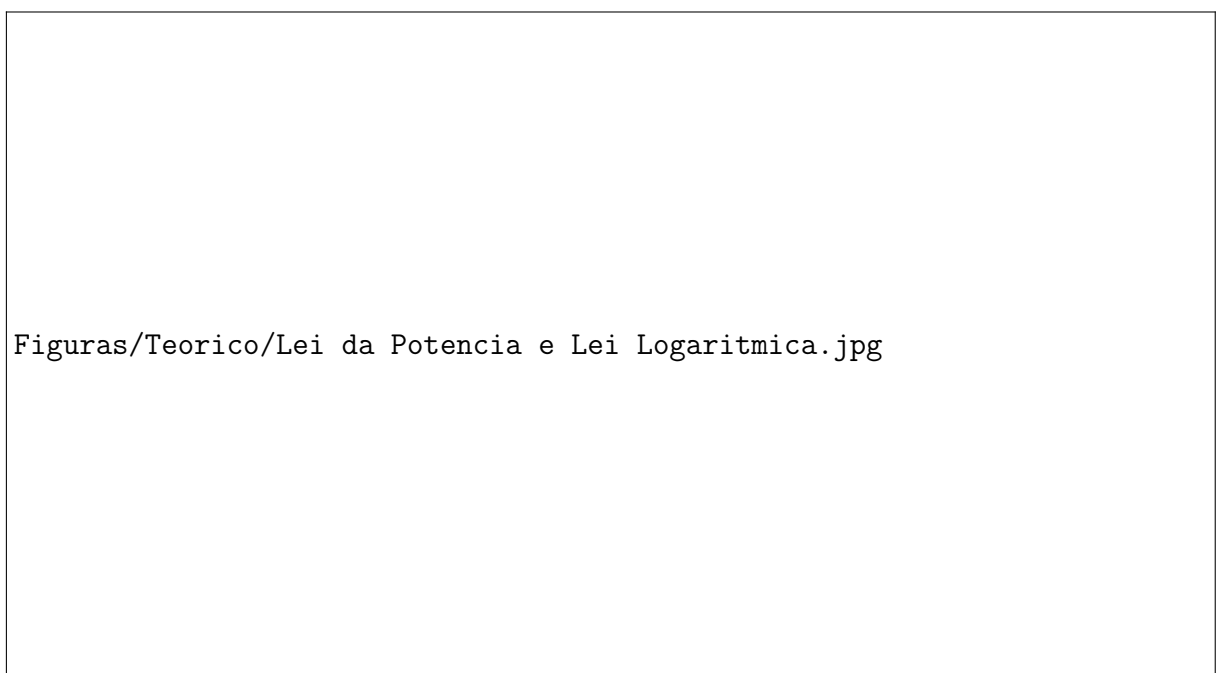
Aplicando os dois modelos de cálculo de estimativa de velocidade do vento em função da altura ao perfil de vento de Cachoeira do Sul, onde a velocidade média do vento é de 2,7 m/s a uma altura de 10 metros, obtivemos os gráficos apresentados na Figura 2.16.

Tabela 2.3 – Valores de comprimentos de rugosidade para diferentes terrenos

DESCRIÇÃO DO TERRENO	z_0 (mm)
Liso, gelo, lama	0,01
Mar aberto e calmo	0,20
Mar agitado	0,50
Neve	3,00
Gramado	8,00
Pasto acidentado	10,00
Campo em declive	30,00
Cultivado	50,00
Poucas árvores	100,00
Muitas árvores, poucos edifícios, cercas	250,00
Florestas	500,00
Subúrbios	1.500,00
Zonas urbanas com edifícios altos	3.000,00

Fonte: Fadigas (2011) adaptado de Manwell J.G. McGowan (2004).

Figura 2.16 – Gráficos de velocidade de vento com altura de acordo com a Lei de Potencia e a Lei Logarítmica.



2.4 POTÊNCIA GERADA PELOS VENTOS

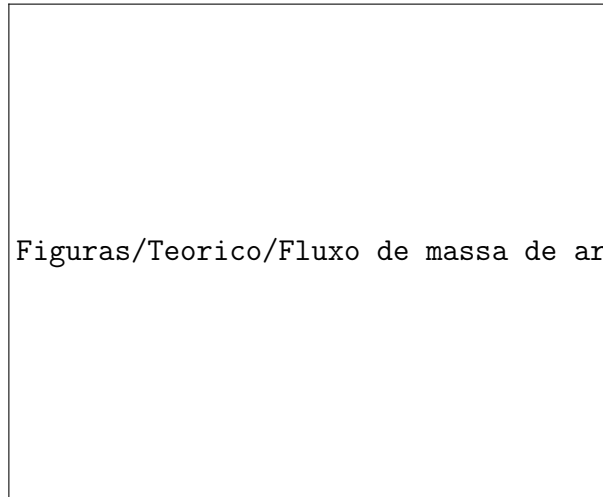
O movimento do ar gera energia, conhecida como energia eólica, que é uma forma de energia cinética. Devido à natureza estocástica do vento, sua direção e velocidade variam

constantemente. A potência, em termos físicos, é a medida da quantidade de trabalho realizado por unidade de tempo. Para estimar a potência do vento, o processo pode ser dividido em duas etapas: primeiramente, avaliando a energia contida no vento e, em seguida, determinando a fração dessa energia que será convertida em energia mecânica.

2.4.1 Avaliação da Energia Contida no Vento

Para estimar a energia cinética, iremos inicialmente considerar o exemplo de um cilindro, conforme ilustrado na Figura 2.17. Toda a quantidade de ar que se desloca a uma dada velocidade (v) atravessa perpendicularmente o cilindro.

Figura 2.17 – O fluxo de massa de ar com velocidade v através de uma área A (circular).



Fonte: Carvalho (2003)

Supondo que a massa de ar que passa pelo cilindro seja m , a energia cinética (E_c) de uma massa de ar é dada por:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.8)$$

Essa equação mostra que a energia cinética aumenta com o quadrado da velocidade do vento. Em termos mais simples, ao duplicar a velocidade do vento de um ventilador doméstico, a energia cinética do vento quadruplica. Para encontrar a potência do vento, devemos calcular como essa energia cinética varia ao longo do tempo, o que é feito pela derivada da energia cinética em relação ao tempo. Assim, a potência (P) disponível do vento é:

$$P = \frac{\partial E_c}{\partial t} = \frac{mv^2}{2} \quad (2.9)$$

Para tornar a equação (2.9) mais prática, substitui-se m por ρAv , resultando em

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (2.10)$$

Essa equação fornece uma boa análise do fluxo de potência eólica. Pode-se também interpretá-la como a quantidade de energia por uma dada área:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (2.11)$$

sendo as variáveis

- P : potência disponível do vento (W)
- m : fluxo de massa de ar (kg/s)
- ρ : densidade do ar (kg/m³)
- A : área da seção transversal do cilindro atravessada pelo vento (m²)
- v : velocidade do vento (m/s)
- E_c : energia cinética do vento (joules/s)
- $\frac{P}{A}$: densidade de potência (W/m²)

A análise da equação (2.10) revela que a potência disponível no vento é diretamente proporcional ao cubo da velocidade do vento. Se a velocidade do vento dobrar, a potência aumentará oito vezes. A densidade de potência $\frac{P}{A}$ representa a potência contida no vento que atinge a parte frontal da turbina.

A densidade do ar depende da pressão (P), da temperatura absoluta (T) e da constante do gás (R), conforme a equação (2.12), que para efeitos de análise $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$.

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} \quad (2.12)$$

Considerando a análise para aplicação de uma turbina eólica de eixo horizontal, como a ilustrada na Figura 2.18, a área varrida pelas pás pode ser determinada a partir da seguinte equação:

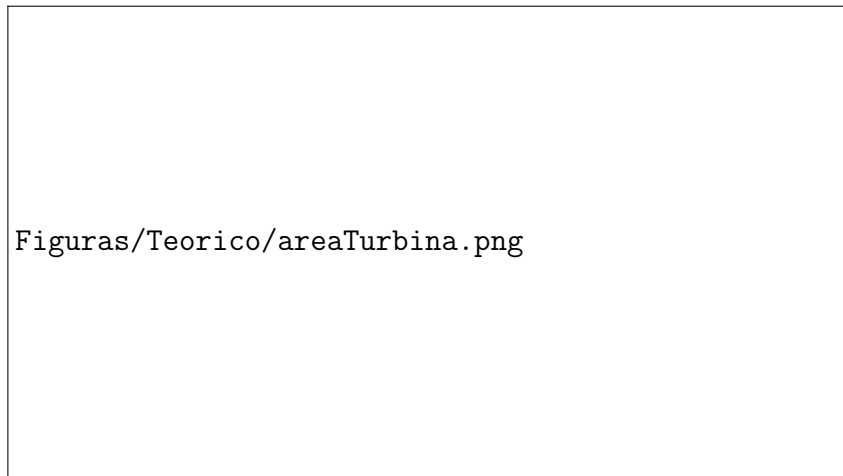
$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (2.13)$$

em que D é o diâmetro do rotor.

A determinação da área para a turbina de eixo vertical modelo Darrieus, mostrada na figura 2.19, é mais complexa, pois envolve integrais elípticas. No entanto, ao aproximar o formato das pás a uma parábola, a seguinte expressão simplificada pode ser utilizada (FADIGAS, 2011):

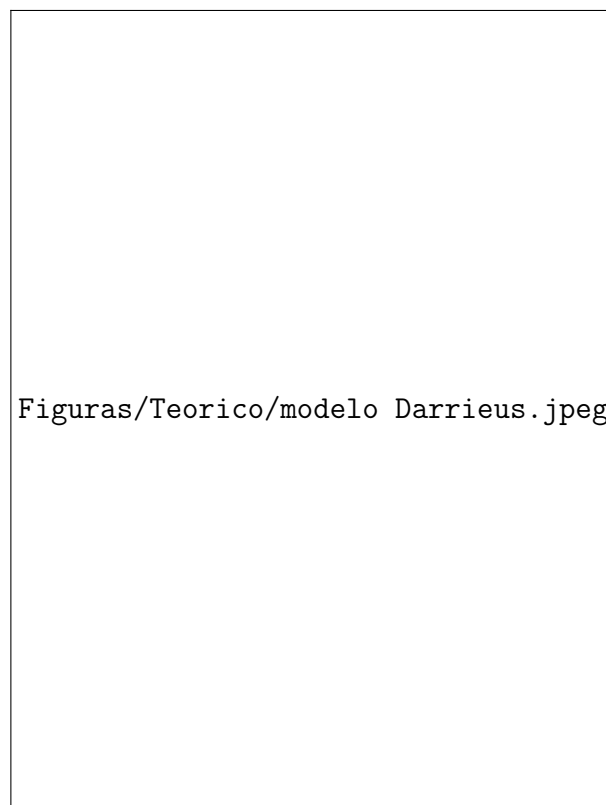
$$A = \frac{2}{3} \cdot (\text{largura máxima do rotor até o centro}) \times (\text{altura do rotor}) \quad (2.14)$$

Figura 2.18 – Área varrida pelas pás de uma turbina de eixo horizontal.



Fonte: Fadigas (2011) adaptado de Burton et al. (2001).

Figura 2.19 – Modelo de Darrieus.



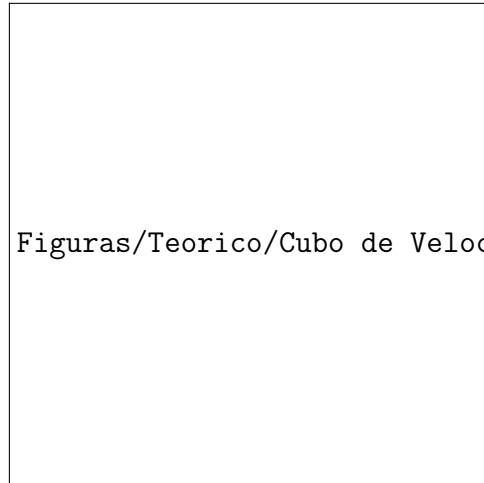
Fonte: Quora (2024).

Os aspectos mais importantes, destaca Fadigas (2011), são que a potência do vento depende da área de captação e é proporcional ao cubo de sua velocidade. Pequenas variações na velocidade do vento podem resultar em grandes mudanças na potência.

A figura 2.20 demonstra como a densidade de potência do vento varia com a velocidade. Por exemplo, na figura 2.20 é possível ver em destaque para uma velocidade de 8 m/s com a densidade de potência (ao nível do mar) de 314 W/m². Quando a velocidade dobra para 16 m/s,

a densidade de potência aumenta para 2.509 W/m^2 , ou seja, oito vezes maior. Isso enfatiza a importância de obter dados altamente precisos.

Figura 2.20 – Curva de potência do vento em função de sua velocidade.



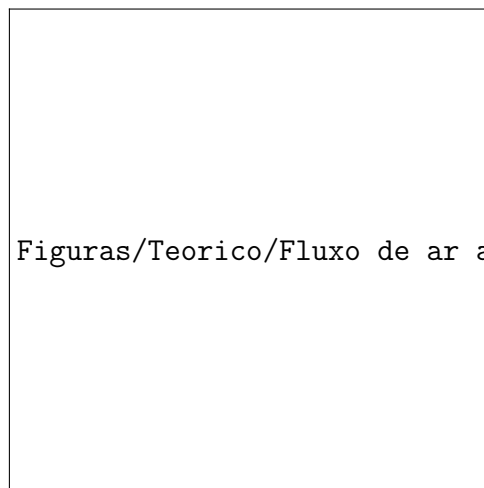
Figuras/Teorico/Cubo de Velocidade do Vento.png

Fonte: Danish Wind Industry Association (2000).

2.4.2 Determinação da Energia Convertida em Potência Mecânica

A equação (2.10) refere-se a potência contida nos ventos ou potência eólica determinada para um cilindro, em função da massa específica do ar, área de captação e velocidade do vento. Entretanto, nesta estimativa a velocidade não sofre perturbação, ou seja, é uma estimativa de potência antes de atingir as pás do rotor. Em cenário real, esse vento ao encontrar as pás do aerogerador terá o seu perfil modificado, como ressaltado na figura 2.21.

Figura 2.21 – Passagem de ar por uma turbina eólica de eixo horizontal.



Figuras/Teorico/Fluxo de ar através de uma turbina eólica de eixo horizontal.png

Fonte: Rocha et al. (2023).

O vento, ao passar pelo aerogerador, tem uma parte de sua potência convertida em potência mecânica. Como resultado dessa conversão, a velocidade inicial do vento diminui durante a passagem pelo aerogerador, e a área de fluxo de ar aumenta. Utilizando a equação da continuidade, sabemos que o fluxo de massa \dot{m} permanece constante, conforme destacado na equação (2.15). Além disso, a potência mecânica (P_{mec}) gerada é igual à diferença entre a potência de entrada (P_{in}) e a potência de saída (P_{out}), conforme expresso na equação (2.16).

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 = \dot{m} \quad (\text{kg/s}) \quad (2.15)$$

$$P_{mec} = P_{in} - P_{out} \quad (2.16)$$

As potências de entrada e saída podem ser expressas a partir de (2.10)

$$P_{in} = \frac{1}{2} \rho A_1 v_1^3 \quad (2.17)$$

$$P_{out} = \frac{1}{2} \rho A_2 v_2^3 \quad (2.18)$$

assim, substituindo em (2.16), tem-se

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho A_1 v_1^3 - \frac{1}{2} \rho A_2 v_2^3 = \frac{1}{2} \rho (A_1 v_1^3 - A_2 v_2^3) \quad (2.19)$$

em que, a potência mecânica P_{mec} extraída é equivalente à diferença entre o fluxo de ar antes e após a passagem pela turbina. Aplicando a equação da continuidade (2.15) em (2.19), obtém-se:

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho A_1 v_1 (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \dot{m} (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.20)$$

2.5 CURVA COEFICIENTE DE PERFORMANCE (C_p)

A curva C_p , ou curva do coeficiente de potência, é uma representação fundamental na análise de desempenho de turbinas eólicas, ilustrando a eficiência com que uma turbina converte a energia cinética do vento em energia mecânica no eixo da turbina. O coeficiente de potência C_p é adimensional e varia em função da razão de velocidade das pontas das pás λ (*tip speed ratio*, TSR), que é uma medida da velocidade linear das pontas das pás relativa à velocidade do vento.

Segundo Betz (1926), uma turbina eólica ideal reduz a velocidade do vento a 2/3 da velocidade original, limitando a potência capturável a aproximadamente 59% da potência total disponível. Esse limite é conhecido como o limite de Betz. Assim aplicando o conceito a

equação 2.10 da potência do extraída do vento, tem-se:

$$P_{mec} = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3 \quad (2.21)$$

o coeficiente de potência em termos isolados:

$$C_p = \frac{P_{mec}}{\frac{1}{2} \rho A v^3} \quad (2.22)$$

- P_{mec} representa a potência mecânica produzida pela turbina,
- ρ é a densidade do ar,
- A corresponde à área alcançada pelas pás da turbina,
- v indica a velocidade do vento ao entrar na turbina.

Em turbinas eólicas reais, o coeficiente de performance varia tipicamente de acordo com o TSR (λ), dada pela equação, e o ângulo de passo das pás.

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (2.23)$$

sendo que

- ω : representa a velocidade angular do rotor, medida em radianos por segundo [rad/s],
- R : indica o raio das pás do rotor, em metros [m],
- v : denota a velocidade do vento, em metros por segundo [m/s].

O comportamento da curva C_p é influenciado pela aerodinâmica das pás, pelas características do rotor, e pelas condições operacionais da turbina. Em turbinas com controle ativo de passo, o ângulo das pás (β) é ajustado para maximizar C_p para diferentes velocidades do vento e para proteger a turbina em condições de vento forte.

Modelos matemáticos, como os desenvolvidos por Heier (2014) e por Slootweg, Polinder e Kling (2003), utilizam séries de equações, (2.23) - (2.24), para estimar C_p em função do TSR e do ângulo de passo das pás (β). Esses modelos são cruciais para o design otimizado e a operação eficiente de turbinas eólicas, permitindo que operadores e designers ajustem as turbinas para operar próximo ao máximo coeficiente de performance sob várias condições de vento.

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \beta c_5 - c_6 \right) e^{-\frac{c_7}{\lambda_i}} \quad (2.24)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + c_8 \beta} - \frac{c_9}{\beta^3 + 1}} \quad (2.25)$$

β é o ângulo de passo das pás.

λ é o coeficiente de velocidade.

Os coeficientes c_i estão delineados na Tabela 2.4, conforme descrito por Heier (2014), Slootweg, Polinder e Kling (2003) e Raiambal e Chellamuth (2002). A metodologia para estimar a eficiência aerodinâmica sugerida por Heier e Raiambal é aplicável universalmente, abrangendo tanto turbinas de velocidade fixa quanto variável. Por outro lado, Slootweg, Polinder e Kling (2003) adaptaram os parâmetros nas equações (2.24) e (2.25) para refletir as particularidades dessas duas categorias de turbinas eólicas, permitindo uma representação mais precisa das curvas de desempenho em simulações computacionais.

Tabela 2.4 – Valores propostos para os parâmetros de cálculo do $C_p(\lambda, \beta)$

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9
Heier	0.5	116	0.4	0	-	5	21	0.08	0.035
Raiambal	0.5	116	0.4	0	-	5	16.5	0.089	0.035
Velocidade Constante	0.44	125	0	0	0	6.94	16.5	0	-0.002
Velocidade Variável	0.73	151	0.58	0.002	2.14	13.2	18.4	-0.02	-0.003

Fonte: Vian (2021).

Inserindo os valores da Tabela 2.4 em (2.24) e (2.25), tem-se conforme Heier (2014)

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} \quad (2.26)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}} \quad (2.27)$$

De acordo com Raiambal e Chellamuth (2002), obtêm-se

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{16.5}{\lambda_i}} \quad (2.28)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0.089} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}} \quad (2.29)$$

Por fim, para os parâmetros estabelecidos por Slootweg, Polinder e Kling (2003), tem-se para velocidade variável

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.73 \left(\frac{151}{\lambda_i} - 0.58\beta - 0.002\beta^{2.14} - 13.2 \right) e^{-\frac{18.4}{\lambda_i}} \quad (2.30)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda - 0.02\beta} - \frac{-0.003}{\beta^3 + 1}} \quad (2.31)$$

Nas figuras 2.22, 2.23 e 2.24, são apresentadas as curvas de potência para três metodologias de eficiência diferentes, simuladas via script no MATLAB para a turbina do projeto. A análise dos gráficos destacou a eficiência típica de 45% para aerogeradores horizontais de três pás, valor comumente observado em turbinas desse tipo (SMART SERVO, 2024).

Figura 2.22 – Coeficiente de Potência (C_p) versus Relação de Velocidade na Ponta (λ) para ângulo de passo β , para equações (2.28) e (2.29).



Figura 2.23 – Coeficiente de Potência (C_p) versus Relação de Velocidade na Ponta (λ) para ângulo de passo β , para equações (2.30) e (2.31).

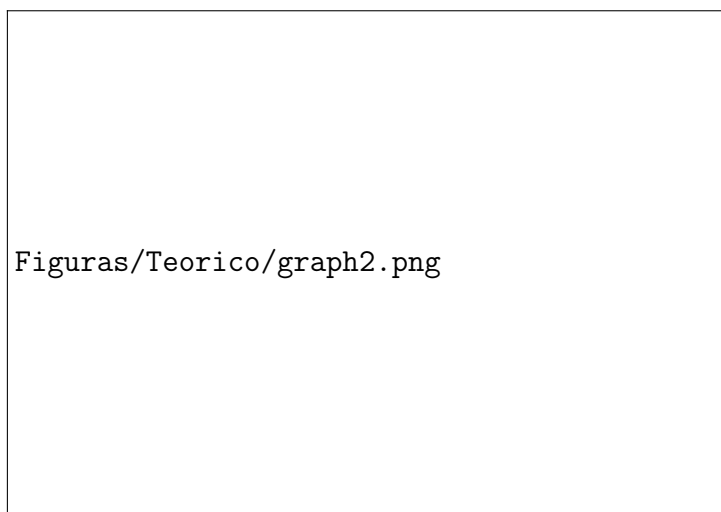
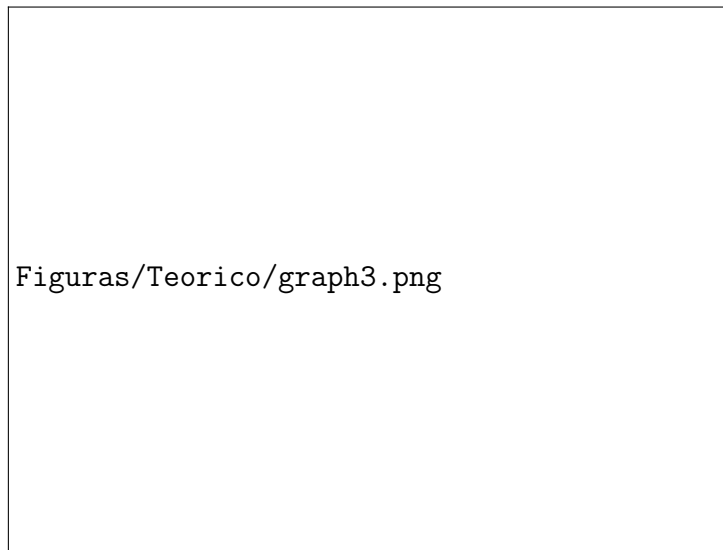


Figura 2.24 – Coeficiente de Potência (C_p) versus Relação de Velocidade na Ponta (λ) para ângulo de passo β , para equações (2.26) e (2.27).



2.6 SÉRIE TEMPORAL DO VENTO

Neste capítulo será apresentado a modelagem da série temporal de vento. Tal implementação torna-se necessária pois a série temporal de vento representa a variação da velocidade e seu comportamento ao longo do tempo. Toda a modelagem e simulação foi feita com o uso do software MATLAB/SIMULINK. O desenvolvimento da série temporal será dividido em duas partes: Vento e Fluxo e a Modelagem de Séries Temporais com o Filtro de Von Karman.

As séries temporais de vento são registros contínuos da velocidade e direção do vento que desempenham um papel crucial no processo de conversão eólica. Essas séries permitem a análise de padrões históricos e a previsão de flutuações futuras essenciais para a operação eficiente de aerogeradores. A abordagem 'Vento e Fluxo' divide o vento em categorias, facilitando a compreensão dos comportamentos ruidosos presentes nele. Na próxima seção será abordado o passo a passo para a representação da série temporal.

2.6.1 Vento e Fluxo

Dividir o fluxo de vento em categorias, como vento médio, turbulência e ondas, ajuda a entender e prever o comportamento do vento sob diversas condições atmosféricas. Cada uma dessas categorias pode ocorrer isoladamente ou simultaneamente, influenciando de maneira distinta a camada limite atmosférica, onde ocorre o transporte de calor, umidade e poluentes. A representação das três categorias pode ser vista na figura 2.25.

Figura 2.25 – Fluxo de ar decomposto em três categorias. U é o componente velocidade do vento ao longo do tempo t .

Figuras/Teorico/vento_sub3_fonte.png

Fonte: (STULL, 1988)

- **Vento Médio**

- **Transporte Horizontal Rápido (Advecção):** O vento médio é responsável por um transporte horizontal muito rápido conhecido como advecção, que é crucial para a movimentação de massas de ar e suas propriedades dentro da camada limite.
- **Velocidade do Vento:** Na camada limite, ventos horizontais variam geralmente entre 2 e 10 m/s. Esses ventos são essenciais para a dispersão de poluentes e o transporte de calor e umidade.
- **Influência da Fricção:** A fricção com a superfície da Terra reduz a velocidade do vento médio perto do solo. Esta redução é mais pronunciada nas proximidades do solo devido ao aumento do arrasto friccional.

- **Ondas**

- **Presença na Camada Limite Noturna:** Ondas atmosféricas são frequentemente observadas durante a noite na camada limite. Elas se formam devido a variações de temperatura e vento e podem se propagar a partir de fontes distantes como tempestades ou explosões.
- **Transporte de Calor e Poluentes:** Embora as ondas transportem pouco calor, umidade e outros escaladores (como poluentes), são muito eficazes no transporte de momento e energia.

- **Geração de Ondas:** Essas ondas podem ser geradas localmente por cisalhamentos do vento médio ou pelo fluxo de ar sobre obstáculos como montanhas ou edifícios. Elas podem se propagar a partir de fontes distantes e influenciar a dinâmica da camada limite.

- **Turbulência**

- **Caracterização:** A turbulência é visualizada como redemoinhos irregulares, chamados vórtices, e é um fenômeno superposto ao vento médio. Ela consiste em muitos vórtices de tamanhos diferentes que se sobrepõem.
- **Geração de Turbulência:** Grande parte da turbulência na camada limite é gerada por forças no solo como o aquecimento solar do solo, que cria termas de ar quente que sobem, e o arrasto friccional do ar ao passar sobre o solo. Obstáculos como árvores e edifícios também podem defletir o fluxo de ar, criando áreas de turbulência adjacentes e a jusante dos obstáculos.
- **Espectro de Turbulência:** A intensidade relativa dos diferentes vórtices define o espectro de turbulência, que descreve a distribuição de energia entre os vórtices de diferentes tamanhos.

Individualmente, cada categoria representa um efeito, ação ou força que atua sobre o fluxo de ar. Esta subdivisão do vento permite gerar uma representação matemática do vento ruidoso. Assim, de acordo com o comportamento, é possível estipular as seguintes equações:

$$v_{\text{vento turbulento}} = \sqrt{-2 \ln x_1} \quad (2.32)$$

$$v_{\text{vento ondulante}} = \sin(2\pi x_2) \quad (2.33)$$

Representado no MATLAB/SIMULINK nos gráficos da Figura 2.26.

2.6.2 Modelagem de Séries Temporais com o Filtro de Von Karman

Para modelar adequadamente as séries temporais do vento, é comum utilizar técnicas estatísticas e matemáticas, como o filtro de Von Karman, que ajuda a simular a turbulência do vento. Este filtro é especialmente útil para representar as características caóticas e não lineares do vento, que são críticas para a precisão das simulações. Baseando-se em Koch (2010) para o desenvolvimento do modelo.

Para efeito de análise, podemos considerar que a série temporal do vento é composta por dois termos: um constante e outro variável, sendo respectivamente a velocidade média do

Figura 2.26 – Representação do vento em velocidade média, ondulação e turbulência.

Figuras/Teorico/vento_sub3.png

vento (v) e a série temporal de turbulência do vento (v_t):

$$v(t) = v + v_t \quad (2.34)$$

A parcela que representa a série temporal de turbulência do vento v_t pode ser calculada utilizando o filtro de Von Karman, que é expresso pela função de transferência:

$$G_{Karman}(s) = \frac{K_f}{(1 + sT_f)^{5/6}} \quad (2.35)$$

Onde:

- K_f é o ganho do filtro;

- T_f é a constante de tempo.

Quando ativado por uma fonte de ruído gaussiano normalizado, a aproximação do filtro de Von Karman por meio de uma função de transferência racional se torna prática. A equação (2.36) e a Figura 2.27 representam esta aproximação.

$$G'_{karman}(s) = K_f \frac{(m_1 T_f s + 1)}{(T_f s + 1)(m_2 T_f s + 1)} \quad (2.36)$$

sendo os valores das constantes de Von Karman, dados por

- $m_1 = 0.4$;
- $m_2 = 0.25$.

Figura 2.27 – Aproximação do Filtro de Von Karman no *software* MATLAB/SIMULINK

Figuras/Teorico/Aprox_Filtro_VonKarman.png

Segundo Stannard e Bumby (2007), a constante de tempo T_f está vinculada às especificidades do ambiente onde a turbina está instalada e varia inversamente com a velocidade média do vento conforme a equação:

$$T_f = \frac{L_{turb}}{v} \quad (2.37)$$

Aqui, L_{turb} refere-se ao comprimento de turbulência, um fator influenciado pelas características físicas do terreno que não dependem do tipo de turbina utilizada. A determinação precisa de L_{turb} pode ser complexa devido à necessidade de considerar múltiplos fatores ambientais e topográficos.

Para simplificar essa estimativa, Martins (2010) propôs uma aproximação prática em que L_{turb} pode ser calculado como 6.5 vezes a altura da torre da turbina h . Assim, pode-se dizer que:

$$L_{turb} = 6.5h \quad (2.38)$$

representado na Figura 2.28.

Figura 2.28 – Calculo da constante de tempo T_f do Filtro simulado no *software* MATLAB/SIMULINK

Figuras/Teorico/constante_de_tempoTf.png

O coeficiente K_f , conhecido como ganho do filtro, é influenciado pela constante de tempo T_f e pela frequência de amostragem utilizada nas simulações. O ajuste dessas constantes, que são fundamentais no modelo de Von Karman, pode ser observado na Figura 2.29. A expressão para calcular K_f é dada por

$$K_f = \sqrt{\frac{2\pi T_f}{B(x,y)T_s}} \quad (2.39)$$

Aqui, $B(x,y)$ representa a função beta de Euler, um componente crucial que desempenha um papel na normalização do filtro em relação à distribuição de frequências.

Um aspecto crucial relacionado ao ganho K_f é que ele precisa ser calculado de maneira a preservar o desvio padrão do sinal de saída como unitário. A frequência de amostragem T_s definida neste estudo é 0.04 segundos.

O ruído utilizado para excitação do filtro é dado pelas equações utilizadas no vento turbulento (2.32) e vento ondulante (2.33), assim o ruído é dado por:

$$r = \sqrt{-2\ln(x_1)} \sin(2\pi x_2) \quad (2.40)$$

e representado na figura 2.30.

Este ruído, tem um desvio padrão unitário e segue uma distribuição gaussiana, e é gerado a partir de duas variáveis aleatórias x_1 e x_2 , ambas com distribuição uniforme no intervalo de 0 a 1. Esse método de geração de ruído é fundamental para simular com precisão a natureza aleatória e estocástica da turbulência do vento em modelos de séries temporais.

Figura 2.29 – Ganho K_f do Filtro de Von Karman simulado no *software* MATLAB/SIMULINK

Figuras/Teorico/GanhoDoFiltro_Kf.png

Figura 2.30 – O ruído utilizado para ativar o filtro gerado no *software* MATLAB/SIMULINK

Figuras/Teorico/ruídoGaussiano.png

O desvio padrão da turbulência D_p varia em função do coeficiente de turbulência longitudinal K_p e da velocidade média do vento v , seguindo a relação

$$D_p(v_t) = K_p v \quad (2.41)$$

O coeficiente K_p , também chamado de fator de turbulência, é determinado pelas características específicas do terreno. Conforme Stannard e Bumby (2007), foram compilados valores estimados para K_p para diversos tipos de terreno demonstrados na Tabela 2.5

Esta tabela é essencial para entender como variáveis ambientais influenciam a turbulência do vento em diferentes locais. Assim, adotando todas as equações e fatores topográficos, tem-se o modelo da serie temporal no MATLAB/SIMULINK representando na Figura 2.31 e a serie temporal gerada na Figura 2.32.

Tabela 2.5 – Fatores de turbulência para diferentes terrenos

Tipo de Terreno	K_p
Áreas Litorâneas	0.123
Lagos	0.145
Lugares Abertos	0.189
Áreas em construção	0.285
Centros Urbanos	0.434

Fonte: Adaptado de Koch (2010)

Figura 2.31 – Série Temporal de Vento modelado no *software* MATLAB/SIMULINK

Figuras/Teorico/SerieTemporaldeVento.png

2.7 PRINCÍPIOS DE FUNDAMENTO DAS TURBINAS EÓLICAS

As turbinas eólicas, comumente conhecidas como aerogeradores, são dispositivos projetados para otimizar a captação da energia cinética do vento, transformando-a em energia elétrica utilizável. O processo de conversão inicia-se quando o vento interage com as pás do rotor, que giram devido à força do vento. Essa rotação segue o princípio da conservação de energia, convertendo a energia cinética em energia mecânica no rotor, que, por sua vez, é transmitida ao gerador elétrico.

Na figura 2.33, observa-se um esquema detalhado desse processo. O vento impulsiona as pás da turbina, gerando energia mecânica que é transmitida por meio de um multiplicador mecânico, responsável pela conversão de torque e velocidade. Essa energia mecânica elevada é então convertida em energia elétrica no gerador. A conversão de energia mecânica em elétrica é acompanhada por um sistema de controle e proteção eletrônica, garantindo a segurança e eficiência da operação. Em seguida, um transformador elevador ajusta a tensão da energia gerada para níveis compatíveis com a rede elétrica, facilitando a distribuição.

Figura 2.32 – Resultado do modelo da Série Temporal de Vento *software* MATLAB/SIMULINK

Figuras/Teorico/serie temporal de vento_.png

Figura 2.33 – Esquema abrangente de operação de um aerogerador.

Figuras/Teorico/Esquema geral de funcionamento de um aerogerador.png

Fonte: Pavinatto (2005)

Historicamente, diversos tipos de turbinas foram experimentados, incluindo configurações de eixo horizontal e vertical, com várias quantidades de pás. Contudo, para geração em grande e médio porte, predominam atualmente as turbinas de eixo horizontal, com estrutura robusta, três pás e geradores de indução, que também possuem alinhamento ativo, como exemplificado na imagem 2.34. Apesar de sua popularidade, algumas características dessas turbinas, como o controle do ângulo de passo, ainda são alvo de discussões técnicas e ajustes para apri-

morar a eficiência da captação de energia e a resposta às condições variáveis do vento.

Além disso, existem vários aspectos que caracterizam um aerogerador, entre eles a topologia, o tamanho, o nível de potência, a eficiência energética e a localização.

2.8 COMPONENTES DE AEROGERADOR DE EIXO HORIZONTAL

Os aerogeradores de eixo horizontal são os mais comuns e amplamente utilizados no setor de energia eólica devido à sua eficiência e capacidade de gerar grandes quantidades de energia. A estrutura básica de um aerogerador de eixo horizontal é composta por diversos componentes essenciais que trabalham em conjunto para converter a energia cinética do vento em energia elétrica.

Figura 2.34 – Esquema de Turbina Eólica Moderna.



Fonte: CENTRO BRASILEIRO DE ENERGIA EÓLICA — CBEE (2000)

- I Pás: Ou lâminas, utilizando os mesmos perfis aerodinâmicos das asas de aviões, elas captam a energia cinética produzida pelos ventos e transferem para o rotor. Compostas geralmente de materiais leves e resistentes, como fibra de vidro ou carbono.
- II Rotor: Composto pelas pás e pelo cubo do rotor, o rotor é responsável por converter a

energia cinética do vento em energia mecânica.

- III Nacele: É o compartimento instalado no alto da torre, sendo ele o responsável por abrigar, suportar e proteger os principais componentes do sistema de geração de energia, como gerador, eixo e demais acoplamentos (de acordo com a configuração).
- IV Multiplicador de velocidade: Ou caixa de engrenagens. Utilizado em sistema com geradores assíncronos, sua principal funcionalidade é transformar uma rotação lenta em uma rotação rápida, geralmente de um intervalo de 10-60 rpm para valores próximos a 1200-1800 rpm.
- V Acoplamento elástico: É um tipo de acoplamento utilizado para conectar eixos rotativos. Sua função é transmitir o torque de um eixo a outro, absorvendo choques, vibrações e desalinhamento.
- VI Gerador Elétrico: Responsável pela conversão de energia mecânica em energia elétrica. Sendo mais comumente utilizado gerador de indução (ACKERMANN, 2005).
- VII Sensores de vento: Esses sensores monitoram as condições do vento, medindo a velocidade e a direção, por sua vez, comunicando ao mecanismo de orientação direcional.
- VIII Controle de giro: Também conhecido como sistema de *yaw*, é o componente responsável pelo posicionamento da nacele, alinhando-a em direção do vento e maximizando a captação.
- IX Torre de sustentação: Estrutura vertical responsável por suporta a nacele e o rotor, permitindo a captação dos ventos em uma altura maior.
- X Sistema de Freio: O sistema de freio é empregado para parar ou controlar a rotação do rotor em condições específicas, como durante a manutenção, em situações de emergência ou quando há vento excessivo.
- XI Sistema de controle: Responsável por garantir a segurança e otimizar a potência gerada através do controle de rotação, acionamento dos freios e/ou controle de passo. Além de, garantir a qualidade da energia gerada.

2.9 PERFIL AERODINÂMICO

O perfil aerodinâmico das pás de um aerogerador desempenha um papel fundamental na eficiência e na capacidade de geração de energia do sistema. As pás dos aerogeradores são projetadas para transformar a energia cinética do vento em energia mecânica de rotação, que,

Figura 2.35 – Aspectos de um perfil aerodinâmico.



Fonte: JUNIOR e RANGEL (2012)

por sua vez, é convertida em eletricidade pelo gerador. Para maximizar a eficiência dessa conversão, é essencial que o design do perfil das pás considere uma série de fatores aerodinâmicos, como a forma e o ângulo de ataque da superfície, a curvatura e o alongamento.

Um bom projeto de perfil aerodinâmico visa maximizar o coeficiente de sustentação e minimizar o coeficiente de arrasto em uma ampla faixa de velocidades de vento e ângulos de operação. Esse equilíbrio entre sustentação e arrasto é crucial, pois permite que as pás gerem a força de rotação necessária com menor resistência, contribuindo para uma maior eficiência energética do aerogerador, como destacado na figura 2.35. Além disso, o perfil deve ser resistente a condições extremas e oferecer boa resposta a variações de intensidade e direção do vento, otimizando o desempenho e a durabilidade do aerogerador.

- **Bordo de Ataque e Bordo de Fuga:** Referem-se, respectivamente, aos pontos dianteiro e traseiro do aerofólio. O bordo de ataque é o ponto inicial de contato do ar com o perfil, enquanto o bordo de fuga é o ponto final, onde o ar se desprende da superfície do aerofólio.
- **Extradorso e Intradorso:** Estas são as superfícies externas do aerofólio, sendo o extradorso a superfície superior e o intradorso a superfície inferior, que se estendem do bordo de ataque até o bordo de fuga.
- **Linha de Corda:** Trata-se de uma linha imaginária que conecta o bordo de ataque ao bordo de fuga. Essa linha serve como referência para a análise de diversos parâmetros geométricos e aerodinâmicos do aerofólio.
- **Corda:** Corresponde ao comprimento do segmento de reta que une os pontos do bordo de ataque e do bordo de fuga. É uma medida fundamental na caracterização geométrica do aerofólio e influencia diretamente suas propriedades aerodinâmicas.
- **Linha de Curvatura:** Refere-se ao lugar geométrico dos pontos equidistantes entre o extradorso e o intradorso, medidos perpendicularmente à linha de corda. A linha de

Figura 2.36 – Escoamento ao longo do perfil.



Fonte: Peixoto e Rodrigues (2009)

curvatura define a forma média do aerofólio, sendo útil para determinar o comportamento aerodinâmico e o perfil de pressão ao longo do aerofólio.

- **Camber:** Denomina-se "camber" à assimetria entre as superfícies superior (extradorso) e inferior (intradorso) de um aerofólio. Essa assimetria é responsável por gerar sustentação, uma vez que altera a distribuição de pressão ao redor do perfil.

2.9.1 Coeficientes e Parâmetros Aerodinâmicos

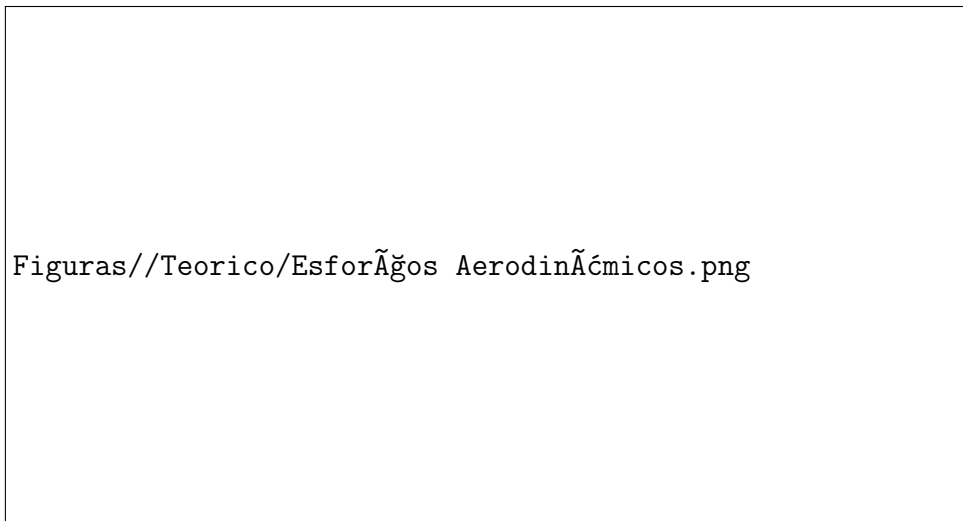
Quando um perfil aerodinâmico é imerso em um escoamento de fluido, o ar (ou outro fluido) que se movimenta em sua direção se divide em duas correntes principais. Como pode ser visto na figura 2.36, uma dessas correntes passa sobre a superfície superior do perfil, conhecida como **extradorso**, enquanto a outra corrente circula pela superfície inferior, chamada **intradorso**.

Essa divisão do fluxo de ar ao redor do perfil cria diferenças de pressão entre o extradorso e o intradorso. Normalmente, devido à curvatura do perfil, o fluido que passa pelo extradorso se move mais rapidamente do que aquele que passa pelo intradorso. Segundo o princípio de Bernoulli, essa diferença de velocidade gera uma pressão menor no extradorso em comparação ao intradorso, resultando em uma força de sustentação que age sobre o perfil e uma força de arrasto que age perpendicular a ela, como pode ser visualizado na figura 2.37.

Para calcular a Força de Sustentação L e Força de Arrasto D em um perfil aerodinâmico, utiliza-se respectivamente a Equação 2.42 e 2.43, conforme descrito por Halliday, Resnick e Walker (1996):

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_S \cdot C_L \quad (2.42)$$

Figura 2.37 – Forças Aerodinâmicas



Fonte: Weltner e outros (2001)

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_s \cdot C_D \quad (2.43)$$

Em que:

- ρ : representa a densidade do fluido ao redor do perfil;
- V : é a velocidade relativa do escoamento;
- A_s : é a área de superfície do perfil;
- C_L : é o coeficiente de sustentação, que depende da forma e do ângulo de ataque do perfil.
- C_D : é o coeficiente de Arrasto, que indica a resistência ao movimento do perfil dentro do fluido.

Essa expressão demonstra que a força de sustentação aumenta com a densidade do fluido, com o quadrado da velocidade do escoamento e com o coeficiente de sustentação, que reflete as características aerodinâmicas do perfil. Quanto maior o coeficiente de sustentação, maior a capacidade do perfil de gerar sustentação.

Por outro lado, a Força de Arrasto atua paralelamente à direção do fluxo e se opõe ao movimento do perfil no escoamento. Essa força é resultado da interação entre o aerofólio e o fluido, e está relacionada principalmente a duas causas: o arrasto de atrito e o arrasto de forma.

- **Arrasto de Atrito:** Esse tipo de arrasto ocorre devido às tensões de cisalhamento na superfície do perfil, geradas pela fricção entre o fluido e a superfície do objeto.
- **Arrasto de Forma:** Esse tipo de arrasto é causado pelo desequilíbrio de pressão em torno do perfil, especialmente nas regiões onde o fluxo se separa da superfície.

2.10 CONTROLE DE ÂNGULO DE PASSO

2.11 CONTROLADOR YAW

2.12 TURBINA EÓLICA TE24

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizada a turbina eólica TE24, produzida pela VIND Aerogeradores. Ela se destaca por sua tecnologia totalmente nacional, facilitando o suporte técnico e a manutenção local. Este aerogerador é projetado para maximizar a eficiência e a flexibilidade operacional, incorporando técnicas e tecnologias geralmente aplicadas apenas a aerogeradores de grande porte.

Desenvolvida em parceria com o Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), a turbina apresenta variadores de passo eletronicamente controlados e sistemas de controle de última geração, garantindo alta eficiência e adaptabilidade a diferentes condições de vento.

A TE24 é equipada com um rotor de 15 metros de diâmetro e possui uma potência nominal de 24KW, capaz de gerar eletricidade suficiente para atender a demanda de pequenos empreendimentos comerciais ou unidades industriais. A turbina opera eficientemente em uma ampla variação de velocidade de vento, indo de 2,3 m/s (velocidade de *cut-in*) até 20 m/s (velocidade de *cut-out*). Essa faixa operacional ampla permite aplicabilidade em diversas regiões, adaptando-se a diferentes perfis de vento. Essa característica é destacada nos dados obtidos da operação em Franca-SP, detalhados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Comparação entre geração estimada com dados teóricos e dados reais de geração de energia eólica na Vila Santa Terezinha, Franca – SP.

Vel. Média de Vento ($\frac{m}{s}$)	Geração estimada com dados teóricos ($\frac{kwh}{ms}$)	Geração estimada com dados reais ($\frac{kwh}{ms}$)	%
3	1150	1808	57%
3.5	1871	2722	45%
4	2748	3729	36%
4.5	3727	4776	28%
5	4748	5817	23%
5.5	5763	6817	18%
6	6736	7753	15%
6.5	7642	8610	13%
7	8469	9381	11%
7.5	9206	10061	9%
8	9848	10645	8%

Fonte: Dados de Geração TE24 - Real - Franca

A turbina eólica TE24 é projetada para operar de forma eficiente e durável, incorporando materiais de alta qualidade. As pás são feitas de compósitos reforçados com fibras de vidro, garantindo durabilidade e resistência. A torre é galvanizada a fogo com tripla camada de proteção contra corrosão, aumentando a vida útil do equipamento. A tensão de saída da turbina pode ser

configurada para 220V, 380V ou 440V trifásica, conforme as necessidades da instalação. Suas características técnicas elétricas estão descritas na tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Características Elétricas do Aerogerador TE24

Característica	Descrição
Potência nominal do gerador	30 KVA ou 24KW
Tensão de saída	220/380/440V trifásica
Velocidade nominal do vento	09 m/s
Velocidade mínima	2,3 m/s (“cut-in”)
Velocidade máxima de operação	20,0 m/s (“cut-out”)
Velocidade de proteção	45,0 m/s (rajada)
Controle de prioridades de carga	4 ramais
Inversor de Frequência	Versão “ON GRID” ou similar

Além disso, a turbina TE24 oferece flexibilidade na instalação, podendo ser configurada para diferentes alturas de torre e tipos de solo. A possibilidade de conexão on-grid permite a compensação da energia gerada com o consumo, reduzindo significativamente os custos de eletricidade e aumentando a viabilidade econômica do projeto. Suas características técnicas construtivas estão descritas na tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Características Construtivas do Aerogerador TE24

Característica	Descrição
Tipo de turbina	Três pás
Posição do eixo	Horizontal
Diâmetro do rotor	15 metros
Variador de Passo de hélice	Ativo – mecanismo original
Movimento Azimutal (“yaw”)	Ativo
Material das pás	Compósitos
Torre – configuração	Chapa dobrada e galvanizada a fogo
Proteção contra corrosão	Tripla camada
Altura da torre	Variável de acordo com o local escolhido
Sistema de aterramento da torre	Sim
Sistema de freio de emergência	Sim

Devido às diversas características presentes neste modelo de aerogerador, ele foi escolhido como referência para o desenvolvimento deste trabalho. Suas propriedades construtivas, incluindo o controle do ângulo de passo da hélice, permitem a análise da máxima potência. As características elétricas, como a velocidade de *cut-in* de 2,3 m/s, conferem alta aplicabilidade em cenários adversos, tornando este modelo uma excelente opção para o estudo e desenvolvimento propostos.

3 METODOLOGIA

Este trabalho está sendo desenvolvido mediante pesquisa explicativa a fim de entender como diferentes fatores modificam e afetam o desempenho das turbinas eólicas, buscando analisar e validar modelos teóricos. A figura 3.1 apresenta o fluxograma que ilustra o fluxo dessas etapas. Desse modo, será adotado uma abordagem composta por procedimentos de pesquisa bibliográfica e documental, simulação computacional e análise de dados.

Inicialmente, serão realizado estudos sobre perfis de vento, abordando as características atmosféricas e locais, determinando assim o potencial eólico, a curva de potência e a serie temporal. Em seguida, será desenvolvido o estudo e a modelagem dos componentes pertencentes a turbina eólica a fim de criar o modelo da turbina.

Serão consultados artigos científicos, livros, teses, dissertações e publicações técnicas, além de documentos técnicos, como especificações de turbinas eólicas e relatórios de desempenho de sistemas eólicos.

A pesquisa será conduzida com base no perfil de vento da cidade de Cachoeira do Sul-RS. Este cenário foi escolhido devido às suas características de vento favoráveis para a geração de energia eólica.

Para o desenvolvimento e execução das simulações será utilizado o software MATLAB/Simulink. Os dados de vento de Cachoeira do Sul serão integrados aos modelos, a fim de criar um cenário de simulação, a Figura 3.2 sintetiza de maneira ilustrativa o cenário a ser simulado. Elaborado o cenário, inicia-se o refinamento através de análise, que inclui a avaliação de métricas de desempenho, como eficiência de conversão de energia e comportamento dinâmico dos componentes. A validação dos modelos simulados será realizada comparando os resultados das simulações com dados teóricos e com dados disponíveis na literatura.

Assim, dentre os objetos da pesquisa tem-se o desenvolvimento de uma plataforma de simulação de turbina eólica, que permite a modelagem e análise dos diversos componentes de uma turbina eólica. A pesquisa se concentra na modelagem teórica do comportamento do vento e dos componentes, como as pás, o rotor, o gerador e os sistemas de controle. Além disso, os dados de vento de Cachoeira do Sul são utilizados como base para as simulações teóricas, permitindo uma avaliação de inserção de aerogeradores na UFSM campus universitário de Cachoeira do Sul.

Figura 3.1 – Fluxograma de desenvolvimento do projeto.



Figuras/Teorico/TCC - AEROGERADOR.png

Figura 3.2 – Ilustração do cenário.



3.1 CRONOGRAMA PARA DESENVOLVIMENTO DO TCC II

O cronograma a seguir detalha as atividades planejadas para o desenvolvimento da segunda parte do TCC, abordando os passos restantes para o desenvolvimento do trabalho. Este cronograma está organizado de agosto a dezembro. Cada ação está programada para ocorrer em períodos específicos, garantindo uma abordagem estruturada e organizada do projeto.

Tabela 3.1 – Cronograma de ações

Ação	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Análise para Modelos de Controle de Operação					
Desenvolvimento do Sistema de Controle da Turbina					
Desenvolvimento da Plataforma de Simulação					
Testes e Validação do Sistema					
Avaliação do Desempenho					
Documentação e Preparação do Relatório Final					

O cronograma é abordado em detalhes a seguir:

1. **Análise para Modelos de Controle de Operação:** Será realizada a análise para o desenvolvimento dos modelos de controle de operação. Esta etapa é fundamental para entender as necessidades do sistema e definir os parâmetros de controle.
2. **Desenvolvimento do Sistema de Controle da Turbina:** Esta fase envolve a implementação de algoritmos de controle e ajustes necessários para otimizar o funcionamento da turbina.
3. **Desenvolvimento da Plataforma de Simulação:** Início do desenvolvimento da plataforma de simulação. Esta etapa é crucial para integrar os modelos matemáticos e de controle em um ambiente de simulação.
4. **Testes e Validação do Sistema:** Início dos testes e validação do sistema, verificando a precisão dos modelos e a eficácia dos controles implementados em estudos de casos envolvendo turbinas eólicas de velocidade variável.
5. **Avaliação do Desempenho:** Início da avaliação do desempenho do sistema de simulação, analisando a eficácia e eficiência sob diferentes condições operacionais.
6. **Documentação e Preparação do Relatório Final:** Compilação de toda a documentação do projeto e preparação do relatório final. Esta etapa inclui os resultados, conclusões e recomendações baseadas nas análises realizadas ao longo do projeto.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de simulação para turbinas eólicas utilizando MATLAB/SIMULINK®, focando na modelagem e análise do comportamento de aerogeradores, especialmente o modelo TE24, sob diferentes condições de vento. O desenvolvimento desse simulador permitira a avaliação detalhada dos componentes da turbina, como pás, rotor, gerador e sistemas de controle, contribuindo para uma melhor compreensão de como otimizar a eficiência energética dos aerogeradores.

A metodologia empregada incluiu a integração de dados de vento reais da cidade de Cachoeira do Sul, possibilitando a criação de cenários de simulação realistas. A validação dos modelos teóricos com dados empíricos demonstrou a precisão das simulações realizadas, destacando a relevância do uso de software como MATLAB/SIMULINK® para estudos na área de energia eólica.

Os resultados obtidos reforçam a importância do desenvolvimento da plataforma de simulação na previsão de desempenho. O desenvolvimento e a validação de modelos precisos são essenciais para o avanço das tecnologias de conversão de energia eólica, contribuindo para a inserção eficiente de aerogeradores na matriz energética brasileira.

Além disso, este trabalho evidencia o potencial de crescimento da energia eólica no Brasil, destacando a relevância de investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento na área. A utilização de fontes renováveis como a energia eólica é crucial para a diversificação da matriz energética e para a redução dos impactos ambientais associados à geração de eletricidade.

Em suma, a pesquisa alcançou seus objetivos para desenvolvimento do TCC 1, assim, tendo um primeiro modelo de perfil eólico e sugerindo a integração de sistemas de supervisão e controle mais avançados, bem como a análise de diferentes regimes operacionais para turbinas eólicas. A continuidade desse tipo de pesquisa é fundamental para o desenvolvimento sustentável do setor energético.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEólica, A. B. de E. E. **Boletim Anual de Geração Eólica 2020**. 2020. Acesso em: 17 jul. 2024. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2022/04/PT\Boletim-Anual-de-Geracao\2020.pdf>>.

ACKERMANN, T. **Wind Power in Power System**. 1. ed. London: John Wiley & Sons, Ltd, 2005.

Agência Internacional de Energia. **Dados sobre o crescimento do consumo mundial de energia elétrica**. 2024. Acesso em: 17 jul. 2024. Disponível em: <<https://www.iea.org>>.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Capacidade de Geração no Brasil**. 2009. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>>.

Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica). **Energia eólica chega à sétima posição no ranking mundial de geração abastecendo 10% do Brasil**. 2017. Acesso em: 24 jul. 2024. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/energia-eolica-chega-a-setima-posicao-no-ranking-mundial-de-geracao-abastecendo-10-do-brasil/>>.

_____. **Boletim Anual 2024**. 2024. Acesso em: 24 jul. 2024. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2024/07/424_ABEEOLICA_BOLETIM-ANUAL-2024_DIGITAL_PT_V3.pdf>.

BATCHELOR, G. K. **An Introduction to Fluid Dynamics**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2000.

BETZ, A. **Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen**. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 1926.

BNDES, B. N. de Desenvolvimento Econômico e S. **Dados sobre investimentos no setor de energia eólica e previsões de investimentos futuros**. 2024. Acesso em: 17 jul. 2024. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br>>.

BURTON, T. et al. **Wind Energy Handbook**. Londres: John Wiley & Sons, 2001.

CALIJURI, M. L.; CUNHA, D. G. A matriz elétrica mundial é predominantemente fóssil, e os esforços para reduzir a dependência desses combustíveis de alto impacto ambiental são cruciais para mitigar as mudanças climáticas. In: ANTAC. **Anais do 10. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. São Paulo, 2013. p. 485–494.

CARVALHO, P. **Geração Eólica**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2003.

CENTRO BRASILEIRO DE ENERGIA EÓLICA — CBEE. **Energia Eólica**. Boulder, 2000. Acesso em 9 abr. 2024. Disponível em: <<https://livroaberto.ibict.br/bitstream/1/582/7/06/%20-%20Energia%20E%20C2%BElica%283%29.pdf>>.

Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB). **Atlas Eólico**. 2013. Acesso em: 24 jul. 2024. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas_eolico&>.

CEPEL. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Rio de Janeiro, RJ: CEPEL, 2001.

Danish Wind Industry Association. **Wind Energy Reference Manual**. 2000. Acesso em: junho 2024. Disponível em: <<http://ele.aut.ac.ir/~wind/en/tour/wres/variab.htm>>.

DESCONHECIDO. **Como é formada a ATMOSFERA TERRESTRE**. Boulder, 2019. Acesso em: 14 jun. 2024. Disponível em: <<https://hangarmma.com.br/blog/atmosfera-terrestre/>>.

DUTRA, R. **Viabilidade técnico-econômica da energia eólica face ao novo marco regulatório do setor elétrico brasileiro**. 2001. 259 p. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético)) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001. Programa de Pós-Graduação em Engenharia (Coppe).

Empresa de Pesquisa Energética. **Dados sobre o crescimento do consumo de energia elétrica no Brasil entre 2010 e 2020**. 2024. Acesso em: 17 jul. 2024. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br>>.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balanço Energético Nacional 2020: Ano base 2019**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2020. <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2024.

ESTADÃO. **Energia eólica no Brasil: crescimento e investimentos**. 2024. Acesso em: 17 jul. 2024. Disponível em: <<https://www.estadao.com.br/economia/negocios/energia-eolica-brasil-crescimento-investimentos/>>.

FADIGAS, E. A. F. A. **Energia Eólica**. E-book. Barueri, SP: Editora Manole, 2011. Acesso em: 14 jun. 2024. ISBN 9788520446539. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788520446539/>>.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física 2**. [S.l.]: s.n., 1996. v. 4.

HEIER, S. **Wind Energy Systems: Operation and Control**. [S.l.]: Springer, 2014.

HIRATA, M. **Energia Eólica – Uma Introdução**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1985.

JUNIOR, T.; RANGEL, C. **Desempenho aerodinâmico de turbinas eólicas de eje vertical en función de temperatura de superficie de álabe**. 2012. Dissertação (Mestrado) — Universidad de Chile, 2012.

KOCH, G. G. **Implementação de um Simulador para Turbina Eólica de Velocidade Variável com MATLAB/SIMULINK® e Estudo do Sistema de Emulação do Aerogerador DR14**. 2010. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brazil, 2010.

LUTGENS, E. J. T. F. K. **The Atmosphere: An Introduction to Meteorology**. 12th. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2012. 506 p. ISBN 978-0321756312.

MANWELL J.G. MCGOWAN, A. R. J. **Wind Energy Explained: Theory, Design and Applications**. London: John Wiley & Sons, 2004.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 1, 2008. Acesso em: 21 set. 2020. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172008000100005>.

MARTINS, M. **Avaliação da Qualidade de Energia e Performance de Potência de Turbinas Eólicas Conectadas à Rede Elétrica**. 2010. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brazil, 2010.

Nações Unidas. **Protocolo de Kyoto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Kyoto, Japão, 1997.

_____. **Acordo de Paris**. Paris, França, 2015.

PASSOS, J. C. **Camada limite**. [S.l.], 2014.

PAVINATTO, E. F. **Ferramenta para Auxílio à Análise de Viabilidade Técnica da Conexão de Parques Eólicos à Rede Elétrica**. 2005. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Programa de Engenharia Elétrica, COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, 2005. 2005.

PEIXOTO, P. d. S.; RODRIGUES, W. G. **Noções de mecânica de fluidos com aplicações em perfis aerodinâmicos**. [S.l.]: São Paulo, 2009.

PINTO, M. d. O. O vento. In: **Fundamentos da energia eólica**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. p. 47–66.

Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA). **Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica Proinfa**. 2024. Acesso em: 24 jul. 2024. Disponível em: <<https://proinfa.enbpar.gov.br/>>.

QUORA. **Quais são as desvantagens das turbinas Darrieus**. 2024. Acesso em: 10 jul. 2024. Disponível em: <<https://pt.quora.com/Quais-s%C3%A3o-as-desvantagens-das-turbinas-darrieus>>.

RAIAMBAL, K.; CHELLAMUTH, C. Modeling and simulation of grid connected wind electric generating system. In: **Proceedings of IEEE TENCON'02**. [s.n.], 2002. p. 1847–1952. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1182696>>.

REBOITA, M. S. et al. Entendendo o tempo e o clima na américa do sul. **Terra e Didática**, v. 8, n. 1, p. 34–50, 2012. Acesso em: 20 set. 2020. Disponível em: <<https://cutt.ly/0gssd5Q>>.

ROCHA, A. V. d. et al. **Fundamentos de Energia Eólica**. 1. ed. Natal: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, 2023.

ROHATGI, J.; NELSON, V. **Wind Characteristics: An Analysis for the Generation of Wind Power**. Canyon: West Texas A&M University, 1994.

SCHLICHTING, H. **Boundary-Layer Theory**. 8th. ed. [S.l.]: Springer, 2000.

SILVA, P. **Sistema para tratamento, armazenamento e disseminação de dados de vento**. 1999. 113 p. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica)) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999. Programa de Pós-Graduação em Engenharia (Coppe).

SLOOTWEG, J. G.; POLINDER, H.; KLING, W. L. Dynamic modelling of a wind turbine with doubly fed induction generator. In: **Proceedings of the IEEE**. [S.l.: s.n.], 2003.

SMART SERVO. **Comparison of the Efficiency of Various Wind Turbines – Horizontal/Vertical Axis**. 2024. Acesso em: 14 jul. 2024. Disponível em: <<https://smartservo.org/comparison-of-the-efficiency-of-various-wind-turbines-horizontal-vertical-axis>>.

STANNARD, N.; BUMBY, J. Performance aspects of mains connected small-scale wind turbines. **IET Generation, Transmission & Distribution**, IET, v. 1, n. 2, p. 348–356, 2007.

STULL, R. B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988. 666 p. ISBN 978-94-010-8609-0.

TROEN, I.; PETERSEN, E. **European Wind Atlas**. 1. ed. [S.l.]: Roskilde, Riso National Laboratory, 1989.

VIAN Ângelo. **Energia Eólica: Fundamentos, Tecnologia e Aplicações**. [S.l.]: Editora Blucher, 2021. E-book. ISBN 9786555500585.

WeatherSpark. **Clima característico em Cachoeira do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil durante o ano**. 2024. Acesso em: 24 jul. 2024. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/y/29610/Clima-caracter%C3%AADstico-em-Cachoeira-do-Sul-Rio-Grande-do-Sul-Brasil-durante-o-ano\#Sections-Sources>.

WELTNER, K.; OUTROS. A dinâmica dos fluidos complementada e a sustentação da asa. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 23, n. 4, p. 429, 2001.