

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

André Vinícius Lima do Nascimento

**SISTEMA PARA ESTIMATIVA DO POTENCIAL EÓLICO
INTEGRANDO DADOS CLIMÁTICOS E AEROGERADORES**

Cachoeira do Sul, RS
2025

André Vinícius Lima do Nascimento

SISTEMA PARA ESTIMATIVA DO POTENCIAL EÓLICO INTEGRANDO DADOS CLIMÁTICOS E AEROGERADORES

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 requisito parcial para obtenção de grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Gustavo Guilherme Koch

Cachoeira do Sul, RS
2025

André Vinícius Lima do Nascimento

SISTEMA PARA ESTIMATIVA DO POTENCIAL EÓLICO INTEGRANDO DADOS CLIMÁTICOS E AEROGERADORES

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 requisito parcial para obtenção de grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 7 de agosto de 2025:

Gustavo Guilherme Koch, Dr. (UFSM)

Dion Lenon Prediger Feil, Dr. (UFSM)

Diogo Ribeiro Vargas, Dr. (UFSM)

Cachoeira do Sul, RS
2025

RESUMO

SISTEMA PARA ESTIMATIVA DO POTENCIAL EÓLICO INTEGRANDO DADOS CLIMÁTICOS E AEROGERADORES

AUTOR: André Vinícius Lima do Nascimento

ORIENTADOR: Gustavo Guilherme Koch

O crescimento da participação da energia eólica na matriz elétrica brasileira reforça a necessidade de ferramentas que auxiliem na análise do potencial eólico de diferentes regiões. Este trabalho apresenta o desenvolvimento do EolicSim, um sistema computacional voltado à estimativa do potencial eólico com base em dados climáticos e características técnicas de aerogeradores. O projeto iniciou com a modelagem e simulação em *software* MATLAB/SIMULINK, visando compreender os fundamentos do comportamento do vento e das turbinas. Posteriormente, a implementação foi migrada para Python, possibilitando maior flexibilidade, integração com APIs e melhor apresentação dos resultados por meio de interface interativa. A plataforma permite cadastrar localidades, integrar dados meteorológicos obtidos por APIs (Open-Meteo e NASA POWER), aplicar modelos de correção de velocidade do vento por altura (Lei da Potência e Lei Logarítmica) e inserir parâmetros de turbinas, como curva de potência, velocidades de cut-in e cut-out. O sistema foi implementado em Python, utilizando Streamlit para a interface e SQLite para armazenamento de dados, organizando-se em quatro domínios funcionais: Localidades, Dados Climáticos, Turbinas e Análise. Como estudo de caso, foram analisados dados da cidade de Cachoeira do Sul (RS), incluindo ajuste da distribuição de Weibull e projeção de perfis de vento em diferentes alturas. Os resultados demonstram que a ferramenta é capaz de estimar, de forma conceitual, a produção de energia a partir da combinação entre regime de ventos e curvas de potência de aerogeradores, oferecendo suporte a estudos preliminares de viabilidade.

Palavras-chave: Energia eólica, Potencial eólico, Weibull, Perfil de vento, Curva de potência, Python, Streamlit.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A WIND TURBINE SIMULATION SYSTEM

AUTHOR: André Vinícius Lima do Nascimento

ADVISOR: Gustavo Guilherme Koch

The growing share of wind energy in Brazil's electricity mix reinforces the need for tools that support the analysis of wind potential in different regions. This work presents the development of EolicSim, a computational system designed to estimate wind energy potential based on climatic data and technical characteristics of wind turbines. The project began with modeling and simulation in MATLAB/SIMULINK to understand the fundamentals of wind and turbine behavior. Subsequently, the implementation was migrated to Python, enabling greater flexibility, API integration, and improved result visualization through an interactive interface. The platform allows users to register locations, integrate meteorological data obtained from APIs (Open-Meteo and NASA POWER), apply wind speed correction models by height (Power Law and Logarithmic Law), and input turbine parameters such as power curve and cut-in and cut-out speeds. The system was implemented in Python, using Streamlit for the interface and SQLite for data storage, and is organized into four functional domains: Locations, Climatic Data, Turbines, and Analysis. As a case study, data from the city of Cachoeira do Sul (RS) were analyzed, including Weibull distribution fitting and wind profile projection at different heights. The results indicate that the tool can conceptually estimate energy production by combining wind regimes and turbine power curves, supporting preliminary feasibility studies.

Keywords: Wind energy, Wind potential, Weibull, Wind profile, Power curve, Python, Streamlit.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Crescimento das energias renováveis no Brasil nos últimos anos.	9
Figura 2.1 – Evolução da Capacidade Instalada de Energia Eólica	14
Figura 2.2 – Atlas do Potencial Eólico Brasileiro desenvolvido pelo modelo Brams em médias anuais.	14
Figura 2.3 – Camadas da Atmosfera	15
Figura 2.4 – Formação dos ventos devido ao movimento das massas de ar	16
Figura 2.5 – Esquema representativo da circulação geral da atmosfera terrestre.	17
Figura 2.6 – Circulação de ventos em escala local.(a) Brisa Marítima e (b) Brisa Terrestre.	18
Figura 2.7 – Circulação de ventos em escala local.(a) Brisa do Vale e (b) Brisa da Monta- nha.	18
Figura 2.8 – Variações de velocidade ao longo do tempo na Dinamarca.	21
Figura 2.9 – Esquema do perfil de velocidades sobre uma superfície plana.	23
Figura 2.10 – O fluxo de massa de ar com velocidade v através de uma área A (circular). .	26
Figura 2.11 – Área varrida pelas pás de uma turbina de eixo horizontal.	28
Figura 2.12 – Modelo de Darrieus.	29
Figura 2.13 – Curva de potência do vento em função de sua velocidade.	30
Figura 2.14 – Passagem de ar por uma turbina eólica de eixo horizontal.	30
Figura 2.15 – Coeficiente de Potência (C_p) versus Relação de Velocidade na Ponta (λ) para ângulo de passo β , para equações (2.28) e (2.29).	33
Figura 2.16 – Coeficiente de Potência (C_p) versus Relação de Velocidade na Ponta (λ) para ângulo de passo β , para equações (2.30) e (2.31).	33
Figura 2.17 – Coeficiente de Potência (C_p) versus Relação de Velocidade na Ponta (λ) para ângulo de passo β , para equações (2.26) e (2.27).	34
Figura 2.18 – Fluxo de ar decomposto em três categorias. U é o componente velocidade do vento ao longo do tempo t	35
Figura 2.19 – Representação do vento em velocidade média, ondulação e turbulência. ...	37
Figura 2.20 – Aproximação do Filtro de Von Karman no <i>software</i> MATLAB/SIMULINK	38
Figura 2.21 – Calculo da constante de tempo T_f do Filtro simulado no <i>software</i> MA- TLAB/SIMULINK	39
Figura 2.22 – Ganho K_f do Filtro de Von Karman simulado no <i>software</i> MATLAB/SIMULINK 40	
Figura 2.23 – O ruído utilizado para ativar o filtro gerado no <i>software</i> MATLAB/SIMULINK 40	
Figura 2.24 – Série Temporal de Vento modelado no <i>software</i> MATLAB/SIMULINK ...	41
Figura 2.25 – Resultado do modelo da Série Temporal de Vento <i>software</i> MATLAB/SIMULINK 42	
Figura 2.26 – Esquema abrangente de operação de um aerogerador.	43
Figura 2.27 – Esquema de Turbina Eólica Moderna.	44
Figura 3.1 – Fluxograma de desenvolvimento do projeto.	52
Figura 4.1 – Atlas Eólico para o Rio Grande do Sul à altura de 100 metros.	53
Figura 4.2 – Velocidade média do vento em Cachoeira do Sul.	54
Figura 4.3 – Gráfico dos dados do anemômetro instalado na UFSM Campus Cachoeira do Sul.	54
Figura 4.4 – Fotografia do anemômetro instalado na UFSM Campus Cachoeira do Sul. ...	55
Figura 4.5 – Distribuição de Weibull ajustada aos dados do anemômetro instalado na UFSM	

Campus Cachoeira do Sul.	55
Figura 4.6 – Perfis de velocidade do vento em função da altura, obtidos pela Lei da Potência e pela Lei Logarítmica.	56
Figura 4.7 – Fluxo de dados integrado do sistema EolicSim.	58
Figura 4.8 – Organização das páginas na interface do EolicSim.	58
Figura 4.9 – Diagrama Entidade–Relacionamento do sistema EolicSim.	61
Figura 4.10 – Fluxo analítico de simulação do EolicSim.	62
Figura 4.11 – Diagrama de convergência de dados no EolicSim.	63
Figura 4.12 – Fluxo de Dados Integrado - EolicSim	63
Figura 4.13 – Divisão e Organização das paginas.	64
Figura 4.14 – Diagrama de Entidade e Relacionamento - EolicSim	67
Figura 4.15 – Fluxo de Dados - Localidades	68
Figura 4.16 – Apresentação das informações Geográficas no estado do Rio Grande do Sul	68
Figura 4.17 – Índices Geográficos	69
Figura 4.18 – Fluxograma Requisição de Dados Meteorologicos	71
Figura 4.19 – Fluxo de Dados Turbina	72
Figura 4.20 – Diagrama de Banco de Dados Turbina	73
Figura 4.21 – Fluxo Analítico de Simulação do EolicSim	74
Figura 4.22 – Diagrama de Convergência - EolicSim	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Geração de energia elétrica por fonte renováveis no Brasil (2024)	10
Tabela 2.1 – Principais características das escalas atmosféricas	19
Tabela 2.2 – Fator n para diferentes tipos de superfícies	24
Tabela 2.3 – Valores de comprimentos de rugosidade para diferentes terrenos	25
Tabela 2.4 – Parâmetros utilizados para o cálculo do $C_p(\lambda, \beta)$ segundo diferentes autores/modelos.....	32
Tabela 2.5 – Fatores de turbulência para diferentes terrenos	41
Tabela 2.6 – Comparação entre geração estimada com dados teóricos e dados reais de geração de energia eólica na Vila Santa Terezinha, Franca – SP.....	48
Tabela 2.7 – Características Elétricas do Aerogerador TE24	48
Tabela 2.8 – Características Construtivas do Aerogerador TE24.....	49
Tabela 4.1 – Comparação das velocidades do vento estimadas pela Lei da Potência e Lei Logarítmica em diferentes alturas.	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	OBJETIVO GERAL.....	11
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	BRASIL E SEU MAPA EÓLICO.....	13
2.1.1	Mapeamento do Potencial Eólico.....	14
2.2	ANALISE DOS VENTOS	15
2.2.1	Circulação dos Ventos	16
2.2.2	Classificação dos Movimentos Atmosféricos	18
2.2.3	Forças Fundamentais que Regem o Movimento do Vento.....	20
2.3	PERFIL DE VENTO	22
2.4	POTÊNCIA GERADA PELOS VENTOS	26
2.4.1	Avaliação da Energia Contida no Vento	26
2.4.2	Determinação da Energia Convertida em Potência Mecânica	28
2.5	CURVA COEFICIENTE DE PERFORMANCE (C_p)	30
2.6	SÉRIE TEMPORAL DO VENTO	33
2.6.1	Vento e Fluxo	34
2.6.2	Modelagem de Séries Temporais com o Filtro de Von Karman.....	36
2.7	PRINCÍPIOS DE FUNDAMENTO DAS TURBINAS EÓLICAS	42
2.8	COMPONENTES DE AEROGERADOR DE EIXO HORIZONTAL.....	43
2.9	CONTROLE DE ÂNGULO DE PASSO.....	45
2.10	CONTROLADOR YAW	46
2.11	TURBINA EÓLICA TE24	47
3	METODOLOGIA	50
4	DESENVOLVIMENTO	53
4.1	ANALISE DO CENÁRIO BASE	53
4.2	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA EOLCSIM	57
4.2.1	Concepção e Arquitetura	57
4.2.2	Tecnologias e Ferramentas.....	59
4.2.3	Modelagem do Banco de Dados	60
4.2.4	Fluxo Analítico e Integração	61
4.2.5	Tecnologias Adotados	64
4.2.5.1	<i>Linguagem - Python 3.12</i>	64
4.2.5.2	<i>Interface - Streamlit</i>	65
4.2.5.3	<i>Banco de Dados - SQLite</i>	65
4.2.5.4	<i>Principais Bibliotecas</i>	65
4.3	MODELAGEM DO BANCO DE DADOS	66
4.4	ARQUITETURA E DOMÍNIOS FUNCIONAIS	67
4.4.1	Domínio 1: Localidades	68
4.4.2	Domínio 2: Dados Climáticos	69
4.4.3	Domínio 3: Turbinas	72
4.4.4	Domínio 4: Análise e Simulação	73
4.5	VALIDAÇÃO COM ESTUDO DE CASO	76
4.5.1	Aplicação da Turbina TE24	76

CONCLUSÃO	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

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.

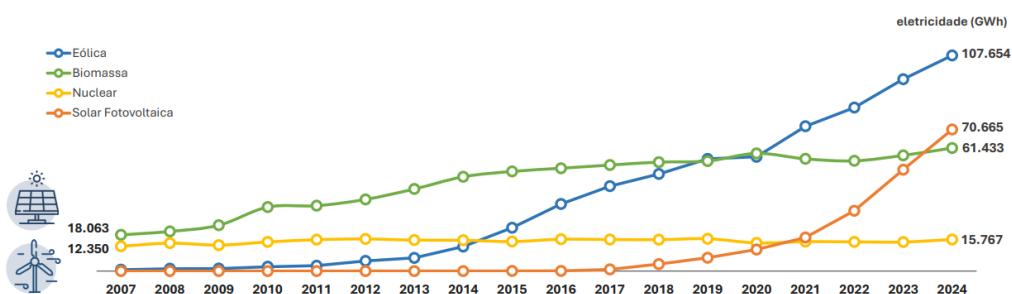


Figura 1.1 – Crescimento das energias renováveis no Brasil nos últimos anos.

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2025)

O Brasil destaca-se mundialmente pela adoção de energias renováveis, possuindo uma

das matrizes energéticas mais limpas do planeta. Segundo Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2025), aproximadamente 88% da eletricidade gerada no país tem origem em fontes renováveis, com predominância da energia hídrica. Nos últimos anos, a energia eólica vem assumindo papel cada vez mais relevante no cenário nacional. Em 2024, essa fonte foi responsável por cerca de 14% da geração elétrica brasileira, e, somada à energia solar fotovoltaica, alcançou 23,7% do total, evidenciando o avanço das energias renováveis no país. Em comparação com outras fontes, como biomassa, nuclear e solar, conforme ilustrado na Figura 1.1, a energia eólica apresentou crescimento expressivo, consolidando-se como a principal fonte renovável após a hidrelétrica nos últimos cinco anos, como demonstrado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Geração de energia elétrica por fonte renováveis no Brasil (2024)

Fonte (GWh)	2024	% do Total
Hidrelétrica	421.799	56,14%
Gás Natural	47.792	6,36%
Eólica	107.654	14,33%
Biomassa	58.027	7,72%
Nuclear	15.767	2,10%
Carvão Vapor	10.247	1,36%
Derivados do Petróleo	5.960	0,79%
Solar Fotovoltaica	70.665	9,41%
Outras	13.425	1,79%
Geração Total	751.335	100%

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2025)

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 necessários 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, a fim de colaborar com estudos no setor e buscar a otimização da qualidade de energia produzida a partir do vento, com o estudo de

técnicas de modos de operação, velocidade e limitação de potência.

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um sistema computacional para estimativa do potencial eólico de uma localidade, integrando dados climáticos obtidos por APIs, modelos de correção de velocidade do vento por altura e características técnicas de aerogeradores, com interface interativa para análise e visualização dos resultados.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Revisar a literatura sobre energia eólica, perfis de vento e métodos de estimativa de potencial eólico.
2. Implementar integração com APIs meteorológicas (Open-Meteo e NASA POWER) para coleta de dados históricos de vento.
3. Aplicar modelos de correção de velocidade do vento por altura (Lei da Potência e Lei Logarítmica).
4. Desenvolver um banco de dados relacional (SQLite) para armazenar localidades, dados climáticos e especificações de turbinas.
5. Criar interface interativa em *Streamlit* para cadastro, consulta e análise de dados.
6. Implementar algoritmos para estimativa de produção de energia com base em curvas de potência de aerogeradores.
7. Validar o sistema por meio de estudo de caso com dados da cidade de Cachoeira do Sul (RS), incluindo ajuste da distribuição de Weibull e projeção de perfis de vento.
8. Gerar relatórios e visualizações gráficas (curvas de potência, perfis de vento, estimativa de AEP) para suporte a estudos preliminares de viabilidade.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A estrutura deste trabalho está organizada em cinco capítulos, cada um com objetivos específicos que contribuem para a compreensão e desenvolvimento do estudo.

O Capítulo 1 apresenta a introdução ao tema, destacando a contextualização, a justificativa para a pesquisa, os objetivos geral e específicos, bem como a organização do trabalho.

O Capítulo 2 reúne o referencial teórico necessário para fundamentar o estudo, abordando conceitos relacionados à energia eólica, características do vento, modelos de estimativa do potencial eólico, distribuição de Weibull, perfis verticais e curvas de potência de aerogeradores. Esses elementos fornecem a base conceitual para a implementação do sistema proposto.

O Capítulo 3 descreve a metodologia adotada para o desenvolvimento do EolicSim, detalhando a arquitetura do sistema, as tecnologias utilizadas — como Python, Streamlit e SQLite —, a integração com APIs meteorológicas e os modelos matemáticos aplicados para correção de velocidade do vento e estimativa de produção de energia.

O Capítulo 4 apresenta o desenvolvimento do sistema e o estudo de caso realizado com dados da cidade de Cachoeira do Sul (RS). Nesse capítulo, são descritas a modelagem do banco de dados, a construção da interface interativa e os fluxos de análise, além da aplicação prática do sistema, incluindo ajuste da distribuição de Weibull, projeção de perfis de vento e estimativa de geração de energia.

Por fim, o Capítulo 5 expõe as conclusões obtidas, destacando as contribuições do trabalho e apresentando sugestões para aprimoramentos futuros, com vistas à evolução da ferramenta e à ampliação de suas funcionalidades..

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A crescente demanda por fontes de energia renovável e a necessidade de mitigar os impactos ambientais têm impulsionado o desenvolvimento e a adoção de tecnologias eólicas no Brasil e no mundo. Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos essenciais para a compreensão do aproveitamento da energia eólica, abordando desde o potencial eólico nacional, os fenômenos atmosféricos que influenciam o vento, até os princípios de funcionamento, componentes e características construtivas das turbinas eólicas modernas. São discutidos ainda os principais modelos matemáticos para análise do perfil de vento, a estimativa da potência gerada, a modelagem de séries temporais e os parâmetros aerodinâmicos que impactam o desempenho dos aerogeradores, com destaque para a turbina TE24 utilizada neste trabalho.

2.1 BRASIL E SEU MAPA EÓLICO

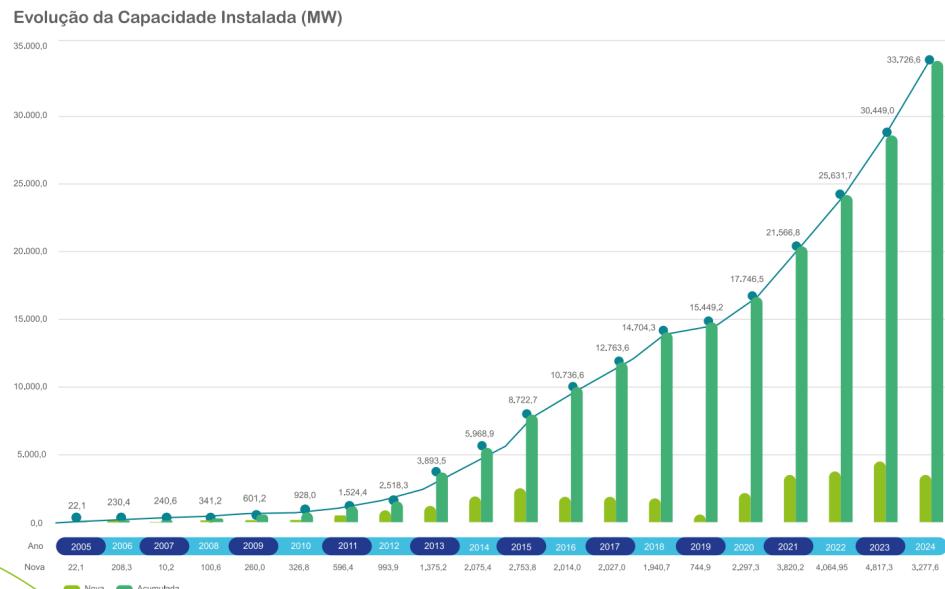
As energias renováveis têm ganhado destaque no cenário energético mundial devido à urgência de mitigar as mudanças climáticas e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. No Brasil, o potencial para a adoção de energias renováveis é vasto, dado seu território extenso e condições climáticas favoráveis. 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 30 GW em 2024, como destacado na Figura 2.1. Este crescimento foi suportado pela combinação de políticas públicas favoráveis, avanços tecnológicos, e a competitividade econômica da energia eólica.

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.

Figura 2.1 – Evolução da Capacidade Instalada de Energia Eólica

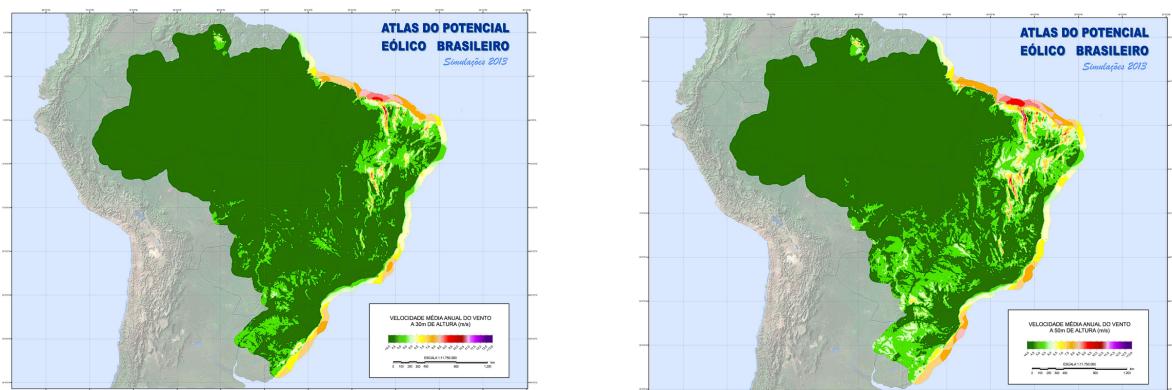


Fonte: Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) (2024)

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 2.2.

Figura 2.2 – 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.

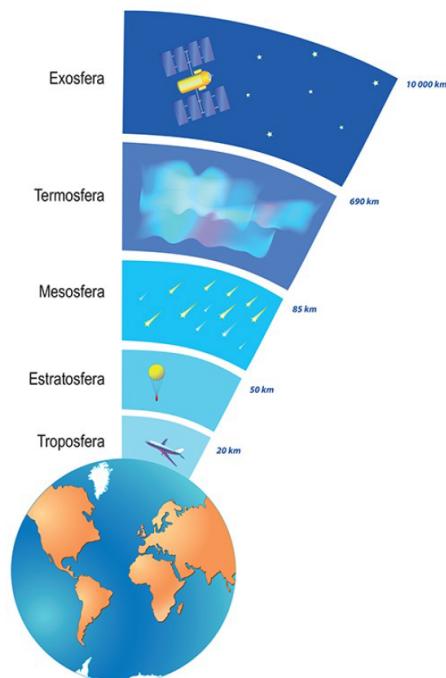
Fonte: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB) (2013)

2.2 ANALISE DOS VENTOS

Entender os principais fenômenos envolvendo o vento requer compreender que o ar, assim como qualquer fluido, está sujeito a influências físicas, como variações térmicas e de pressão. A radiação solar, por exemplo, provoca diferenças de temperatura no ar, criando áreas de alta e baixa pressão. Esse desequilíbrio faz com que o ar se mova das regiões de alta para as de baixa pressão, resultando na formação dos ventos.

A estrutura da atmosfera terrestre é composta por diferentes camadas, sendo a troposfera a mais próxima da superfície e onde ocorrem a maioria dos processos relacionados ao vento. A Figura 2.3 ilustra as principais camadas da atmosfera.

Figura 2.3 – Camadas da Atmosfera



Fonte: Desconhecido (2019)

Além dos efeitos térmicos e da estrutura atmosférica, a topografia do terreno exerce influência significativa sobre o comportamento dos ventos. Montanhas, vales, florestas e corpos d'água podem modificar tanto a direção quanto a velocidade dos ventos, criando padrões complexos que devem ser considerados 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.

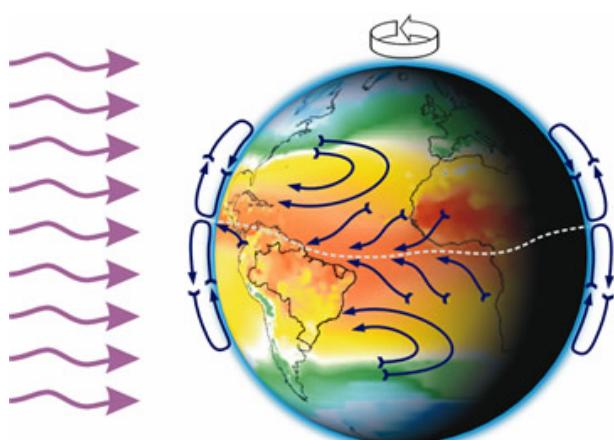
Entretanto, mesmo com a disponibilidade de mapas ou atlas eólicos, é fundamental realizar medições locais específicas para determinar o potencial eólico com precisão. Recomenda-se a instalação de torres anemométricas adaptadas ao terreno e à rugosidade local, preferencialmente posicionadas à altura do 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 2.4.

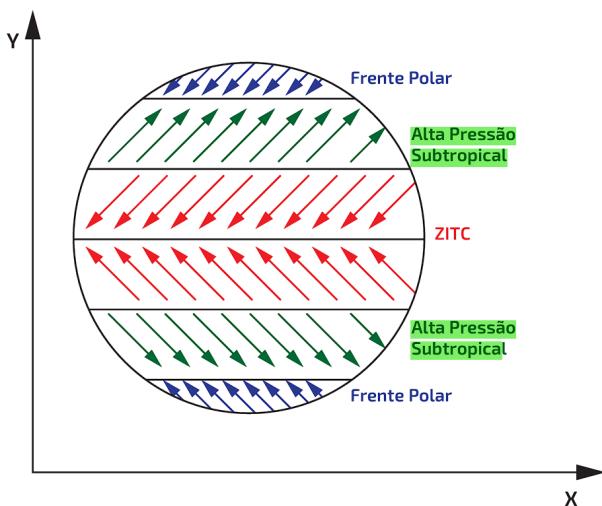
Figura 2.4 – Formação dos ventos devido ao movimento das massas de ar



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 2.5.

Figura 2.5 – 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.

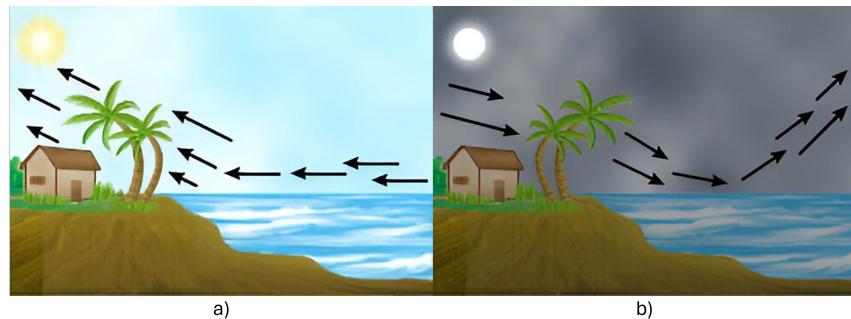
Nas grandes altitudes, o ar se movimenta seguindo linhas de igual pressão, chamadas isolinhas. Esse movimento de massas de ar a mais de 600 metros de altitude é conhecido como ventos geotrópicos. Nessa altura, o fluxo de ar não é influenciado pela superfície terrestre. Em altitudes mais baixas, as diferentes 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 2.6.

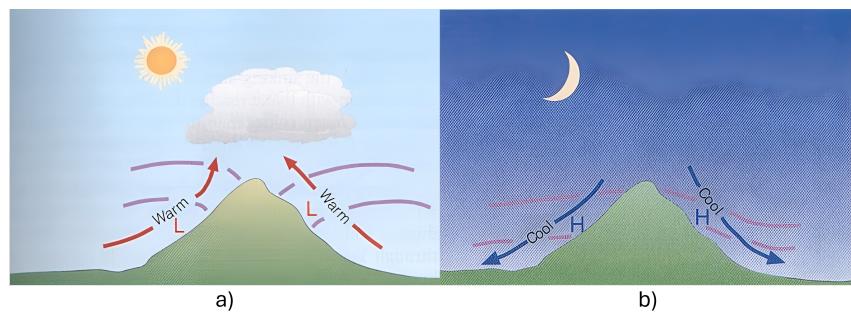
Figura 2.6 – Circulação de ventos em escala local.(a) Brisa Marítima e (b) Brisa Terrestre.



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 2.7.

Figura 2.7 – Circulação de ventos em escala local.(a) Brisa do Vale e (b) Brisa da Montanha.



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

2.2.2 Classificação dos Movimentos Atmosféricicos

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 atmosféricicos.

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 turbulentó 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 2.8(b) demonstra uma variação típica de curta duração.

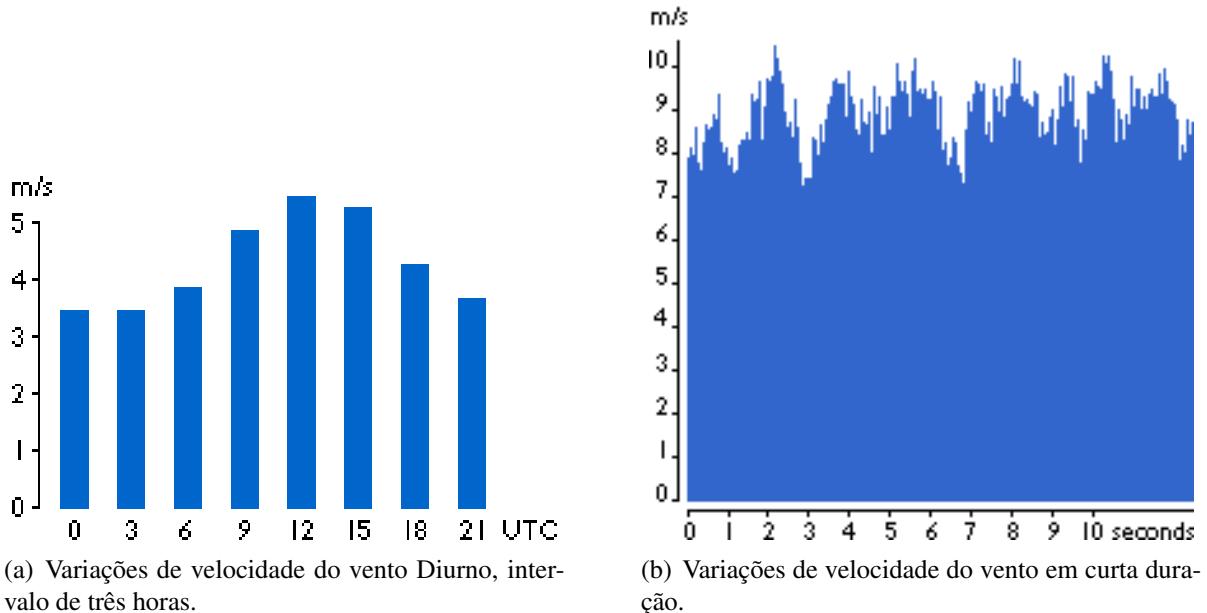
2.2.3 Forças Fundamentais que Regem o Movimento do Vento

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.

Figura 2.8 – Variações de velocidade ao longo do tempo na Dinamarca.



Fonte: Danish Wind Industry Association (2000)

– **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.

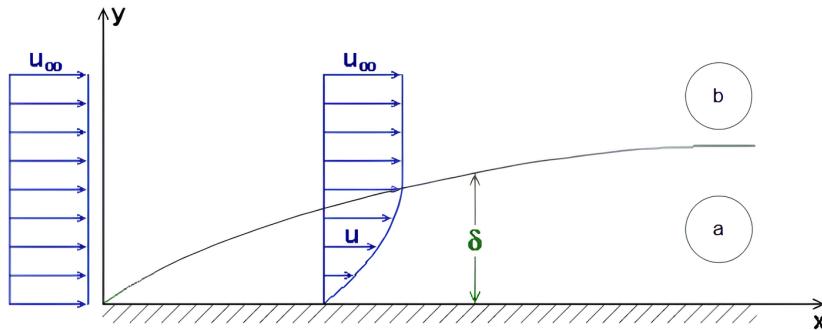
2.3 PERFIL DE VENTO

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 2.9(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).

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

Figura 2.9 – Esquema do perfil de velocidades sobre uma superfície plana.



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

Fonte: Passos (2014)

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

DESCRÍÇÃO DO TERRENO	FATOR n
Superfície lisa, lago ou oceano	0,10
Grama 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.

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 accidentado	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).

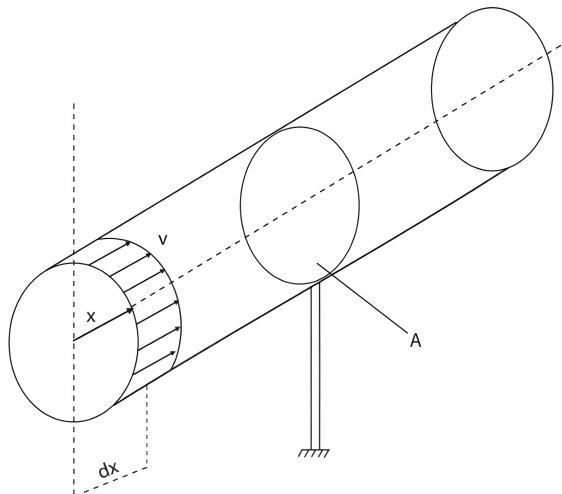
2.4 POTÊNCIA GERADA PELOS VENTOS

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 2.10. Toda a quantidade de ar que se desloca a uma dada velocidade (v) atravessa perpendicularmente o cilindro.

Figura 2.10 – 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

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

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 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$.

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

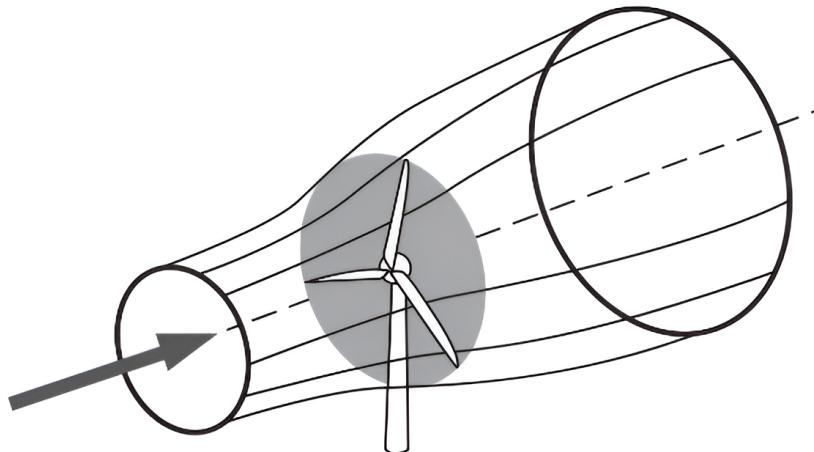
Considerando a análise para aplicação de uma turbina eólica de eixo horizontal, como a ilustrada na Figura 2.11, a área varrida pelas pás pode ser determinada a partir da seguinte equação:

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

em que D é o diâmetro do rotor.

A determinação da área para a turbina de eixo vertical modelo Darrieus, mostrada na figura 2.12, 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):

Figura 2.11 – Área varrida pelas pás de uma turbina de eixo horizontal.



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

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

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 2.13 demonstra como a densidade de potência do vento varia com a velocidade. Por exemplo, na figura 2.13 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/m², ou seja, oito vezes maior. Isso enfatiza a importância de obter dados altamente precisos.

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 2.14.

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).

Figura 2.12 – Modelo de Darrieus.



Fonte: Quora (2024).

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

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

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

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

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

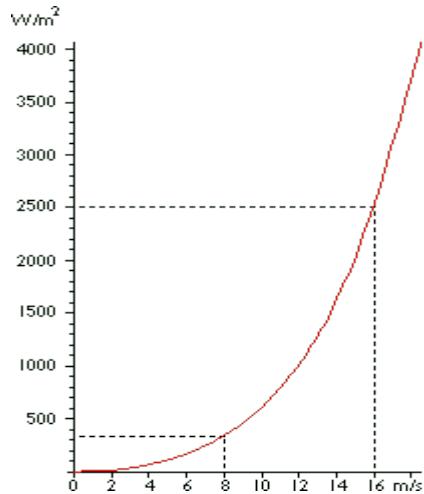
assim, substituindo em (2.16), tem-se

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

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:

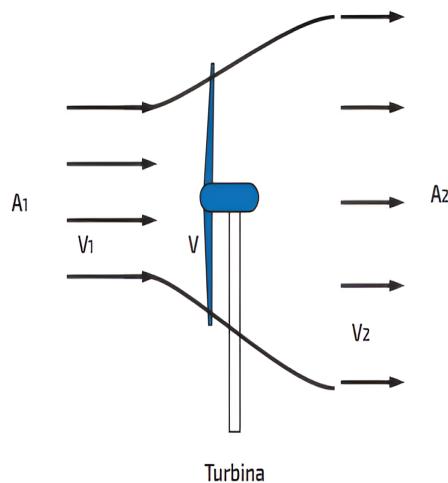
$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho A_1 v_1 (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.20)$$

Figura 2.13 – Curva de potência do vento em função de sua velocidade.



Fonte: Danish Wind Industry Association (2000).

Figura 2.14 – Passagem de ar por uma turbina eólica de eixo horizontal.



Fonte: Rocha et al. (2023).

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 – Parâmetros utilizados para o cálculo do $C_p(\lambda, \beta)$ segundo diferentes autores/modelos

Modelo	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9
Heier (2014)	0.5	116	0.4	0	–	5	21	0.08	0.035
Raiambal (2002)	0.5	116	0.4	0	–	5	16.5	0.089	0.035
Velocidade Const.	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), obtém-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 2.15, 2.16 e 2.17, 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 2.15 – Coeficiente de Potência (C_p) versus Relação de Velocidade na Ponta (λ) para ângulo de passo β , para equações (2.28) e (2.29).

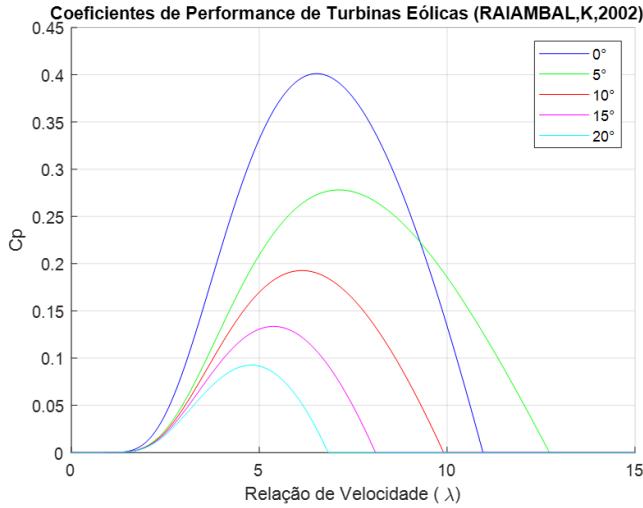
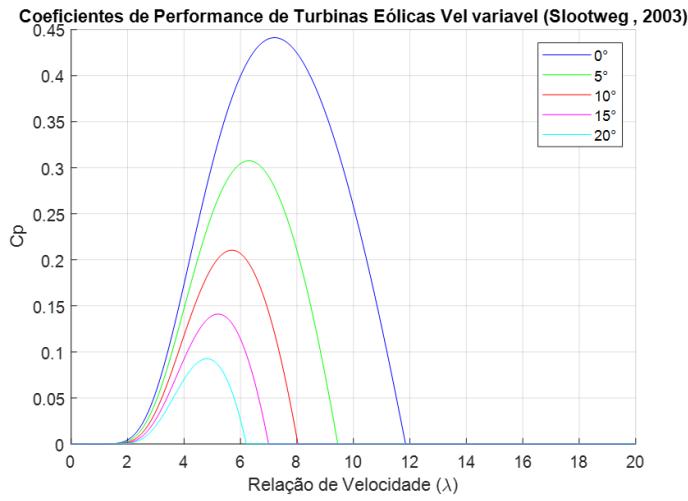


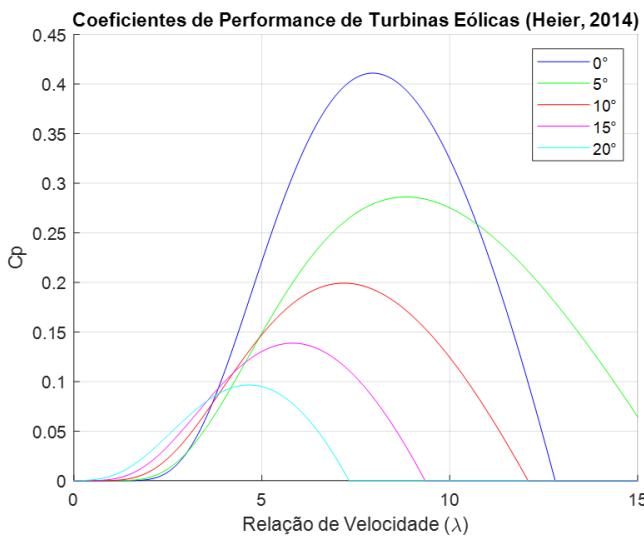
Figura 2.16 – Coeficiente de Potência (C_p) versus Relação de Velocidade na Ponta (λ) para ângulo de passo β , para equações (2.30) e (2.31).



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

Figura 2.17 – Coeficiente de Potência (C_p) versus Relação de Velocidade na Ponta (λ) para ângulo de passo β , para equações (2.26) e (2.27).



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.

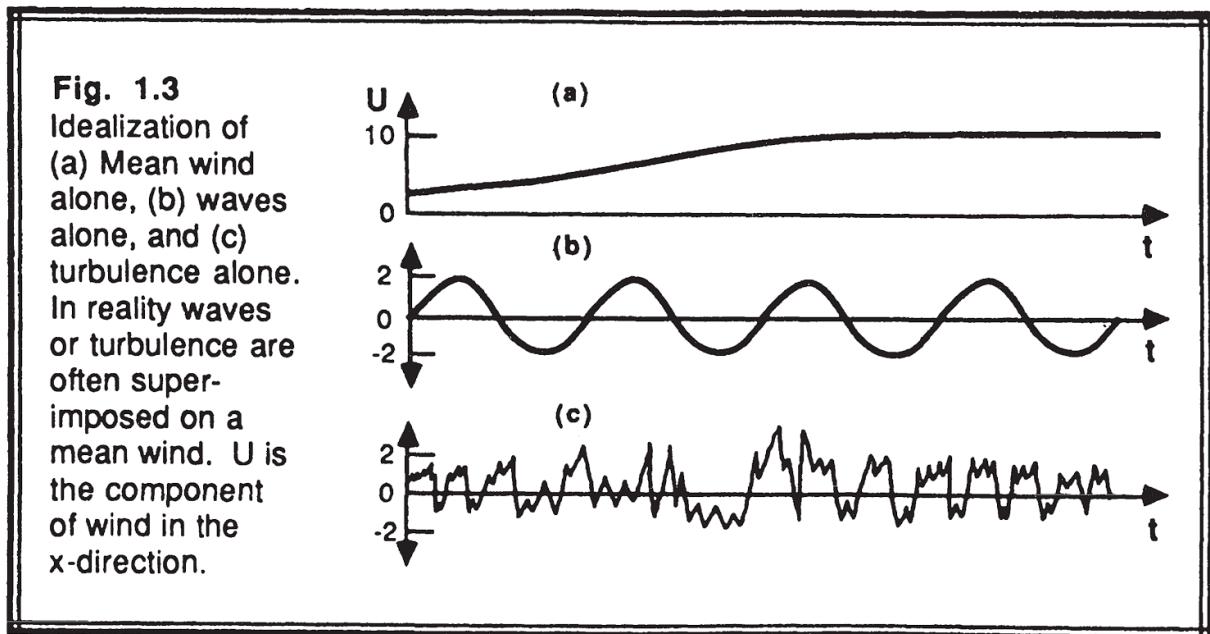
2.6.1 Vento e Fluxo

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 2.18.

- **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

Figura 2.18 – Fluxo de ar decomposto em três categorias. U é o componente velocidade do vento ao longo do tempo t .



Fonte: (STULL, 1988)

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 2.19.

2.6.2 Modelagem de Séries Temporais com o Filtro de Von Karman

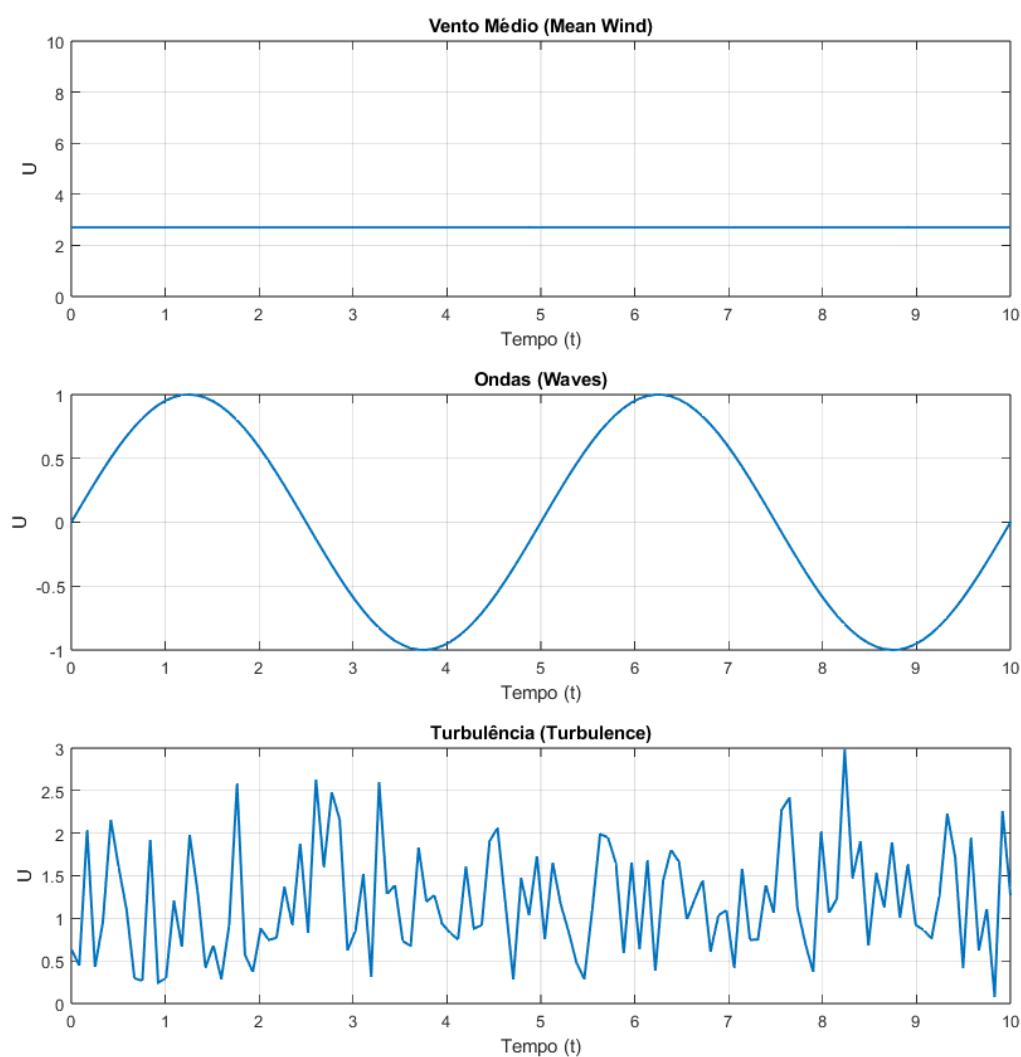
Para modelar adequadamente as séries temporais do vento, é comum utilizar técnicas estatísticas e matemáticas, como o filtro de Von Karman, que ajuda a simular a turbulência do vento. Este filtro é especialmente útil para representar as características caóticas e não lineares do vento, que são críticas 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 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:

Figura 2.19 – Representação do vento em velocidade média, ondulação e turbulência.



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

Em que:

- K_f é o ganho do filtro;
- T_f é a constante de tempo.

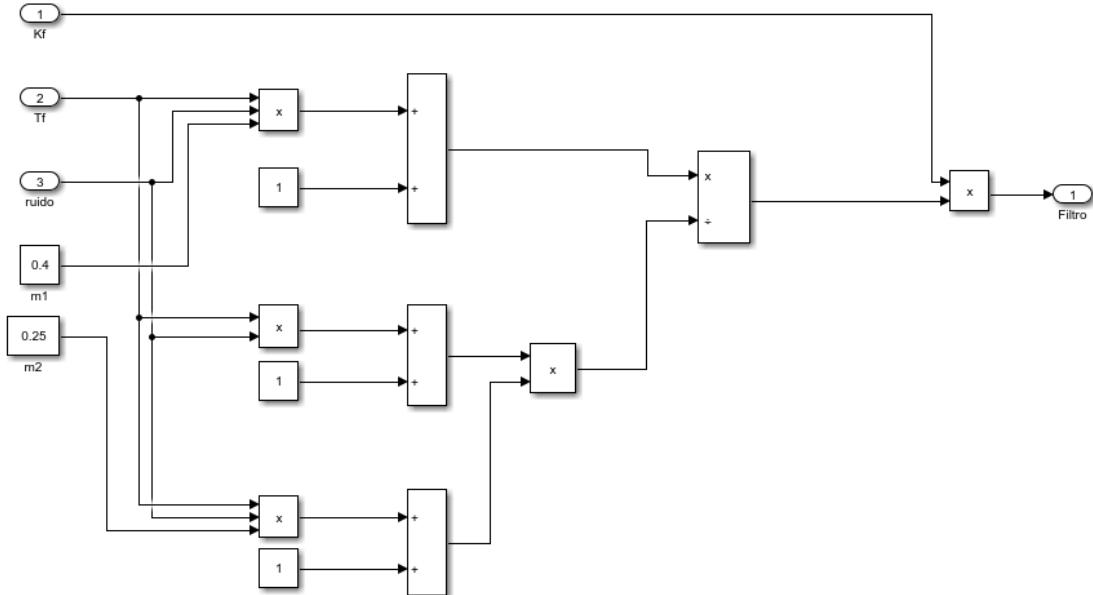
Quando ativado por uma fonte de ruído gaussiano normalizado, a aproximação do filtro de Von Karman por meio de uma função de transferência racional se torna prática. A equação (2.36) e a Figura 2.20 representam esta aproximação.

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

sendo os valores das constantes de Von Karman, dados por

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

Figura 2.20 – Aproximação do Filtro de Von Karman no *software* MATLAB/SIMULINK



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:

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

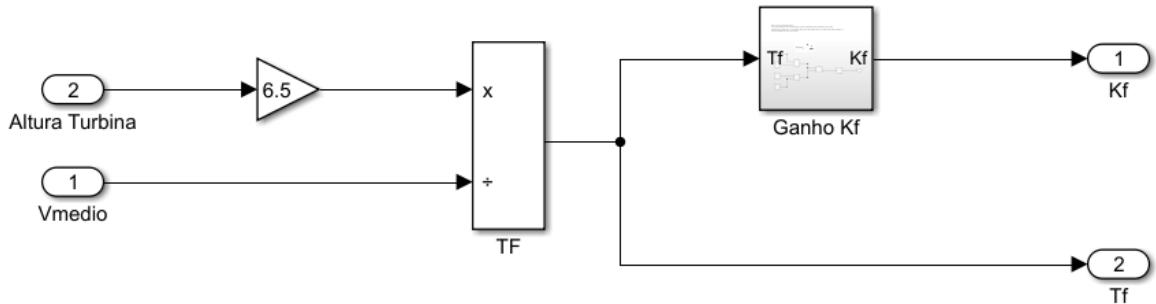
Em que L_{turb} refere-se ao comprimento de turbulência, um fator influenciado pelas características físicas do terreno que não dependem do tipo de turbina utilizada. A determinação precisa de L_{turb} pode ser complexa devido à necessidade de considerar múltiplos fatores ambientais e topográficos.

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 2.21.

Figura 2.21 – Calculo da constante de tempo T_f do Filtro simulado no software MATLAB/SIMULINK



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 2.22. A expressão para calcular K_f é dada por

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

Em que $B(x,y)$ representa a função beta de Euler, componente crucial para a 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 2.23.

Figura 2.22 – Ganho K_f do Filtro de Von Karman simulado no software MATLAB/SIMULINK

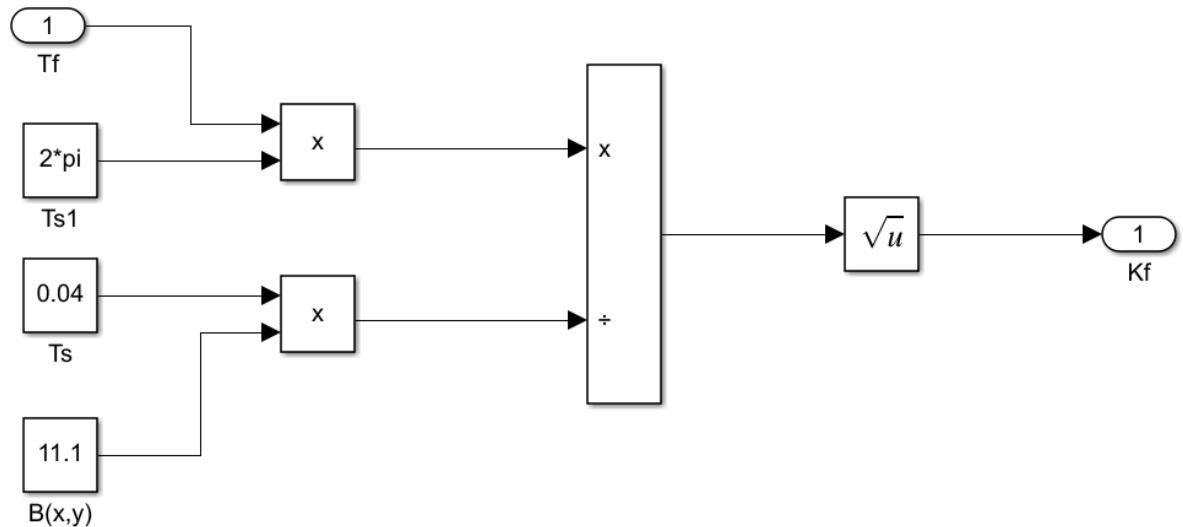
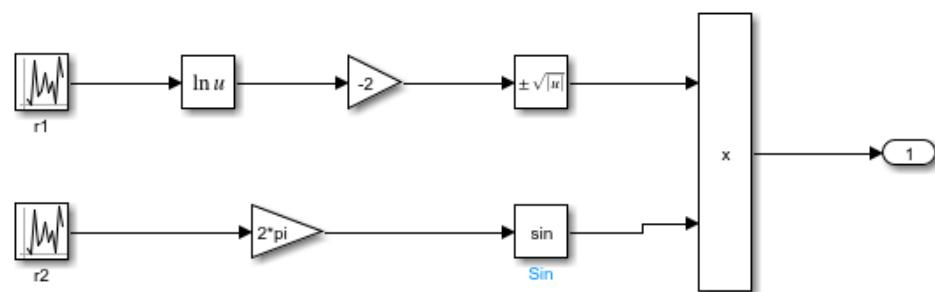


Figura 2.23 – O ruído utilizado para ativar o filtro gerado no software MATLAB/SIMULINK



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.

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

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)

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 2.24 e a serie temporal gerada na Figura 2.25.

Figura 2.24 – Série Temporal de Vento modelado no software MATLAB/SIMULINK

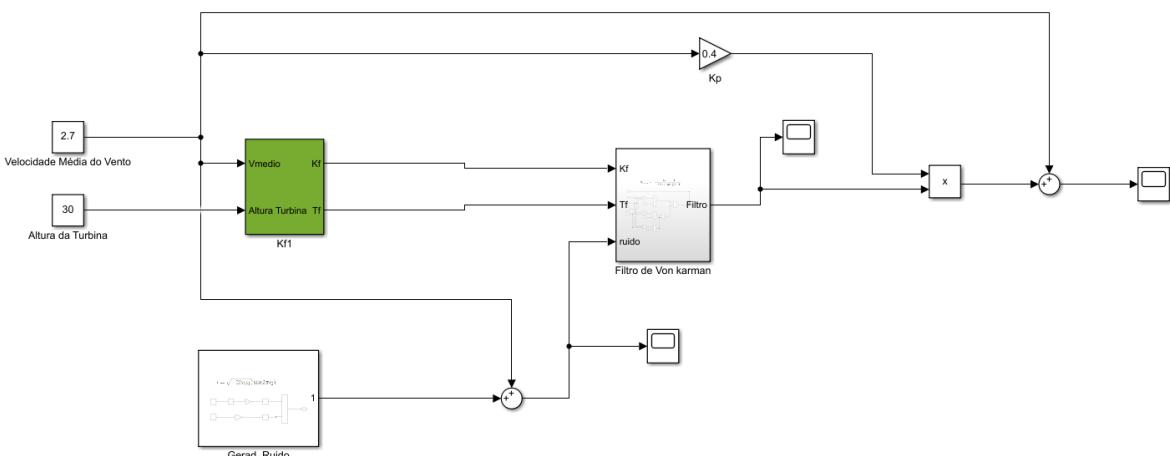
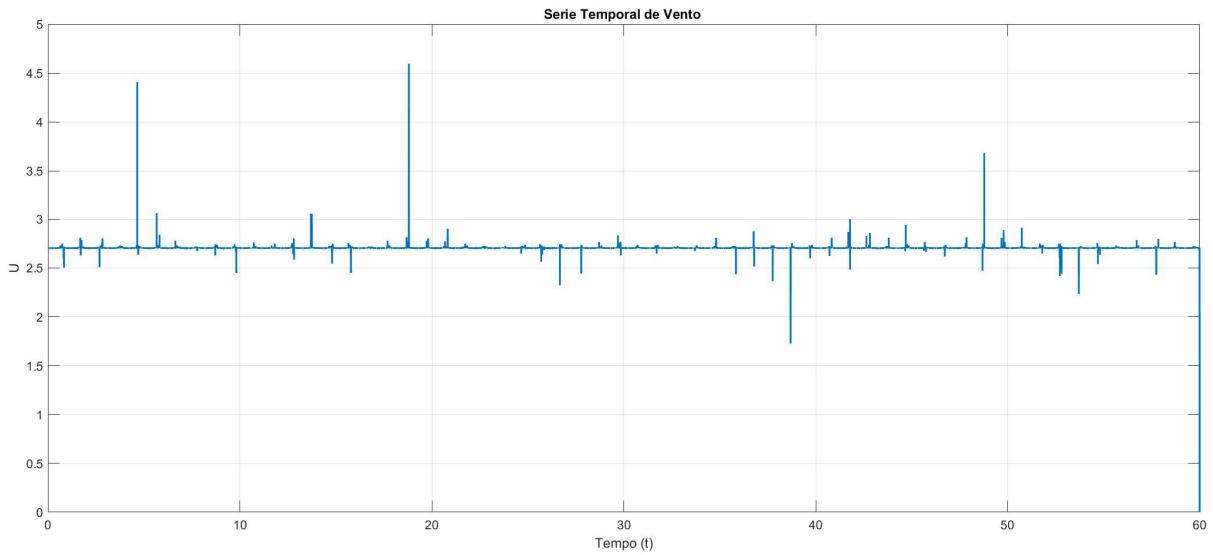


Figura 2.25 – Resultado do modelo da Série Temporal de Vento *software MATLAB/SIMULINK*



2.7 PRINCÍPIOS DE FUNDAMENTO DAS TURBINAS EÓLICAS

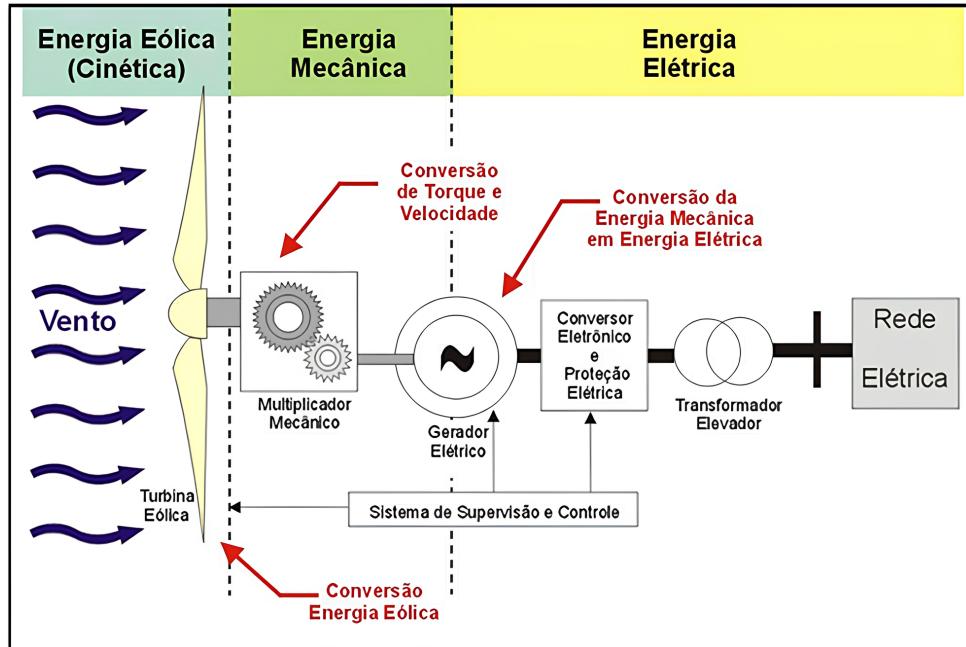
As turbinas eólicas, comumente conhecidas como aerogeradores, são dispositivos projetados para otimizar a captação da energia cinética do vento, transformando-a em energia elétrica utilizável. O processo de conversão inicia-se quando o vento interage com as pás do rotor, que giram devido à força do vento. 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 2.26, 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.

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 2.27. Apesar de sua popularidade, algumas características dessas turbinas, como o controle do ângulo de passo, ainda são alvo de discussões técnicas e ajustes para aprimorar 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.

Figura 2.26 – Esquema abrangente de operação de um aero gerador.



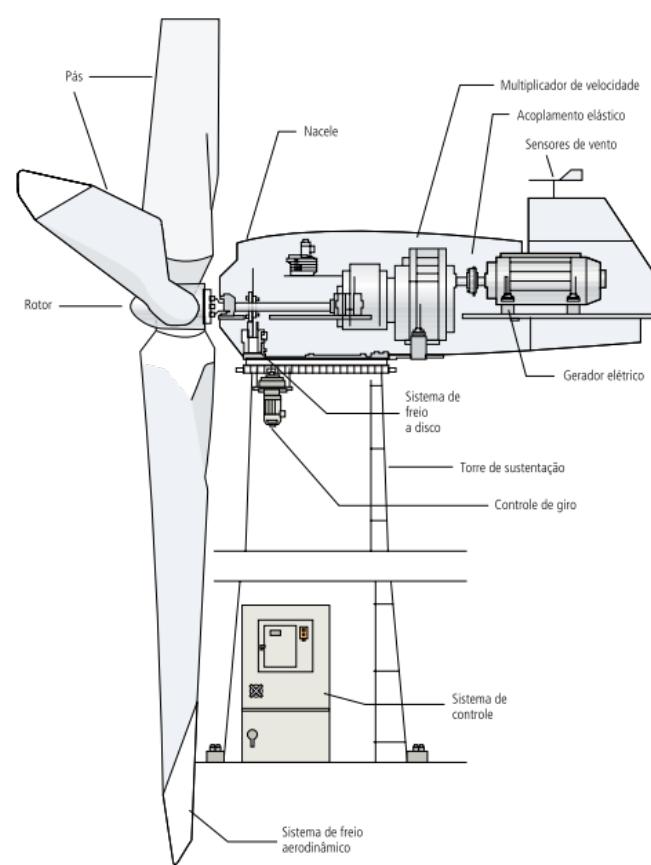
Fonte: Pavinatto (2005)

2.8 COMPONENTES DE AEROGERADOR DE EIXO HORIZONTAL

Os aero geradores 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 aero gerador de eixo horizontal é composta por diversos componentes essenciais que trabalham em conjunto para converter a energia cinética do vento em energia elétrica.

- 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.

Figura 2.27 – Esquema de Turbina Eólica Moderna.



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

- 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 nacelle, alinhando-a em direção do vento e maximizando a captação.
- IX Torre de sustentação: Estrutura vertical responsável por suportar a nacelle 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 CONTROLE DE ÂNGULO DE PASSO

O controle de ângulo de passo (*pitch control*) é o sistema responsável por ajustar continuamente o ângulo das pás em relação ao plano de rotação (ou ao vento aparente) para regular o torque aerodinâmico e, consequentemente, a potência extraída do vento. Em velocidades inferiores ou próximas à velocidade nominal, o objetivo é posicionar as pás em ângulo que maximize o coeficiente de potência C_p , mantendo a razão de velocidade na ponta (λ) próxima do valor ótimo. Em ventos acima da velocidade nominal, o sistema reduz gradualmente o ângulo de ataque (*feathering*) para limitar a potência e aliviar cargas estruturais, garantindo operação segura e dentro das especificações do gerador e conversores. Diferentemente de conceitos baseados em estol (*stall*), o *pitch* permite atuação ativa e modulada sobre a aerodinâmica do rotor, resultando em melhor controle dinâmico e maior fator de capacidade (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009; BIANCHI; BATTISTA; MANTZ, 2007).

A arquitetura típica compreende: mancais de passo (*pitch bearings*), atuadores eletromecânicos ou hidráulicos, anéis coletores (*slip rings*), sensores de posição absoluta/incremental

e uma unidade de controle dedicada (às vezes distribuída em cada pá). O laço externo (supervisório) calcula o ângulo de referência β_{ref} a partir de potência medida, velocidade do rotor e, eventualmente, estimativa de λ ; o laço interno aplica um controlador (geralmente PID com limites de taxa) para rastrear β_{ref} respeitando restrições de segurança (ângulos mínimos/máximos, velocidade máxima de variação e lógica de falha). Tabelas (*look-up*) $C_p(\lambda, \beta)$ ou leis empíricas são usadas para *feedforward*; filtros atenuam excitações de turbulência de alta frequência. Em projetos avançados emprega-se *Pitch Coletivo* (CPC) para regulação global e *Pitch Individual* (IPC) para mitigação de cargas assimétricas (1P/3P) e redução de fadiga (BOSSANYI, 2003; BIANCHI; BATTISTA; MANTZ, 2007).

As principais funções de controle de passo incluem: (i) maximização de energia abaixo da velocidade nominal; (ii) limitação de potência e torque acima da nominal; (iii) redução de esforços em eventos de rajada; (iv) suporte a estratégias de arranque, parada rápida e frenagem de emergência (passagem a ângulo de feather quase nulo de sustentação); (v) contribuição a requisitos de código de rede (rampas de potência, suporte inercial em combinação com controle de velocidade e conversores) (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009; BIANCHI; BATTISTA; MANTZ, 2007). A falha segura (fail-safe) normalmente posiciona as pás em feather por ação de molas ou acumulação hidráulica em perda de energia.

No contexto do aerogerador TE24, o controle ativo de passo possibilita operar com ampla faixa de velocidades de vento, aumentar o rendimento médio e reduzir cargas cíclicas no trem de força, prolongando a vida útil de componentes mecânicos e elétricos (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009; BIANCHI; BATTISTA; MANTZ, 2007). Sua correta modelagem é essencial para simulações integradas (vento–rotor–gerador–rede), calibração das curvas $C_p(\lambda, \beta)$ e avaliação de estratégias de maximização de potência e mitigação de fadiga.

2.10 CONTROLADOR YAW

O controle de *yaw* é o subsistema responsável por alinhar o eixo do rotor (azimute da nacelle) com a direção média efetiva do vento, maximizando a captura de energia e minimizando cargas assimétricas no trem de força e nas pás. Em aerogeradores de pequeno porte pode existir *yaw* passivo (cauda ou deslocamento do centro de pressão), porém em máquinas modernas utiliza-se *yaw* ativo: um rolamento de giro (*yaw bearing*), múltiplos motores/caixas redutoras (*yaw drives*) e um sistema de travagem (freio de *yaw*) comandados por uma lógica de controle que filtra a direção do vento (biruta/anemômetro sônico) e aplica um *deadband* típico ($\approx 2^\circ\text{--}5^\circ$) para evitar comutações excessivas sob turbulência (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009; BURTON et al., 2021).

A arquitetura de controle implementa: (i) estimação da direção de vento livre (filtragem de alta frequência e rejeição de *outliers*); (ii) cálculo do erro de azimute (diferença entre vento e ângulo da nacelle); (iii) decisão de atuação (superação de limiar de *deadband* e, opcionalmente,

histerese temporal); (iv) aplicação de uma lei PI ou proporcional com limitação de velocidade e torque equilibrado entre atuadores; (v) travagem quando o erro retorna à faixa neutra. Estratégias de balanceamento de torque e sequenciamento de acionamento reduzem desgaste irregular de dentes e anéis, enquanto a monitoração de corrente dos motores auxilia na detecção precoce de aumento de atrito ou falhas mecânicas (BIANCHI; BATTISTA; MANTZ, 2007).

Abordagens avançadas incorporam: (a) tolerância ou até imposição deliberada de desalinhamento (*intentional yaw misalignment*) para defletir a esteira e aumentar a produção agregada em planta (*wake steering*); (b) coordenação com *pitch* individual para mitigação de cargas 1P/3P quando há erro transitório de *yaw*; (c) controle preditivo usando previsão de rajadas e direção futura de *veer*; (d) otimização multiobjetivo (energia vs fadiga). Estudos de campo mostram ganhos de energia em nível de parque ao aplicar *offsets* controlados de vários graus na máquina a montante, reduzindo déficits de velocidade nas turbinas a jusante (FLEMING et al., 2019).

A degradação do desempenho do *yaw* (ex.: aumento sistemático do erro médio) resulta em perda direta de potência — aproximadamente 1–2% por 10° de desalinhamento para rotores de três pás em regime abaixo do nominal — e elevação de carregamentos assimétricos que intensificam fadiga em pás, mancais e multiplicador. Rotinas de diagnóstico via SCADA calculam estatísticas de erro direcional, taxa de ciclos de *yaw* e tempo em saturação para acionar manutenção preditiva. Assim, um modelo fiel do controle de *yaw* é essencial nas simulações integradas deste projeto (vento–rotor–pitch–yaw–geração) para avaliar impactos de turbulência, estratégias de esteira e confiabilidade estrutural (BOSSANYI, 2003; BURTON et al., 2021).

2.11 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 ($\frac{kWh}{mês}$)	Geração estimada com dados reais ($\frac{kWh}{mês}$)	%
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 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	9,0 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.

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. Além disso, 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.

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 aterrramento da torre	Sim
Sistema de freio de emergência	Sim

Considerando todos esses aspectos, a turbina eólica TE24 será utilizada como referência para as simulações, análises e validações desenvolvidas nos próximos capítulos deste trabalho. Dessa forma, estabelece-se uma conexão direta entre a fundamentação teórica apresentada e a aplicação prática do estudo.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho fundamenta-se no desenvolvimento de um sistema computacional denominado *EolicSim*, voltado à estimativa do potencial eólico com base em dados climáticos e características técnicas de aerogeradores. A abordagem é caracterizada como pesquisa aplicada, com ênfase em integração de dados, modelagem matemática e implementação de uma interface interativa para análise e visualização dos resultados.

Inicialmente, realizou-se uma pesquisa bibliográfica para consolidar os conceitos fundamentais relacionados à energia eólica, perfis de vento, modelos de extração vertical e métodos de estimativa de produção de energia. Essa etapa forneceu a base teórica necessária para a definição dos algoritmos e parâmetros empregados no sistema.

O desenvolvimento do *EolicSim* foi estruturado em quatro domínios funcionais: Localidades, Dados Climáticos, Turbinas e Análise. O domínio Localidades permite o cadastro hierárquico de países, estados e cidades, incluindo coordenadas geográficas e altitude. O domínio Dados Climáticos é responsável pela integração com APIs meteorológicas, armazenamento e pré-processamento das séries históricas de velocidade do vento. O domínio Turbinas contempla o registro de aerogeradores, incluindo parâmetros técnicos como diâmetro do rotor, altura do cubo, velocidades de *cut-in* e *cut-out*, potência nominal e curva de potência. Por fim, o domínio Análise realiza a extração vertical da velocidade do vento, o ajuste estatístico da distribuição de Weibull, o mapeamento para curvas de potência e a estimativa da produção anual de energia (*Annual Energy Production* – AEP).

A implementação do sistema foi realizada em Python 3.12, utilizando o framework *Streamlit* para a construção da interface interativa e o banco de dados relacional SQLite para persistência das informações. Foram empregadas bibliotecas científicas como *NumPy* e *Pandas* para cálculos numéricos e manipulação de séries temporais, além da biblioteca *Plotly* para visualização gráfica. A escolha dessas tecnologias visou garantir portabilidade, simplicidade de implantação e integração eficiente entre os módulos do sistema.

A coleta de dados meteorológicos foi realizada por meio das APIs Open-Meteo e NASA POWER, que fornecem séries históricas de velocidade do vento em diferentes alturas. O processo de integração incluiu a requisição parametrizada por coordenadas geográficas e período de análise, seguida de validação, normalização temporal e armazenamento no banco de dados. Quando necessário, foram aplicados procedimentos de tratamento de dados, como remoção de duplicidades e exclusão de registros inconsistentes.

Para estimar a velocidade do vento na altura do cubo da turbina, foram aplicados dois modelos consagrados: a Lei da Potência e a Lei Logarítmica. A Lei da Potência é expressa por $V(H) = V(H_r) \left(\frac{H}{H_r}\right)^n$, em que $V(H)$ é a velocidade na altura desejada, $V(H_r)$ a velocidade na altura de referência e n o expoente associado à rugosidade do terreno. A Lei Logarítmica, por sua vez, considera o comprimento de rugosidade z_0 e é dada por $\frac{V(z)}{V(z_r)} = \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_r/z_0)}$. A aplicação

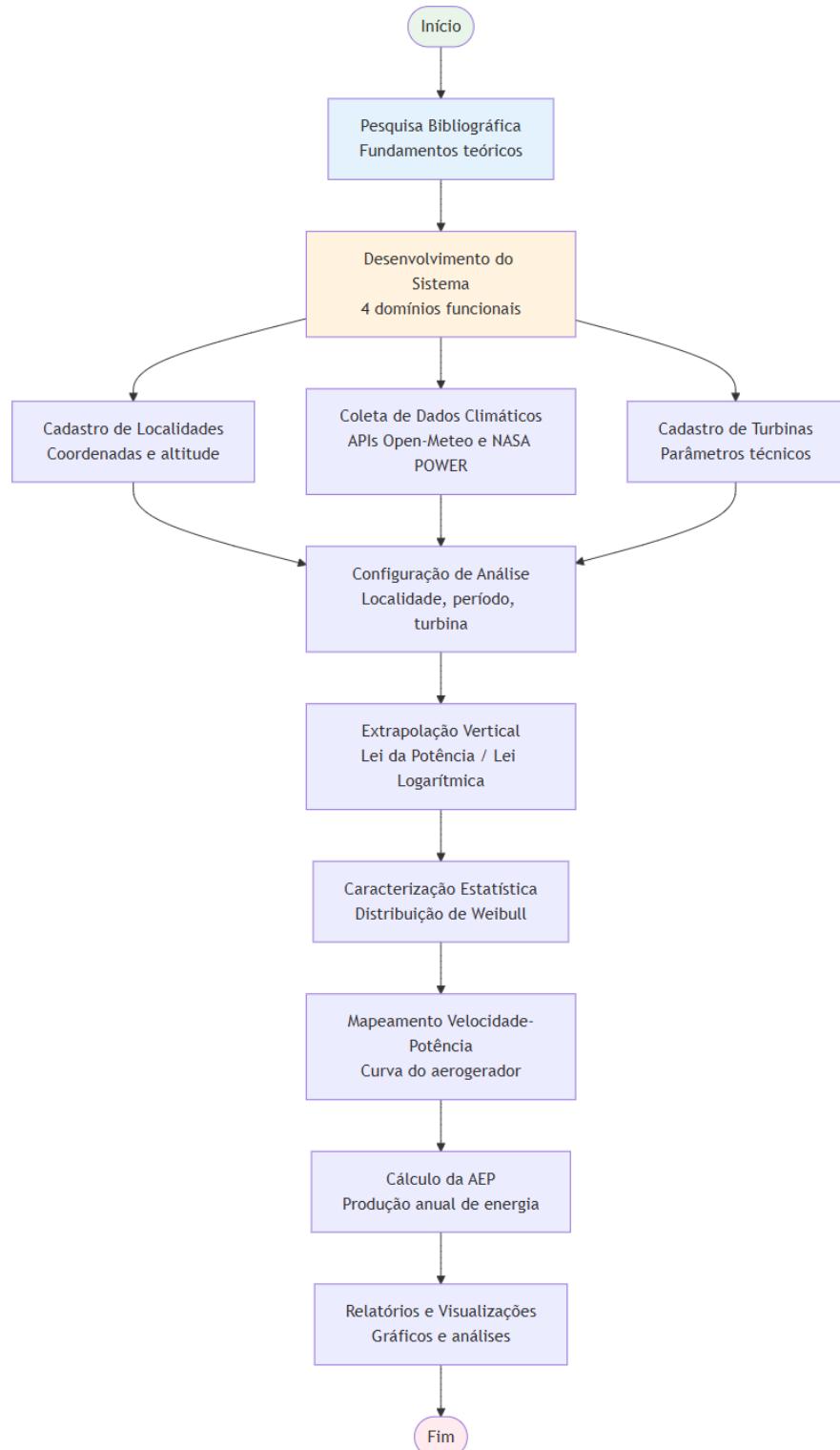
desses modelos permitiu projetar perfis verticais de vento para alturas típicas de instalação de aerogeradores.

Quando aplicável, realizou-se o ajuste da distribuição de Weibull aos dados de velocidade do vento, utilizando métodos estatísticos para estimar os parâmetros de forma (k) e escala (c). Esse ajuste possibilitou a caracterização probabilística do regime de ventos e a integração com as curvas de potência das turbinas para estimativa da produção de energia. A energia anual produzida foi calculada por duas abordagens: integração direta sobre séries temporais e integração da curva de potência ponderada pela função densidade de probabilidade da Weibull.

O fluxo analítico do sistema compreendeu as seguintes etapas: configuração inicial com seleção de localidade, período e turbina; coleta e pré-processamento dos dados meteorológicos; extração vertical da velocidade do vento; caracterização estatística e ajuste de Weibull; mapeamento da velocidade para potência com base na curva do aerogerador; cálculo da AEP; e, por fim, geração de gráficos e relatórios técnicos.

A validação da metodologia foi conduzida por meio de um estudo de caso utilizando dados da cidade de Cachoeira do Sul (RS). Foram analisadas a consistência entre as fontes de dados meteorológicos, a coerência física dos perfis verticais estimados e a plausibilidade das estimativas de produção de energia. Essa etapa permitiu verificar a aplicabilidade do sistema para estudos preliminares de viabilidade eólica.

Figura 3.1 – Fluxograma de desenvolvimento do projeto.



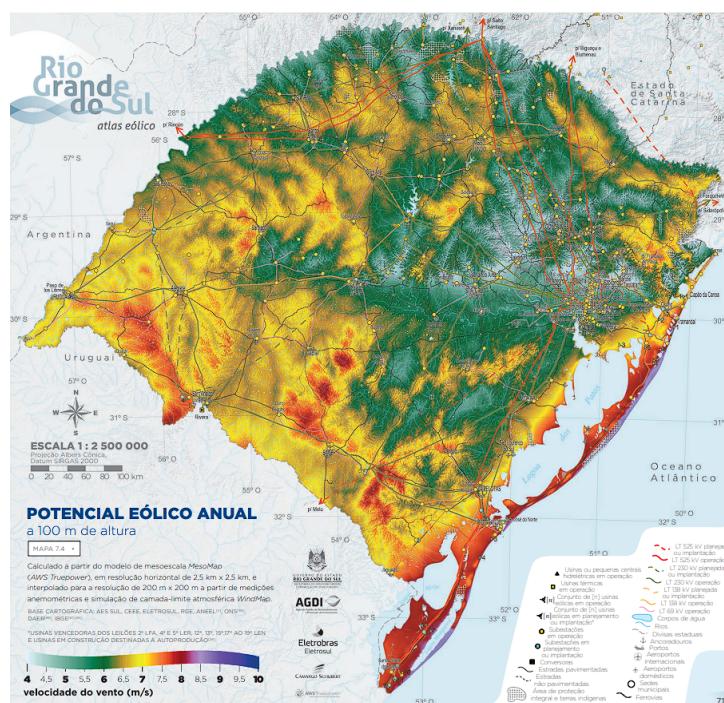
4 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo apresenta as etapas de desenvolvimento do sistema *EolicSim* e a análise do cenário utilizado como estudo de caso. Inicialmente, descreve-se a caracterização do local escolhido para validação do sistema, incluindo a coleta e o tratamento dos dados meteorológicos. Em seguida, detalha-se a concepção, a arquitetura e a implementação do sistema computacional, abordando as tecnologias empregadas, a modelagem do banco de dados e a organização modular em domínios funcionais. Por fim, são discutidos os fluxos de integração, as funcionalidades implementadas e a aplicação prática do sistema, evidenciando como cada componente contribui para a estimativa do potencial eólico e para o atendimento aos objetivos propostos.

4.1 ANÁLISE DO CENÁRIO BASE

A validação do sistema proposto foi realizada utilizando dados da cidade de Cachoeira do Sul, localizada no estado do Rio Grande do Sul. A escolha desta localidade justifica-se por apresentar características representativas do regime de ventos da região Sul do Brasil, além da disponibilidade de dados experimentais obtidos no campus da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), o que possibilita uma análise fundamentada e próxima da realidade.

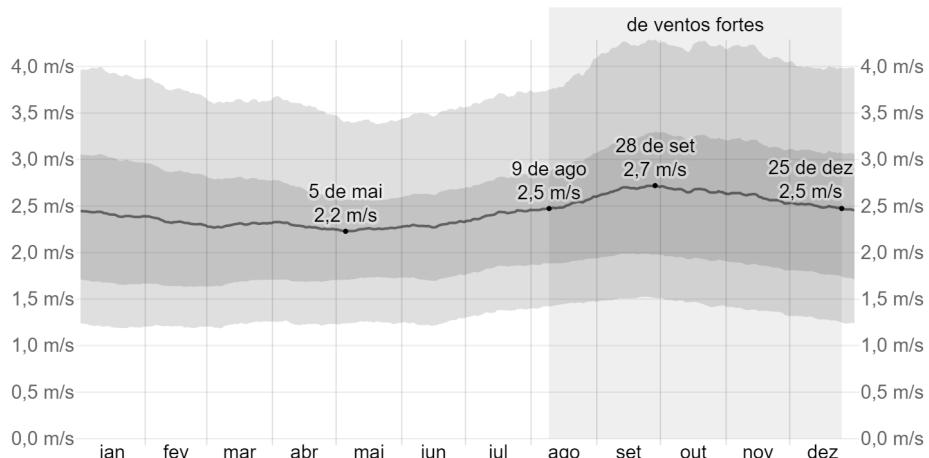
Figura 4.1 – Atlas Eólico para o Rio Grande do Sul à altura de 100 metros.



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

A Figura 4.1 apresenta o Atlas Eólico do Rio Grande do Sul à altura de 100 metros, evidenciando que a região onde se encontra Cachoeira do Sul possui potencial eólico moderado, com velocidades médias anuais adequadas para estudos preliminares de viabilidade.

Figura 4.2 – Velocidade média do vento em Cachoeira do Sul.



Fonte: WeatherSpark (2024).

Os dados utilizados referem-se a medições horárias de velocidade do vento realizadas por um anemômetro instalado no campus da UFSM, a aproximadamente três metros de altura. Embora essa altura seja inferior à altura típica do cubo de aerogeradores comerciais, os dados fornecem uma base para caracterização preliminar do regime de ventos local. A Figura 4.2 e 4.3 ilustra a variação da velocidade média do vento ao longo do ano, enquanto a Figura 4.4 mostra o equipamento utilizado para a coleta das medições.

Figura 4.3 – Gráfico dos dados do anemômetro instalado na UFSM Campus Cachoeira do Sul.

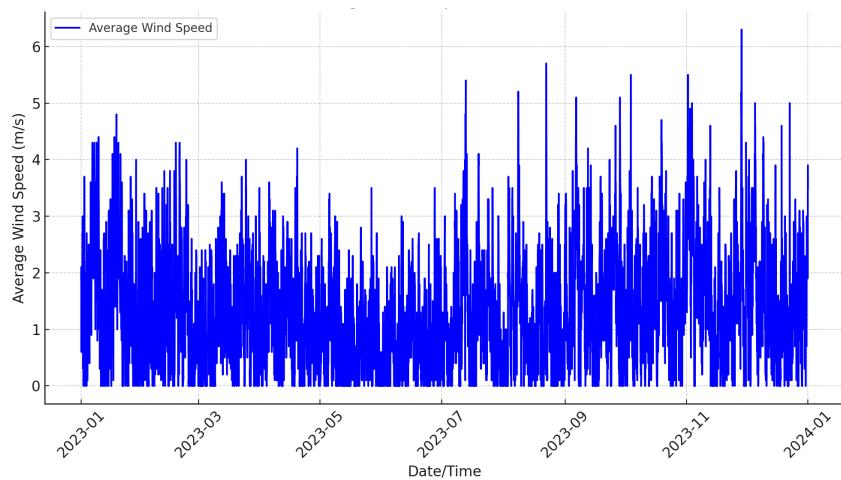
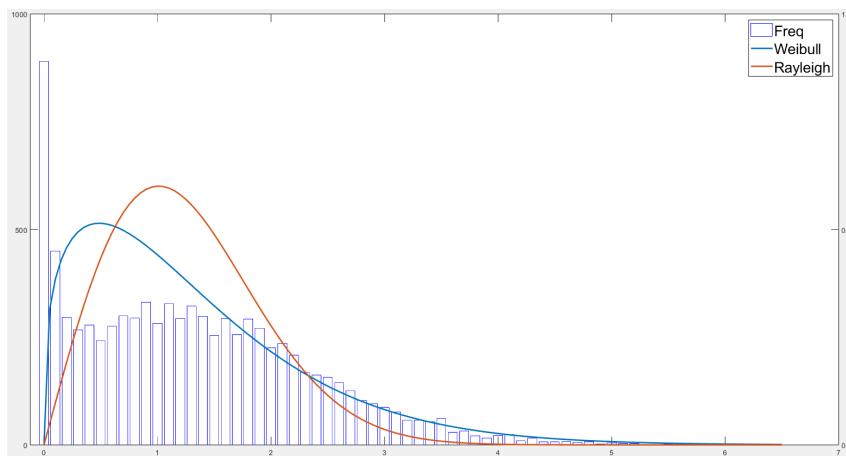


Figura 4.4 – Fotografia do anemômetro instalado na UFSM Campus Cachoeira do Sul.



Figura 4.5 – Distribuição de Weibull ajustada aos dados do anemômetro instalado na UFSM Campus Cachoeira do Sul.



Com base nos dados coletados, foi ajustada a distribuição de Weibull, amplamente utilizada para representar a variabilidade da velocidade do vento. A Figura 4.5 apresenta a curva ajustada aos dados experimentais, permitindo estimar os parâmetros de forma (k) e escala (c), que descrevem a frequência relativa das velocidades observadas. Essa caracterização é essencial para a estimativa da produção de energia, uma vez que a distribuição de Weibull influencia diretamente o cálculo da energia anual produzida (AEP).

Além disso, foram aplicados dois modelos consagrados para projeção da velocidade do vento em diferentes alturas: a Lei da Potência e a Lei Logarítmica. A Figura 4.6 apresenta os perfis verticais obtidos por ambos os modelos, enquanto a Tabela 4.1 compara numericamente as velocidades estimadas para alturas entre 10 e 100 metros. A análise comparativa indicou diferenças pouco significativas, com variações inferiores a 0,3 m/s, reforçando a aplicabilidade de ambos os modelos para estudos preliminares.

Figura 4.6 – Perfis de velocidade do vento em função da altura, obtidos pela Lei da Potência e pela Lei Logarítmica.

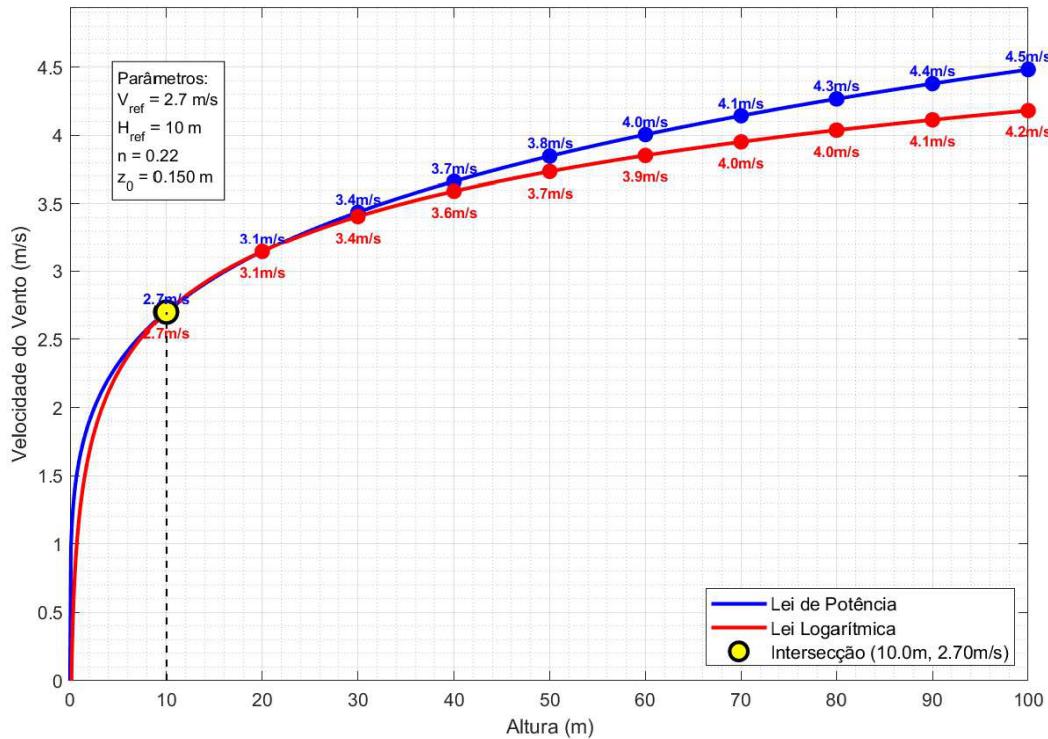


Tabela 4.1 – Comparação das velocidades do vento estimadas pela Lei da Potência e Lei Logarítmica em diferentes alturas.

Altura (m)	Lei Potência (m/s)	Lei Logarítmica (m/s)	Diferença (m/s)
10	2.70	2.70	0.000
20	3.14	3.15	0.001
30	3.44	3.41	0.032
40	3.66	3.59	0.072
50	3.85	3.73	0.112
60	4.00	3.85	0.153
70	4.14	3.95	0.192
80	4.27	4.04	0.229
90	4.38	4.11	0.266
100	4.48	4.18	0.301

Fonte: O autor.

Os resultados obtidos evidenciam que, apesar das limitações impostas pela altura de medição, a região apresenta potencial eólico relevante, especialmente quando consideradas torres de maior altura. Essa análise preliminar fundamenta a escolha do cenário para validação do sistema, permitindo avaliar a coerência das estimativas geradas pelo *EolicSim* em condições reais.

4.2 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA EOLICSIM

O desenvolvimento do sistema EolicSim representa a etapa de implementação prática da metodologia proposta, consolidando os requisitos levantados e os objetivos definidos para este trabalho. O sistema foi concebido com a finalidade de integrar dados geográficos, séries históricas de velocidade do vento e características técnicas de aerogeradores em um ambiente interativo, possibilitando a estimativa do potencial eólico por meio de modelos consagrados e análises estatísticas.

A concepção do EolicSim baseou-se em três princípios fundamentais: modularidade, garantindo a separação lógica das funcionalidades em domínios independentes; rastreabilidade, assegurando que cada etapa do processo, desde a coleta de dados até a estimativa de produção, seja documentada e reproduzível; e interatividade, oferecendo ao usuário uma interface intuitiva para configuração de cenários, visualização de resultados e geração de relatórios.

Para atender a esses princípios, o sistema foi estruturado em quatro domínios funcionais interconectados: Localidades, Dados Climáticos, Turbinas e Análise e Simulação. Essa organização permite que informações geográficas, meteorológicas e técnicas sejam processadas de forma integrada, resultando em estimativas consistentes do potencial de geração eólica. As subseções seguintes apresentam a concepção da arquitetura, as tecnologias utilizadas, a modelagem do banco de dados, o fluxo analítico e as principais funcionalidades da interface.

4.2.1 Concepção e Arquitetura

A concepção do EolicSim foi orientada pela necessidade de integrar diferentes fontes de informação em um fluxo analítico coerente, capaz de transformar dados geográficos, meteorológicos e técnicos em estimativas do potencial de geração eólica. Para isso, adotou-se uma arquitetura modular, organizada em quatro domínios funcionais interdependentes: Localidades, Dados Climáticos, Turbinas e Análise e Simulação. Essa estrutura permite que cada domínio desempenhe um papel específico, garantindo clareza no processamento e rastreabilidade das etapas.

O domínio *Localidades* é responsável pelo cadastro hierárquico de países, estados e cidades, incluindo coordenadas geográficas e atributos auxiliares. O domínio *Dados Climáticos* gerencia a integração com fontes meteorológicas e o armazenamento das séries históricas de velocidade do vento. O domínio *Turbinas* concentra as especificações técnicas dos aerogeradores, como curva de potência, velocidades de *cut-in* e *cut-out*, diâmetro do rotor e altura do cubo. Por fim, o domínio *Análise e Simulação* realiza a extração vertical da velocidade do vento, o ajuste estatístico da distribuição de Weibull e a estimativa da produção anual de energia, consolidando as informações provenientes dos demais módulos.

A Figura 4.7 apresenta o fluxo de dados integrado do sistema, evidenciando a sequência

lógica entre os domínios. Observa-se que o processo inicia com a definição da localidade, seguida pela obtenção e tratamento dos dados climáticos, pelo cadastro da turbina e, finalmente, pela execução da análise. Essa organização assegura que as dependências entre etapas sejam respeitadas, evitando inconsistências e garantindo a integridade das informações.

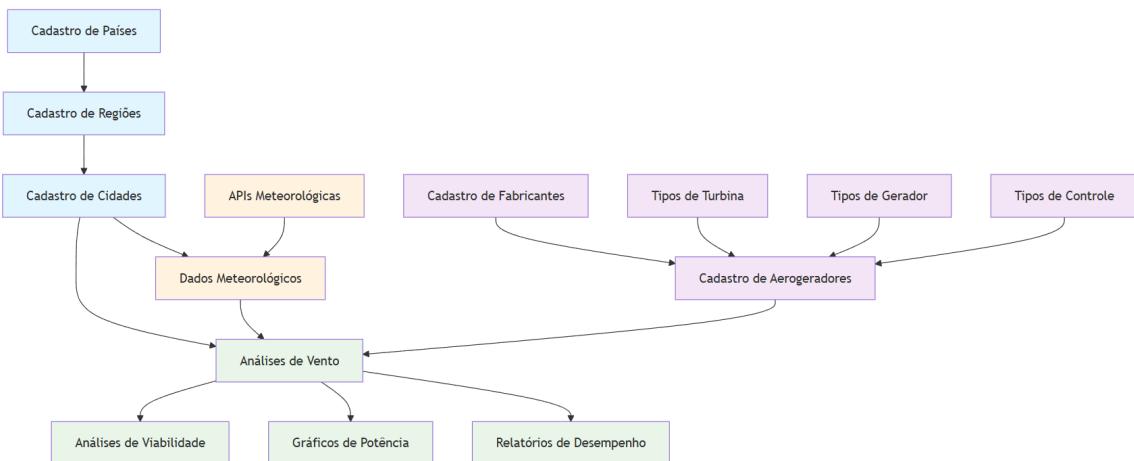


Figura 4.7 – Fluxo de dados integrado do sistema EolicSim.

Complementarmente, a Figura 4.8 ilustra a estrutura da interface do sistema, organizada em abas laterais que correspondem aos quatro domínios funcionais. Essa disposição favorece a navegação sequencial, permitindo que o usuário percorra as etapas do processo de forma intuitiva, desde o cadastro inicial até a análise final. A interface foi projetada para oferecer simplicidade e clareza, com recursos gráficos que auxiliam na interpretação dos resultados.

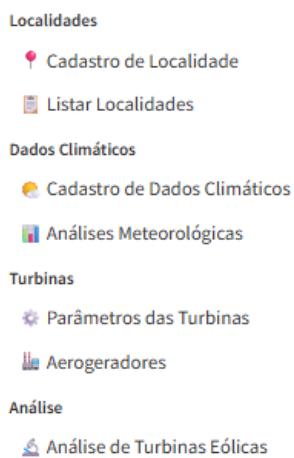


Figura 4.8 – Organização das páginas na interface do EolicSim.

A adoção dessa arquitetura modular e da interface estruturada garante escalabilidade, permitindo a inclusão de novas funcionalidades sem comprometer a lógica do sistema. Além disso, a separação em domínios facilita a manutenção e a evolução da aplicação, assegurando que futuras melhorias possam ser incorporadas de forma controlada e consistente.

4.2.2 Tecnologias e Ferramentas

A implementação do EolicSim exigiu a seleção criteriosa de tecnologias que atendessem aos requisitos de integração, desempenho e portabilidade. A arquitetura tecnológica foi concebida para garantir simplicidade de implantação, escalabilidade e compatibilidade com bibliotecas científicas amplamente utilizadas em aplicações de análise de dados.

A linguagem de programação adotada foi o Python, em sua versão 3.12, devido à sua ampla aceitação no meio acadêmico e à disponibilidade de bibliotecas voltadas para computação científica, análise estatística e visualização de dados. A escolha do Python também se justifica pela facilidade de manutenção do código e pela possibilidade de desenvolvimento iterativo, características essenciais para projetos que demandam validação contínua.

Para a construção da interface gráfica, optou-se pelo framework Streamlit, que possibilita a criação de aplicações interativas utilizando exclusivamente Python, dispensando conhecimentos em tecnologias web tradicionais. Essa abordagem simplifica o desenvolvimento e permite a integração direta com bibliotecas de visualização, oferecendo ao usuário uma experiência intuitiva e responsiva.

O armazenamento das informações foi implementado por meio do sistema de gerenciamento de banco de dados SQLite. Essa solução foi escolhida por ser leve, não exigir configuração de servidor e apresentar desempenho adequado para o volume de dados previsto, além de garantir compatibilidade com a linguagem SQL padrão. A utilização do SQLite assegura portabilidade, permitindo que o sistema seja executado em diferentes ambientes sem dependências complexas.

Além dessas tecnologias principais, foram empregadas bibliotecas específicas para atender às necessidades do projeto. Entre elas, destacam-se:

- **NumPy**: utilizada para operações matriciais e cálculos numéricos de alta performance, fundamentais para a aplicação dos modelos de extração vertical da velocidade do vento.
- **Pandas**: responsável pela manipulação e análise de séries temporais, possibilitando o tratamento eficiente dos dados meteorológicos.
- **Plotly**: empregada para a geração de gráficos interativos, como curvas de potência, perfis de vento e distribuições estatísticas, integrando-se à interface do Streamlit.
- **SciPy**: utilizada para ajustes estatísticos, incluindo a parametrização da distribuição de Weibull, e para cálculos complementares relacionados à análise de desempenho das turbinas.

Para a obtenção de dados meteorológicos, o sistema integra duas fontes principais: a API Open-Meteo, que fornece dados de reanálise com resolução temporal horária, e a API NASA POWER, que disponibiliza séries históricas baseadas em medições satelitais. Essa integração

garante maior confiabilidade e abrangência na caracterização do regime de ventos, permitindo análises comparativas entre diferentes bases de dados.

A combinação dessas tecnologias e ferramentas assegura que o EolicSim atenda aos requisitos de precisão, interatividade e reproduzibilidade, oferecendo uma plataforma robusta para estudos preliminares de viabilidade eólica.

4.2.3 Modelagem do Banco de Dados

A modelagem do banco de dados do EolicSim foi concebida para garantir integridade, consistência e escalabilidade, atendendo às necessidades de armazenamento e relacionamento entre informações geográficas, dados meteorológicos e especificações técnicas de aerogeradores. Para isso, adotou-se uma arquitetura relacional normalizada, estruturada em quatro domínios principais: Geográfico, Meteorológico, Turbinas e Análises.

O domínio Geográfico organiza as localidades em uma hierarquia composta por países, estados e cidades, assegurando a rastreabilidade espacial das análises. O domínio Meteorológico armazena séries históricas de velocidade do vento e parâmetros derivados, vinculando-os às localidades cadastradas. O domínio Turbinas concentra as informações técnicas dos aerogeradores, incluindo curva de potência, dimensões do rotor, altura do cubo e limites operacionais. Por fim, o domínio Análises integra os dados dos demais módulos, permitindo a execução de cálculos e a geração de relatórios.

A Figura 4.9 apresenta o diagrama Entidade–Relacionamento (ER) do sistema, evidenciando as entidades principais e seus relacionamentos. Observa-se a presença de chaves primárias e estrangeiras que asseguram a integridade referencial, evitando redundâncias e inconsistências. A modelagem contempla relacionamentos do tipo 1:N, como a associação entre uma localidade e suas séries históricas de vento, e entre um aerogerador e suas curvas de potência. Ressalta-se que, para fins de clareza visual, alguns atributos das tabelas foram omitidos no diagrama, uma vez que a inclusão de todos os campos tornaria a imagem excessivamente extensa e de difícil interpretação.

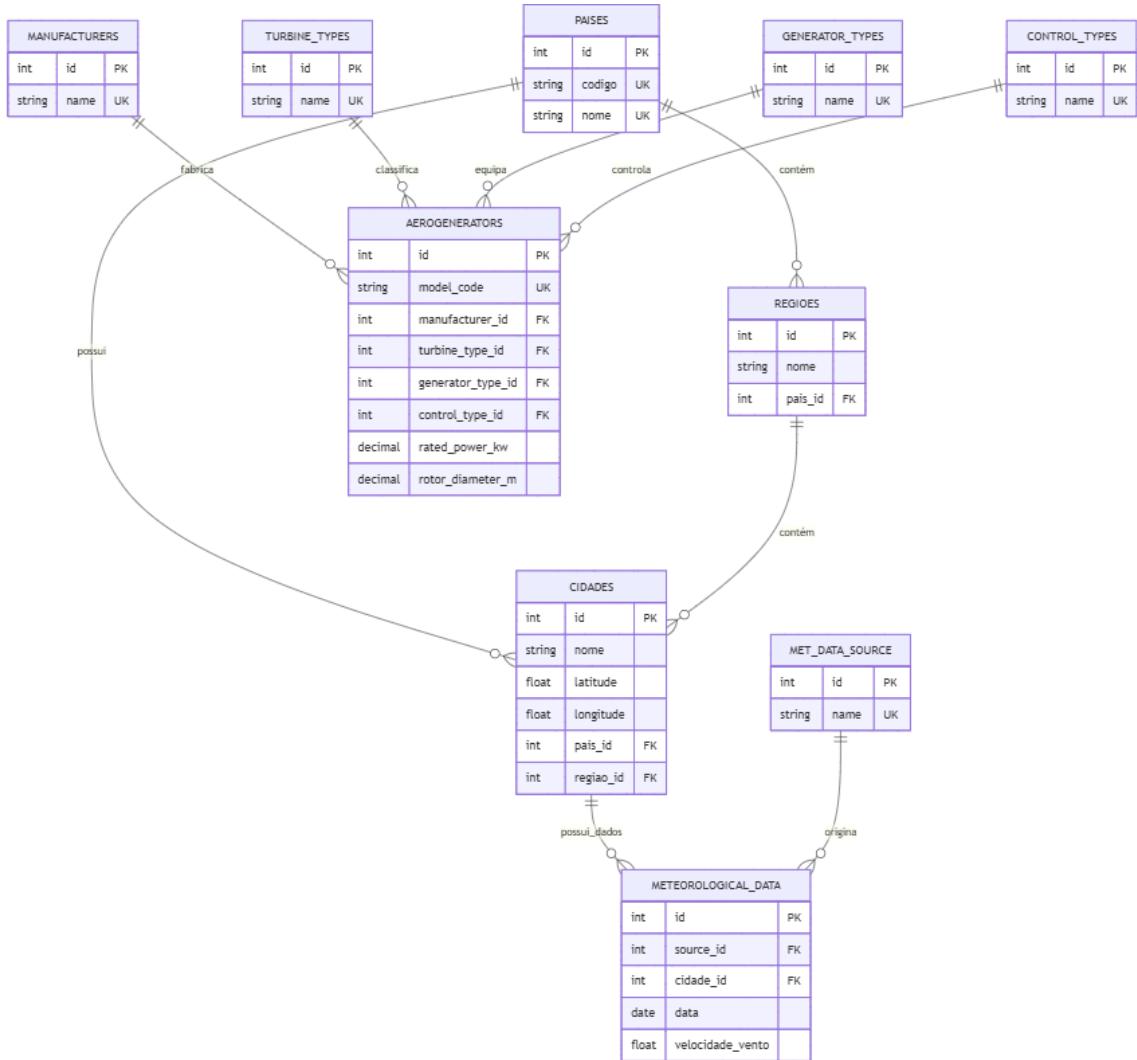


Figura 4.9 – Diagrama Entidade–Relacionamento do sistema EolicSim.

Essa estrutura relacional foi projetada para suportar consultas eficientes e operações de análise, garantindo que as informações possam ser recuperadas de forma rápida e consistente. Além disso, a normalização aplicada reduz a redundância de dados, facilitando a manutenção e a evolução do sistema. A organização modular do banco de dados também permite a inclusão de novas entidades, como catálogos adicionais de turbinas ou fontes complementares de dados meteorológicos, sem comprometer a integridade do modelo existente.

4.2.4 Fluxo Analítico e Integração

O domínio de Análise e Simulação constitui o núcleo do EolicSim, pois integra as informações provenientes dos demais módulos e aplica os modelos matemáticos necessários para estimar o potencial de geração eólica. Essa etapa é responsável por consolidar dados geográficos, séries históricas de vento e características técnicas das turbinas, transformando-os em indi-

cadores quantitativos, como a produção anual de energia (*Annual Energy Production – AEP*).

O processo analítico segue uma sequência lógica composta por cinco etapas principais: (i) configuração do cenário, com a seleção da localidade, do período de análise e da turbina; (ii) extração vertical da velocidade do vento para a altura do cubo, utilizando a Lei da Potência ou a Lei Logarítmica; (iii) ajuste estatístico da distribuição de Weibull, que caracteriza a variabilidade do regime de ventos; (iv) mapeamento da velocidade para potência, com base na curva característica do aerogerador; e (v) cálculo da AEP, realizado por integração direta sobre a série temporal e por integração probabilística ponderada pela função densidade de probabilidade.

A Figura 4.10 apresenta o fluxograma que sintetiza essas etapas, evidenciando a integração sequencial entre os módulos do sistema. Observa-se que o fluxo inicia com a entrada de dados provenientes dos domínios Localidades, Dados Climáticos e Turbinas, convergindo para a execução dos algoritmos de extração, ajuste estatístico e cálculo energético. Essa organização garante rastreabilidade e consistência, permitindo que cada etapa seja validada individualmente.

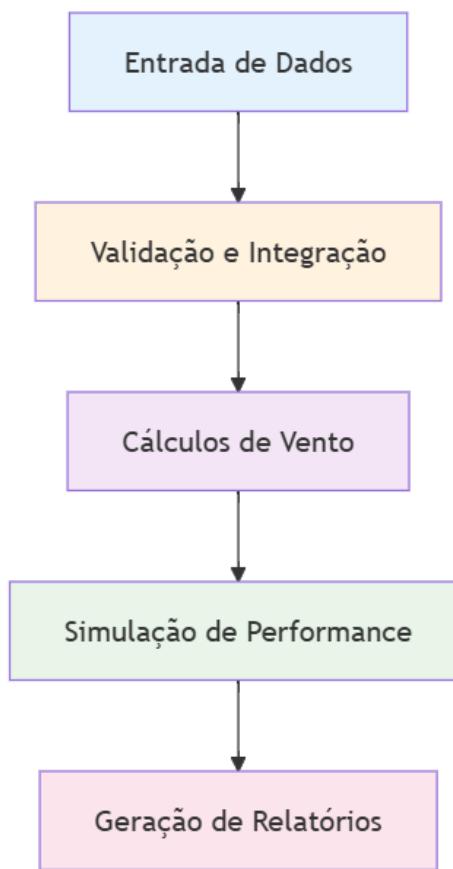


Figura 4.10 – Fluxo analítico de simulação do EolicSim.

Complementarmente, a Figura 4.11 ilustra a perspectiva de convergência dos dados no sistema, representando a integração entre três camadas fundamentais: informações geográficas, dados meteorológicos e especificações técnicas das turbinas. Essa abordagem modular permite que diferentes fontes de dados sejam incorporadas ao processo analítico sem comprometer a es-

trutura do sistema, assegurando flexibilidade para futuras expansões, como a inclusão de novos modelos de extração ou métricas de desempenho.

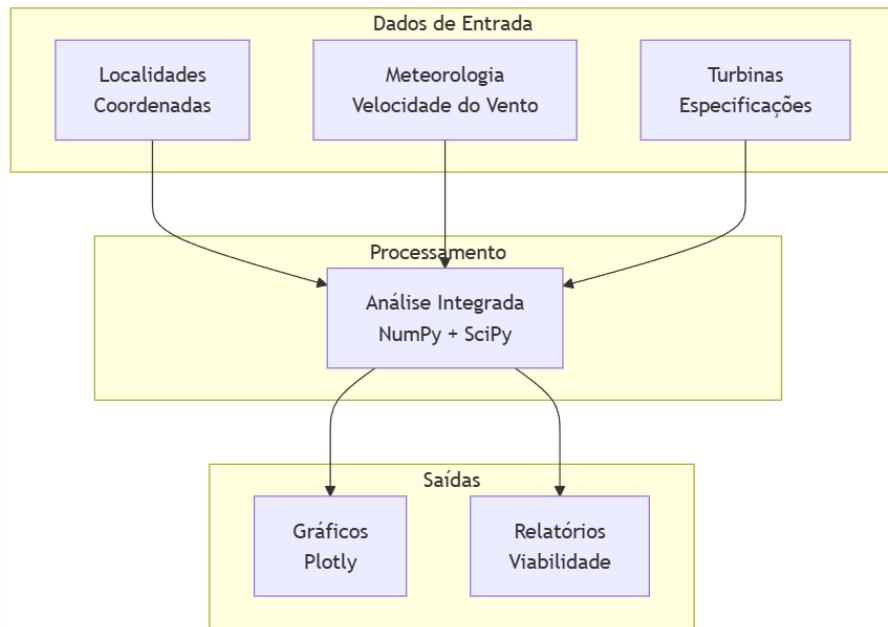


Figura 4.11 – Diagrama de convergência de dados no EolicSim.

A integração entre os módulos e a aplicação de modelos matemáticos consagrados conferem ao EolicSim a capacidade de fornecer estimativas consistentes e reproduzíveis, adequadas para estudos preliminares de viabilidade eólica. Além disso, a estrutura adotada favorece a transparência do processo, permitindo que cada etapa seja auditada e ajustada conforme as necessidades do usuário ou as características específicas do cenário analisado.

Figura 4.12 – Fluxo de Dados Integrado - EolicSim

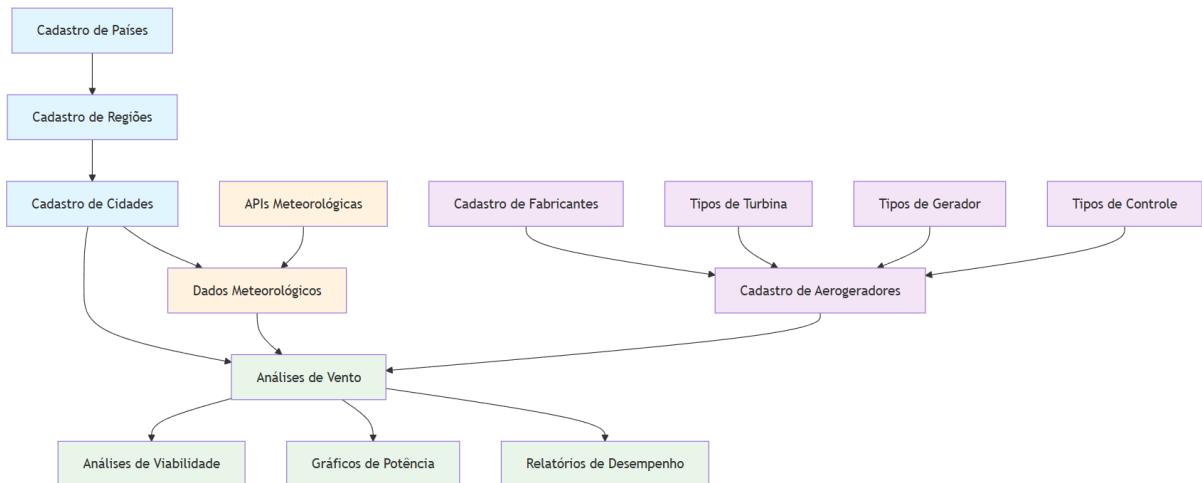
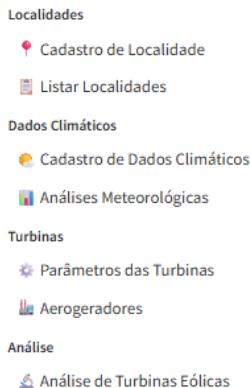


Figura 4.13 – Divisão e Organização das páginas.



Essa organização favorece a rastreabilidade das análises, desde o registro do local até a seleção da turbina e a obtenção de estimativas de geração, preservando a clareza dos passos e a consistência entre as informações utilizadas.

4.2.5 Tecnologias Adotados

A implementação dos quatro domínios funcionais do EolicSim demandou a seleção criteriosa de tecnologias que atendessem aos requisitos específicos de cada módulo: desde a gestão de informações geográficas até a simulação de performance de turbinas eólicas. A arquitetura tecnológica adotada baseia-se em Python como linguagem principal, Streamlit para interface web interativa e SQLite como sistema de persistência, complementada por bibliotecas especializadas em análise científica e integração com APIs meteorológicas externas.

As escolhas tecnológicas foram orientadas pela necessidade de integração eficiente entre os domínios funcionais, garantindo fluxo consistente de dados desde o cadastro de localidades até a estimativa final de geração eólica. Assim, foram selecionadas tecnologias como *python* para a linguagem do sistema, *Streamlit* para interface, *sqlite* para desenvolvimento do banco de dados e outras bibliotecas que se destaram no desenvolvimento.

4.2.5.1 Linguagem - Python 3.12

A linguagem *Python* foi selecionada como base tecnológica principal devido à sua consolidação no desenvolvimento de aplicações científicas e análise de dados energéticos. *Python* oferece sintaxe clara e expressiva que facilita a implementação de algoritmos complexos de modelagem eólica, além de possuir um ecossistema robusto de bibliotecas especializadas em computação numérica e análise meteorológica.

A escolha justifica-se pela necessidade de integração eficiente entre diferentes fontes

de dados climáticos, processamento matemático de parâmetros de turbinas e geração de interfaces interativas. *Python* permite prototipagem rápida e desenvolvimento iterativo, características essenciais para sistemas que demandam validação constante de modelos energéticos. Adicionalmente, sua natureza interpretada facilita a manutenção e extensão do código, aspecto fundamental para projetos acadêmicos de longo prazo.

4.2.5.2 Interface - Streamlit

O framework Streamlit foi adotado para desenvolvimento da interface web interativa do EolicSim, representando uma escolha estratégica para aplicações de análise energética. Streamlit permite a criação de aplicações web usando exclusivamente Python, eliminando a necessidade de conhecimentos em tecnologias web tradicionais como HTML, CSS ou JavaScript.

A principal justificativa para esta escolha reside na integração nativa com bibliotecas científicas Python, possibilitando visualização interativa de dados meteorológicos e resultados de simulações em tempo real. Esta característica é fundamental para sistemas de análise eólica que requerem feedback visual imediato durante a configuração de cenários e avaliação de resultados. O Streamlit oferece ainda deployment simplificado e interface responsiva, adequada para usuários técnicos e não técnicos que utilizam o sistema para estimativas de potencial eólico.

4.2.5.3 Banco de Dados - SQLite

O SQLite foi selecionado como Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados (SGBD) principal do EolicSim, constituindo uma escolha tecnicamente fundamentada para o contexto de análise de dados meteorológicos e parâmetros de turbinas eólicas. SQLite é um SGBD relacional *serverless* que armazena toda a base de dados em um único arquivo, eliminando dependências de instalação e configuração de servidores externos.

Para aplicações de estimativa de potencial eólico, o SQLite oferece desempenho adequado para volumes típicos de dados meteorológicos históricos e cadastros de turbinas, mantendo compatibilidade total com SQL padrão. Sua arquitetura self-contained facilita significativamente a distribuição e portabilidade do sistema, aspectos essenciais para ferramentas acadêmicas e de pesquisa.

4.2.5.4 Principais Bibliotecas

Durante o desenvolvimento do sistema, algumas bibliotecas se destacaram por sua relevância na integração de dados meteorológicos, análise científica e visualização dos resultados.

A seguir, são apresentadas as principais APIs e bibliotecas utilizadas no EolicSim, com suas respectivas justificativas técnicas:

- **APIs de Dados Climáticos**

- **Open-Meteo API**: Fonte primária de dados meteorológicos históricos, acesso gratuito, cobertura global, dados de velocidade do vento na altura de 10 metros, essenciais para análise de perfis eólicos no contexto do sistema.
- **NASA POWER API**: Fonte complementar baseada em medições satelitais, histórico extenso de dados de vento (10m e 50m), precisão validada para análise energética e comparação entre fontes.

- **Bibliotecas de Análise Científica**

- **NumPy**: Base para computação científica, operações matriciais e algoritmos de perfil de vento (Lei de Potência, Lei Logarítmica).
- **Pandas**: Manipulação de séries temporais meteorológicas, análise estatística e processamento de dados históricos de vento.
- **Plotly**: Visualização interativa de dados meteorológicos e simulações, gráficos compatíveis com Streamlit (curvas de potência, rosas dos ventos, análises temporais).

4.3 MODELAGEM DO BANCO DE DADOS

A modelagem do banco de dados do sistema EolicSim implementa uma arquitetura relacional normalizada que organiza as informações em 11 tabelas principais, exibidas na figura 4.14, distribuídas através de 4 domínios funcionais. A estrutura prioriza a integridade referencial e a eliminação de redundâncias através de relacionamentos bem definidos entre as entidades.

O sistema estrutura-se em quatro domínios interconectados: Geográfico (3 tabelas), Meteorológico (2 tabelas), Turbinas (5 tabelas) e Análises (1 tabela auxiliar). Cada domínio implementa relacionamentos específicos que garantem consistência e rastreabilidade das informações.

O modelo implementa relacionamentos 1:N (um para muitos) através de chaves estrangeiras que conectam os domínios funcionais. A hierarquia geográfica estabelece a base locacional, os dados meteorológicos associam-se às localidades, e as especificações de turbinas organizam-se através de entidades de referência que convergem na entidade principal ‘*aerogenerators*’.

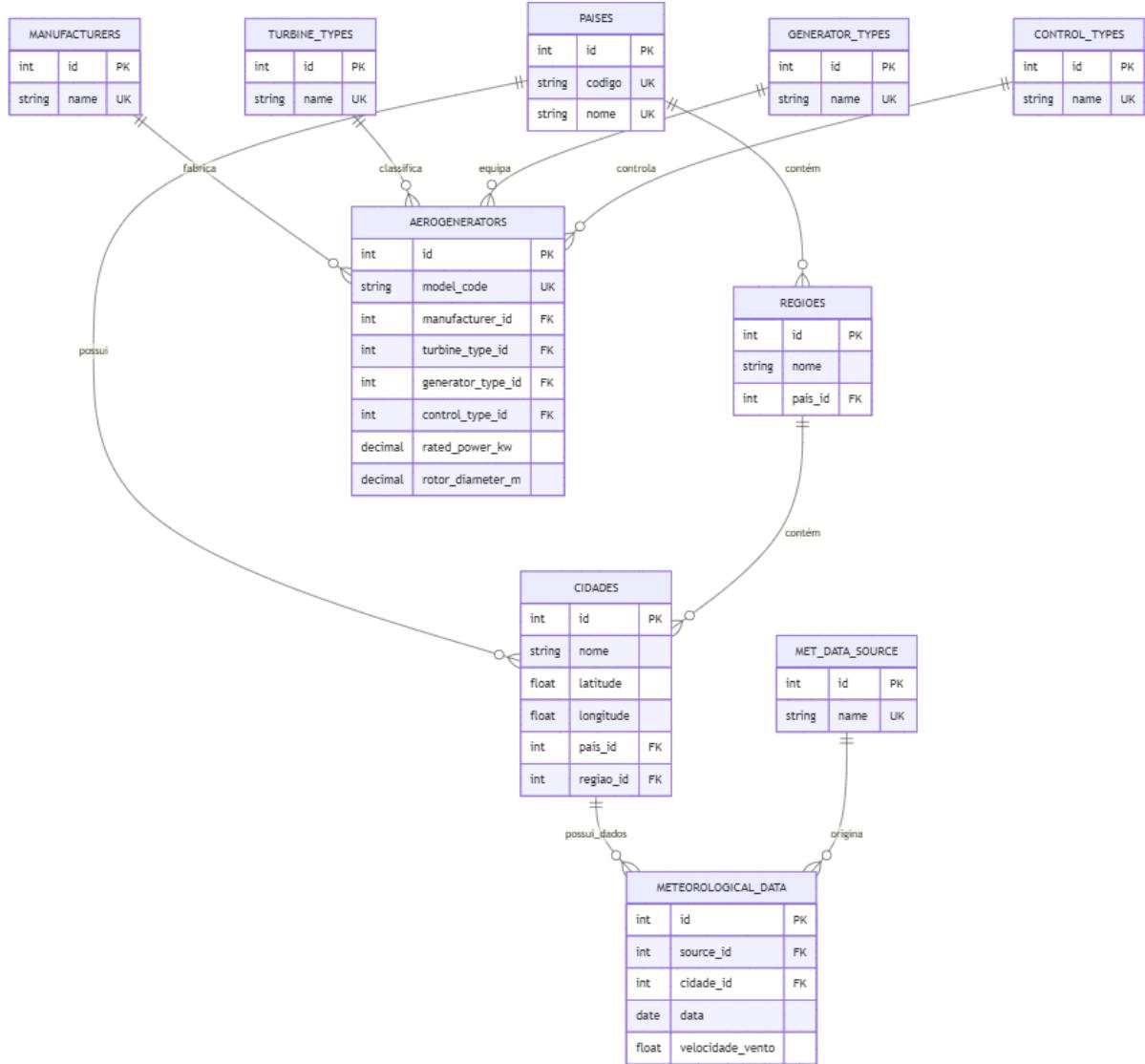


Figura 4.14 – Diagrama de Entidade e Relacionamento - EolicSim

Em síntese, a modelagem prioriza relacionamentos claros entre domínios funcionais, integridade referencial robusta e normalização adequada para suporte eficiente às análises de potencial eólico, mantendo simplicidade estrutural sem comprometer funcionalidade técnica.

4.4 ARQUITETURA E DOMÍNIOS FUNCIONAIS

Como já descrito anteriormente a arquitetura do sistema fundamenta-se em abordagem modular que organiza as funcionalidades em quatro domínios funcionais interconectados. Esta estruturação estabelece um fluxo lógico e sequencial de análise, onde cada domínio contribui com informações específicas que, integradas, viabilizam a estimativa do potencial de geração eólica de uma localidade. A organização modular facilita a manutenção e escalabilidade do sistema, proporcionando clareza na compreensão do processo analítico desde a caracterização

geográfica inicial até a estimativa final de performance energética.

4.4.1 Domínio 1: Localidades

O domínio Localidades constitui o alicerce geográfico do sistema de análise. Este módulo implementa uma estrutura hierárquica organizada em três níveis interdependentes: países, regiões (estados) e cidades, conforme ilustrado na Figura 4.15 e 4.16. A organização hierárquica fundamenta-se na necessidade de estabelecer contexto geográfico preciso para as análises subsequentes, uma vez que características topográficas, climáticas e regulatórias variam significativamente entre diferentes regiões.

Figura 4.15 – Fluxo de Dados - Localidades

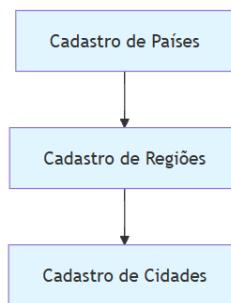
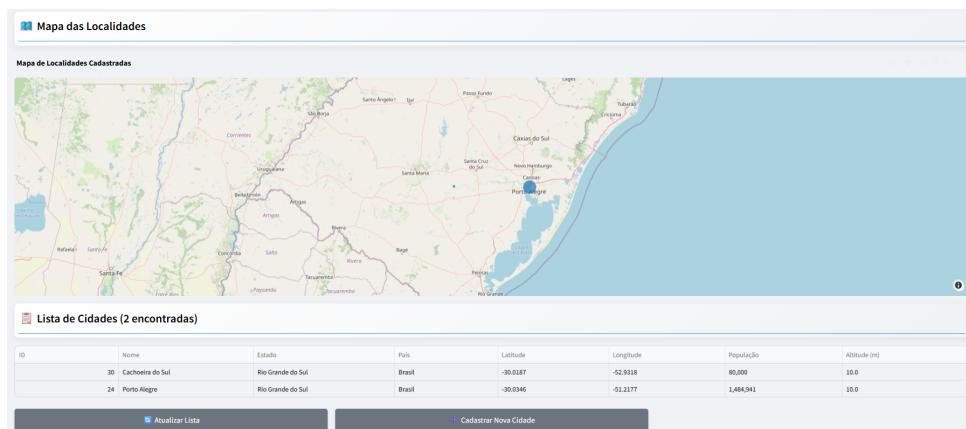
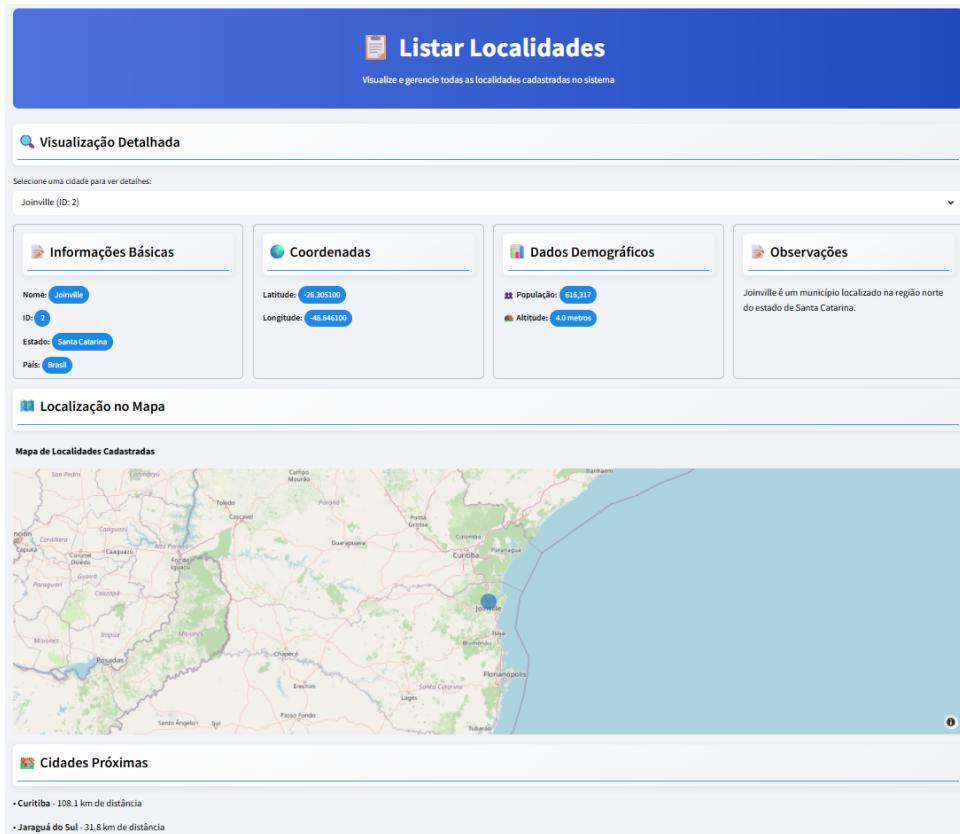


Figura 4.16 – Apresentação das informações Geográficas no estado do Rio Grande do Sul



A implementação tecnológica utiliza a biblioteca *GeoPy* para processamento de coordenadas geográficas e cálculos de distância *haversine*, garantindo precisão nas validações de posicionamento e nas funcionalidades de busca por proximidade. O sistema implementa validações rigorosas de coordenadas geográficas, assegurando que as latitudes permaneçam no intervalo $[-90^\circ, 90^\circ]$ e as longitudes no intervalo $[-180^\circ, 180^\circ]$, conforme padrões cartográficos internacionais.

Figura 4.17 – Índices Geográficos



A interface do usuário, desenvolvida em Streamlit, apresenta formulários intuitivos para cadastro de localidades e integra funcionalidades de visualização cartográfica em tempo real, permitindo verificação imediata da precisão dos dados inseridos. Adicionalmente, a estrutura do banco de dados SQLite implementa índices compostos otimizados para consultas geográficas, utilizando combinações de latitude e longitude para acelerar operações de busca espacial, conforme demonstrado na Figura 4.17.

Por conseguinte, este conjunto de decisões tecnológicas contribui para a confiabilidade do sistema ao garantir precisão geográfica e consistência referencial entre as entidades, fundamentais para análises de viabilidade eólica que consideram características topográficas regionais.

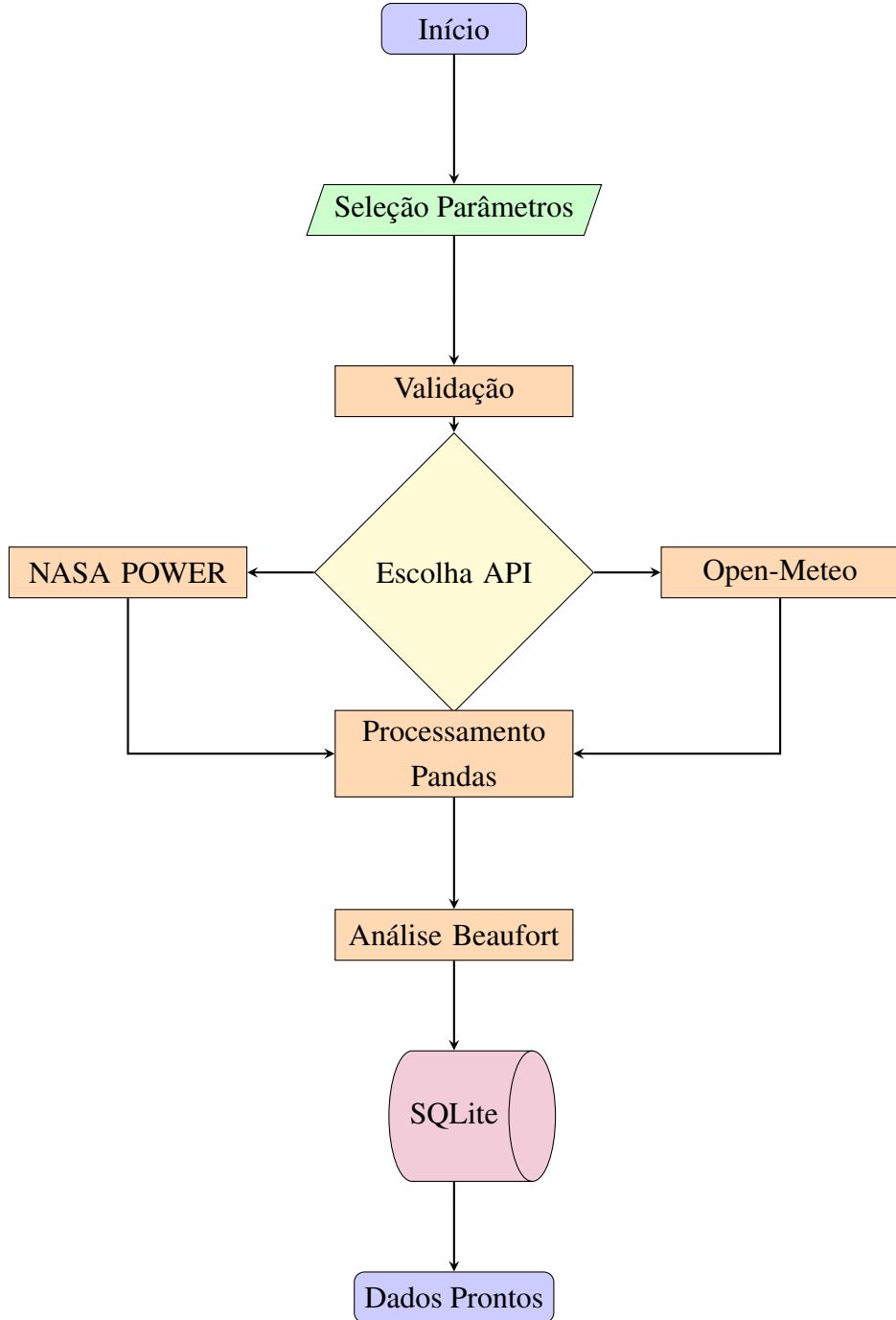
4.4.2 Domínio 2: Dados Climáticos

O domínio Dados Climáticos estabelece a base meteorológica para análise de potencial eólico através da integração com múltiplas fontes de dados e implementação de ferramentas de análise estatística. A transição natural do domínio anterior ocorre através da associação entre localidades cadastradas e informações meteorológicas correspondentes, representando o núcleo informacional do sistema.

A arquitetura tecnológica integra duas fontes primárias de dados meteorológicos. A API Open-Meteo fornece dados de reanálise meteorológica com cobertura global e resolução temporal horária, suportando coleta de dados de velocidade do vento. A API NASA POWER disponibiliza dados satelitais validados com histórico extenso de décadas, constituindo fonte alternativa para validação e comparação.

O processamento de dados meteorológicos emprega a biblioteca Pandas com otimizações para séries temporais, permitindo manipulação eficiente de grandes volumes de dados históricos e geração de agregações estatísticas necessárias para caracterização do regime de ventos local. Além disso, o sistema implementa funcionalidades de análise de viabilidade eólica, incluindo classificação automática de condições de vento segundo a escala Beaufort e aplicação de correções de velocidade por altura utilizando a Lei de Potência.

Figura 4.18 – Fluxograma Requisição de Dados Meteorológicos



A figura 4.18 ilustra o processo completo desde a requisição às APIs externas até o armazenamento final no banco de dados SQLite. O sistema incorpora cache automático e retry para APIs externas, garantindo robustez na coleta de dados e reduzindo dependência de conectividade externa.

Em síntese, a integração com múltiplas APIs meteorológicas garante disponibilidade e qualidade dos dados, enquanto o processamento vectorizado permite análise eficiente de grandes volumes de dados históricos, contribuindo para a rastreabilidade e confiabilidade das estimativas eólicas.

4.4.3 Domínio 3: Turbinas

O domínio Turbinas estabelece a ponte tecnológica entre as condições ambientais caracterizadas e os equipamentos de geração eólica disponíveis para instalação. Este módulo implementa um modelo de dados complexo que organiza informações técnicas através de cinco entidades inter-relacionadas: fabricantes, tipos de turbina, tipos de gerador, tipos de controle e aerogeradores completos.

A arquitetura de dados utiliza o padrão *Repository* para abstração da camada de persistência, facilitando operações de manutenção e permitindo implementação de testes unitários. O modelo relacional implementa restrições de integridade referencial através de *foreign keys* e *constraints* personalizados, garantindo consistência entre componentes e validando dependências funcionais entre diferentes tipos de equipamentos.

O cadastro de aerogeradores incorpora mais de 25 parâmetros técnicos, incluindo: curva de potência, velocidades de *cut-in* e *cut-out*, eficiências nominais, especificações do rotor, características da nacelle e parâmetros de controle operacional. A interface implementa formulários dinâmicos que se adaptam automaticamente ao tipo de turbina selecionado, apresentando campos específicos e validações personalizadas para cada categoria de equipamento.

Adicionalmente, o sistema incorpora algoritmos de validação técnica que verificam a consistência física dos parâmetros inseridos, detectando automaticamente inconsistências como velocidades de cut-out menores que velocidades de cut-in ou potências nominais incompatíveis com diâmetros de rotor especificados. A Figura 4.19 e 4.20 apresenta a estrutura completa das entidades e seus relacionamentos.

Figura 4.19 – Fluxo de Dados Turbina

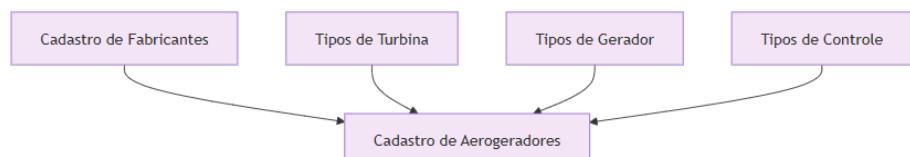
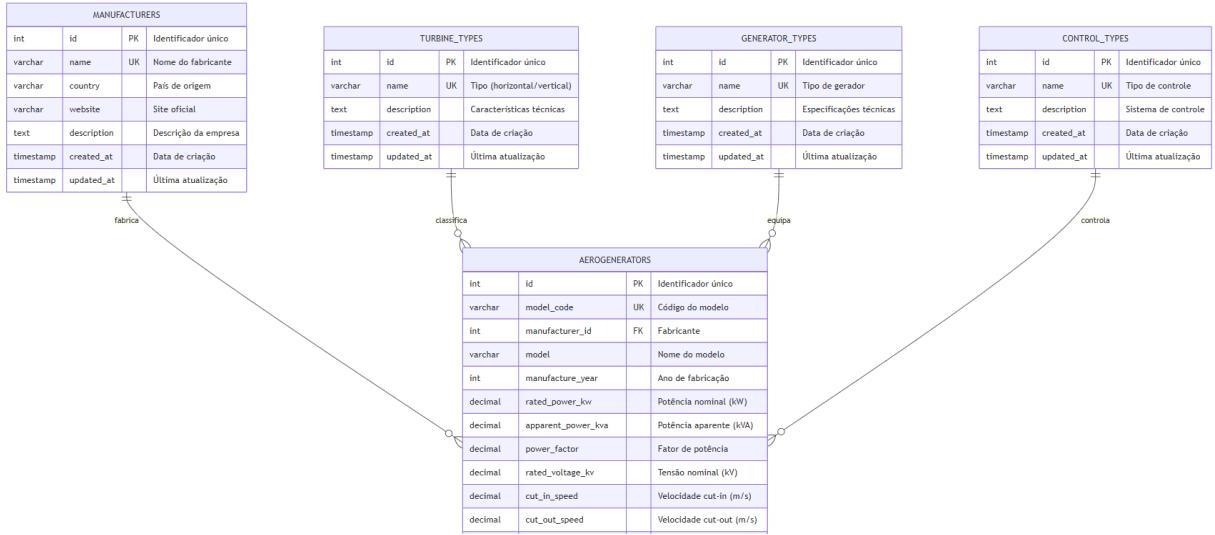


Figura 4.20 – Diagrama de Banco de Dados Turbina



Por conseguinte, o modelo relacional normalizado evita redundância de dados e facilita atualizações de informações técnicas, enquanto as validações implementadas garantem consistência física dos parâmetros, aspectos essenciais para precisão das simulações energéticas.

4.4.4 Domínio 4: Análise e Simulação

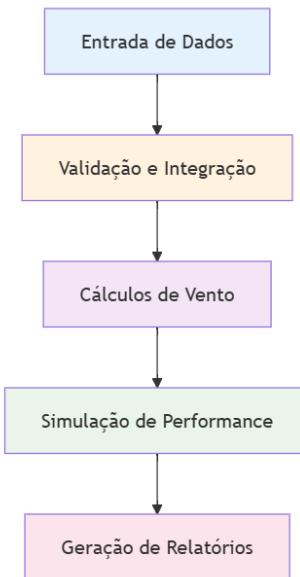
O domínio Análise e Simulação representa a síntese integrativa de todos os domínios anteriores, implementando modelos matemáticos e algoritmos de simulação que convergem para a estimativa final do potencial de geração eólica. Este domínio constitui o núcleo analítico do sistema, onde informações de localização geográfica, dados climáticos históricos e especificações técnicas de turbinas são processados através de algoritmos científicamente fundamentados.

A implementação tecnológica utiliza *NumPy* para computação científica de alta performance, possibilitando processamento vectorizado de grandes conjuntos de dados e implementação eficiente de algoritmos de perfil de vento baseados na Lei de Potência e Lei Logarítmica. A biblioteca *SciPy* complementa as funcionalidades através de algoritmos para cálculo do coeficiente de performance (*Cp*) de turbinas eólicas e simulação de componentes do vento, incluindo vento médio, ondas e turbulência.

O módulo de visualização emprega *Plotly* para geração de gráficos interativos que incluem: curva de potência de turbinas, rosas dos ventos multidirecionais, análises temporais de produção energética e comparações de performance entre diferentes modelos de equipamentos. O processo analítico estrutura-se em cinco etapas sequenciais: configuração de parâmetros iniciais com seleção integrada de localidade, turbina e período de análise; cálculo de perfis verticais de vento com aplicação de correções por rugosidade superficial e presença de obstáculos; simulação detalhada de componentes de vento considerando variações temporais e espaciais;

estimativa de performance de turbina através de modelos matemáticos validados; geração de relatórios visuais incluindo recomendações técnicas para viabilidade econômica do projeto.

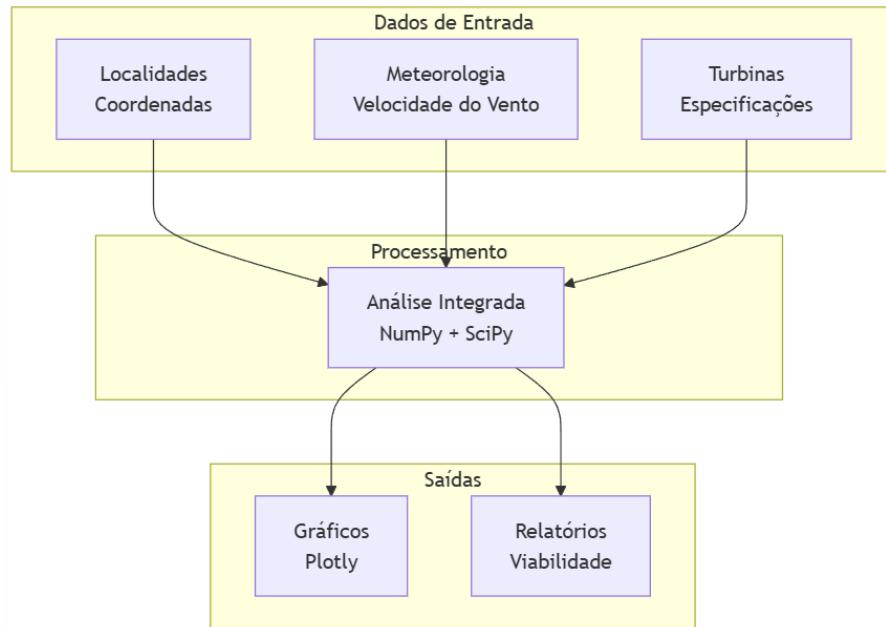
Figura 4.21 – Fluxo Analítico de Simulação do EolicSim



A Figura 4.21 demonstra a integração sequencial entre todos os módulos do sistema, evidenciando como informações de cada domínio convergem para a estimativa final de geração.

Para compreender melhor como o sistema processa as informações, é útil visualizar o fluxo através de uma perspectiva de convergência de dados, como visto na figura 4.22, onde três fontes distintas de informação se unem para produzir resultados práticos. Imagine o sistema como uma fábrica que recebe três tipos de matéria-prima diferentes e as transforma em produtos finais úteis.

Figura 4.22 – Diagrama de Convergência - EolicSim



- **Etapa de Dados de Entrada**

- **Localidades com Coordenadas**

- * Endereço exato para instalação da turbina (latitude, longitude).
 - * Inclui altitude, características do terreno e fatores geográficos que influenciam o vento.

- **Dados Meteorológicos**

- * Histórico detalhado da velocidade do vento ao longo do tempo.
 - * Inclui direção, variações sazonais e padrões climáticos.

- **Especificações das Turbinas**

- * Características técnicas do equipamento (potência máxima, limites operacionais, condições ideais de funcionamento).

- **Etapa de Processamento**

- **Análise Integrada**

- * Uso de bibliotecas científicas (NumPy, SciPy) para processamento dos dados.
 - * Aplicação de fórmulas matemáticas para ajustar dados de vento à altura da turbina.
 - * Consideração de fatores como rugosidade do terreno, altura de instalação e características específicas da turbina.

- **Etapa de Saídas**

- Gráficos criados com Plotly

- * Visualização dos resultados (produção de energia ao longo do ano, relação entre vento e energia).
- * Facilita compreensão para usuários não técnicos.

- Relatórios de Viabilidade

- * Parecer técnico sobre adequação do local, produção estimada e viabilidade econômica.
- * Recomendações práticas para decisão de investimento.

Essa estrutura evidencia o funil de convergência dos dados, transformando informações geográficas, meteorológicas e técnicas em resultados práticos para tomada de decisão em projetos de energia eólica. A integração das bibliotecas científicas garante precisão dos modelos, enquanto a visualização interativa contribui para a interpretação dos resultados e confiabilidade das estimativas.

4.5 VALIDAÇÃO COM ESTUDO DE CASO

4.5.1 Aplicação da Turbina TE24

5 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

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/capaci-dadebrasil.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.

BIANCHI, F. D.; BATTISTA, H. D.; MANTZ, R. J. **Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design**. London: Springer, 2007. (Advances in Industrial Control). ISBN 9781846284922.

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>>.

BOSSANYI, E. A. Individual blade pitch control for load reduction. **Wind Energy**, v. 6, n. 2, p. 119–128, 2003.

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

_____. **Wind Energy Handbook**. 3. ed. [S.l.]: Wiley, 2021.

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%C3%A3lica%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. Acessado 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 2025: Ano base 2024.** Rio de Janeiro: [s.n.], 2025. Acesso em: 10 jun. 2025. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topicos-767/BEN\S\C3\ADntese\2025\PT.pdf>>.

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/>>.

FLEMING, P. et al. Field test of wake steering at an offshore wind farm. **Wind Energy Science**, v. 4, p. 255–270, 2019.

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

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

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. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind Energy Explained: Theory, Design and Application.** 2. ed. Chichester: Wiley, 2009. ISBN 9780470015001.

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.I.], 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.

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.I.]: 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.I.: 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: <[#Sections-Sources>](https://pt.weatherspark.com/y/29610/Clima-caracter%C3%A1stico-em-Cachoeira-do-Sul-Rio-Grande-do-Sul-Brasil-durante-o-ano).