

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LOUISE DOMINGUES COELHO

**APROVEITAMENTO DE ENERGIA EÓLICA ATRAVÉS DE
AEROGERADORES DE EIXO VERTICAL INSTALADOS EM POSTES:
ILUMINAÇÃO NOS MOLHES DA BARRA DA PRAIA DO CASSINO/RIO
GRANDE**

Bagé

2024

LOUISE DOMINGUES COELHO

**APROVEITAMENTO DE ENERGIA EÓLICA ATRAVÉS DE
AEROGERADORES DE EIXO VERTICAL INSTALADOS EM POSTES:
ILUMINAÇÃO NOS MOLHES DA BARRA DA PRAIA DO CASSINO/RIO
GRANDE**

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

Orientador: Carlos Sonier Cardoso do Nascimento.

Bagé

2024

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

C672a Coelho, Louise Domingues

Aproveitamento de energia eólica através de aerogeradores de eixo vertical instalados em postes: iluminação nos molhes da barra da Praia do Cassino/Rio Grande / Louise Domingues Coelho. 78 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA DE ENERGIA, 2024.

"Orientação: Carlos Sonier Cardoso do Nascimento".

1. Energia Eólica. 2. Potencial Eólico. 3. Turbina Eólica de Eixo Vertical. 4. Velocidade do Vento. 5. Postes de Iluminação. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LOUISE DOMINGUES COELHO

APROVEITAMENTO DE ENERGIA EÓLICA ATRAVÉS DE AEROGERADORES DE EIXO VERTICAL INSTALADOS EM POSTE: ILUMINAÇÃO NOS MOLHES DA BARRA DA PRAIA DO CASSINO/RIO GRANDE

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

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 12 de julho de 2024.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Carlos Sonier Cardoso do Nascimento
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Enoque Dutra Garcia
UNIPAMPA

Prof. Dr. Marcelo Romero de Moraes
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **MARCELO ROMERO DE MORAES**, **PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/07/2024, às 17:20, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normavas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ENOQUE DUTRA GARCIA**, **PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/07/2024, às 17:20, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normavas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CARLOS SONIER CARDOSO DO NASCIMENTO**, **PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/07/2024, às 21:17, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normavas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.uni_pampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_or_gao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1482262** e o código CRC **1E695D8E**.

Dedico este trabalho à minha família,
especialmente aos meus pais, Camilo
Dinarte Vaz Coelho e Maria Elisabeth
Menezes Domingues Coelho.

AGRADECIMENTO

A realização deste trabalho não seria possível sem o apoio, incentivo e dedicação de várias pessoas especiais em minha vida. Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização desta etapa.

A toda minha família, em especial aos meus pais, Maria Elisabeth Menezes Domingues Coelho e Camilo Dinarte Vaz Coelho, que sempre estiveram ao meu lado, por acreditar no meu potencial e me ensinar o valor da dedicação e do esforço. Sua presença e apoio constante foram essenciais para que eu chegasse até aqui. Ao meu irmão, Willian Domingues Coelho, por ser uma fonte de inspiração e por todo apoio e ajuda desde o início da minha trajetória. E a minha dinda querida, Camila da Cunha Coelho, por sempre me apoiar e incentivar a seguir em frente.

Ao meu namorado, Gabriel de Sousa Gonçalves, por ser meu porto seguro e estar presente nos momentos de alegria e nos desafios, sua paciência e compreensão foram fundamentais para que eu pudesse me dedicar plenamente a este projeto.

Aos meus amigos, em especial, colegas de curso e amizades que levo por anos, Liandra de Campos Frana, Dominnic Gomes da Silva, Camila Delfim Soares, Thiago Quadros dos Santos e Roberta Teixeira Ximendes, agradeço o apoio durante esses anos, vocês foram essenciais.

Em especial aos meus professores, Carlos Sonier Cardoso do Nascimento, Marcelo Romero de Moraes, Enoque Dutra Garcia, Sabrina Neves Silva e Jocemar Biasi Parizzi, pelo apoio e suporte durante o período da graduação.

A Integra Energia, pela oportunidade de estágio, em especial ao João Nunes Ramis e Afonso Carlos Aguilar, por me conceder a oportunidade de trabalhar lado a lado no setor eólico, e pelo vasto ensinamento compartilhado durante o período do estágio.

Ao Grupo de Estudos Avançados em Engenharia de Energia (GrEEEn), pela oportunidade de participação em diversos projetos, além da valiosa contribuição, desde o início, ao meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

“Se você quiser descobrir os segredos do Universo, pense em termos de energia, frequência e vibração”.

Nikola Tesla.

RESUMO

Atualmente, no setor energético brasileiro, é possível observar o vasto crescimento na aplicação de fontes de energias renováveis, isso devido a necessidade da trajetória de descarbonização. O uso de energias renováveis desempenha um papel crucial na redução das emissões, mitigando as mudanças climáticas, promovendo a sustentabilidade e impulsionando o desenvolvimento econômico. A utilização da energia eólica como fonte alternativa para geração de energia elétrica é um exemplo crescente. Visando contribuir com o aumento da utilização de fontes alternativas, o presente trabalho, abrange o estudo de geração de energia eólica com uso de turbinas eólicas de eixo vertical, de pequeno porte, acoplados a postes de iluminação pública, com foco na região dos Molhes da Barra, localizado na Praia do Cassino, cidade de Rio Grande, no extremo Sul do Rio Grande do Sul. Neste estudo, foram analisados diferentes modelos de turbinas eólicas com o objetivo de identificar a turbina mais eficiente e adequada para a aplicação, com o intuito de aprimorar o local, promovendo iluminação e, conseqüentemente, segurança aos moradores e turistas. Assim como, análise dos dados relativos à velocidade média de vento na região, utilizando software específico de medição, obtendo assim, gráficos com dados diários, mensais e anuais da velocidade e potencial do vento. Com estes dados, é possível obter resultados relacionados à eficiência do projeto proposto. A combinação deste estudo proporciona uma abordagem mais completa e fundamentada para encontrar soluções sustentáveis de geração de energia. O estudo proposto visa não apenas contribuir para a expansão das energias renováveis, mas também, principalmente, para o desenvolvimento local da região, explorando ainda mais o potencial eólico da região da Praia do Cassino como um local adequado para turbinas eólicas de eixo vertical e pequeno porte gerarem eletricidade, e contribuindo assim para a mitigação das alterações climáticas que são vivenciadas e para a construção de um futuro cada vez mais sustentável.

Palavras-Chave: Energia Eólica. Potencial Eólico. Turbina Eólica de Eixo Vertical. Velocidade do Vento. Postes de Iluminação.

ABSTRACT

Currently, in the Brazilian energy sector, it is possible to observe the vast growth in the application of renewable energy sources, this due to the need for the decarbonization trajectory. The use of renewable energy plays a crucial role in reducing emissions, mitigating climate change, promoting sustainability and boosting economic development. The use of wind energy as an alternative source for electricity generation is a growing example. Aiming to contribute to the increase in the use of alternative sources, the present work covers the study of wind energy generation with the use of small vertical axis wind turbines, coupled to public lighting poles, with a focus on the Molhes da Barra region, located in Praia do Cassino, city of Rio Grande, in the extreme south of Rio Grande do Sul. In this study, different models of wind turbines were analyzed with the objective of identifying the most efficient and suitable turbine for the application, in order to improve the place, promoting lighting and, consequently, safety to residents and tourists. As well as, analysis of data on the average wind speed in the region, using specific measurement software, thus obtaining graphs with daily, monthly and annual data on wind speed and potential. With these data, it is possible to obtain results related to the efficiency of the proposed project. The combination of this study provides a more complete and reasoned approach to finding sustainable power generation solutions. The proposed study aims not only to contribute to the expansion of renewable energies, but also, mainly, to the local development of the region, further exploring the wind potential of the Praia do Cassino region as a suitable place for vertical and small axis wind turbines to generate electricity, and thus contributing to the mitigation of climate changes that are experienced and to the construction of an increasingly sustainable future.

Keywords: Wind Power. Wind Potential. Vertical Axis Wind Turbine. Wind Speed. Lighting Pole.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Estrutura do presente trabalho. | 19 |
| Figura 2: Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar..... | 21 |
| Figura 3: Modelo de circulação global dos ventos na atmosfera terrestre. | 21 |
| Figura 4: Escalas espacial e temporal de movimento dos ventos..... | 22 |
| Figura 5: Perfil vertical de vento. | 23 |
| Figura 6: a) Anemômetro de Conchas. b) Anemômetro de Hélices. | 28 |
| Figura 7: Sensor de direção disposto isoladamente..... | 29 |
| Figura 8: Sensor de temperatura. | 30 |
| Figura 9: Torres de Medições Anemométrica (TMAs)..... | 31 |
| Figura 10: Equipamentos que compõem as TMAs. | 32 |
| Figura 11: Exemplo gráfico de uma rosa dos ventos..... | 34 |
| Figura 12: Fluxo de vento através de um cilindro. | 35 |
| Figura 13: Curva de potência ideal de um aerogerador. | 36 |
| Figura 14: Fluxo de vento ideal através de um rotor eólico. | 38 |
| Figura 15: Turbina eólica de Poul la Cour..... | 40 |
| Figura 16: Elemento da pá de um rotor de eixo horizontal. | 41 |
| Figura 17: Teoria do aerofólio. | 42 |
| Figura 18: Parque eólico localizado na Alemanha. | 44 |
| Figura 19: Tipos de rotores com relação a sua orientação: upwind e downwind..... | 45 |
| Figura 20: a) Turbina Eólica Darrieus em Central Wahington. b) Vista lateral da turbina. | 46 |
| Figura 21: Turbina eólica modelo Venturi..... | 47 |
| Figura 22: a) Turbina Eólica Savonius. b) Turbina Eólica Savonius, contendo anemômetro. | 48 |
| Figura 23: Turbina eólica modelo Darrieus-H..... | 48 |
| Figura 24: Exemplos de turbinas eólicas modelo Helical. | 49 |
| Figura 25: Estrutura do Projeto. | 50 |
| Figura 26: Molhes da Barra, região da Praia do Cassino, Rio Grande - RS..... | 52 |
| Figura 27: Velocidade média horária do vento. | 53 |
| Figura 28: Porcentagem de horas com vento em cada direção cardinal. | 54 |
| Figura 29: Velocidade horária do vento registrada conforme a tabela 1 da escala de Beaufort. | 54 |

| | |
|---|----|
| Figura 30: Velocidade horária do vento registrada conforme a tabela 1 da escala de Beaufort. | 54 |
| Figura 31: Modelo do aerogerador definido para o projeto, TEEV Darrieus-H. | 55 |
| Figura 32: Faixas de desempenho típicas de turbinas eólicas. | 56 |
| Figura 33: Aerodinâmica do poste de iluminação acoplado ao modelo de TEEV Darrieus-H. | 58 |
| Figura 34: Distribuição de postes. | 58 |
| Figura 35: Modelo de luminária LED. | 59 |
| Figura 36: Simulação para quatro postes de iluminação. | 60 |
| Figura 37: Conexão do projeto off-grid. | 61 |
| Figura 38: Classes de iluminação para cada tipo de via. | 63 |
| Figura 39: Iluminância média e fator de uniformidade mínimo para cada classe de iluminação. | 63 |
| Figura 40: Datasheet da luminária utilizada. | 64 |
| Figura 41: Características de cada poste. | 65 |
| Figura 42: Resultado gerado da primeira simulação. | 65 |
| Figura 43: Resultados gerados da primeira simulação, $E_{med} = 10 \text{ lux}$, e $U = 0,67$ | 66 |
| Figura 44: Tabulação dos dados de vento na forma de frequência de distribuição. | 67 |
| Figura 45: Histogramas das frequências de distribuição da velocidade do vento. | 68 |
| Figura 46: Seguimento para determinação da EAG. | 69 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Escala de Beaufort. | 26 |
| Tabela 2: Aplicação das turbinas eólicas. | 43 |
| Tabela 3: Especificações do Fabricante. | 70 |
| Tabela 4: Viabilidade inicial dos principais equipamentos e mão de obra para implantação do projeto. | 71 |

LISTA DE SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

TEEV – Turbina Eólica de Eixo Vertical

TEEH – Turbina Eólica de Eixo Horizontal

VAWT – Vertical Axis Wind Turbine

HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine

IRENA – International Renewable Energy Agency

TMA – Torre de Medição Anemométrica

TSR – Tip Speed Ratio

EAG – Energia Anual Gerada

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 1.1 Objetivos..... | 17 |
| 1.2 Objetivos Específicos | 17 |
| 1.3 Justificativas | 17 |
| 1.4 Estrutura de Trabalho | 19 |
| 2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA..... | 20 |
| 2.1 Vento e Circulações Atmosféricas | 20 |
| 2.1.2 Perfil do Vento e Influência no Terreno..... | 23 |
| 2.2 Potencial Eólico..... | 24 |
| 2.2.1 Instrumentação e Técnicas de Medição..... | 27 |
| 2.2.2 Análise do Potencial Eólico..... | 32 |
| 2.3 Conversão Eólica..... | 34 |
| 2.4 Desempenho de Aero geradores | 36 |
| 2.5 Produção de Energia..... | 39 |
| 2.6 Turbinas Eólicas | 39 |
| 2.6.1 Tipos de Turbinas Eólicas..... | 43 |
| 2.6.2 Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal..... | 43 |
| 2.6.3 Turbinas Eólicas de Eixo Vertical..... | 45 |
| 3 METODOLOGIA..... | 50 |
| 3.1 Local de Aplicabilidade..... | 51 |
| 3.1.1 Procedimentos de Medição de Vento..... | 52 |
| 3.2 Conjunto Turbina Gerador..... | 55 |
| 3.3 Estrutura do Poste..... | 56 |
| 3.4 Aspectos Luminotécnicos | 59 |
| 3.5 Estudo Luminotécnico..... | 59 |

| | |
|--|----|
| 3.6 Conexão Elétrica..... | 61 |
| 3.6.1 Armazenamento em Banco de Baterias | 61 |
| 4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS..... | 63 |
| 4.1 Procedimento da Simulação | 63 |
| 4.1.1 Resultado da Simulação..... | 64 |
| 4.2 Energia Anual Gerada..... | 66 |
| 4.3 Viabilidade de Implantação do Projeto..... | 71 |
| 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 73 |
| REFERÊNCIAS | 75 |

1 INTRODUÇÃO

A energia desempenha um papel fundamental na vida humana, sendo a base indivisível sobre a qual se sustenta toda a ciência. Dada a importância crucial da energia, o estudo de suas formas de geração e os impactos associados é essencial para a sociedade moderna. Devido às crises ambientais, resultantes principalmente da dependência de fontes de energia não-renováveis, como carvão, petróleo e gás natural, surge a necessidade de transição para um sistema energético renovável. Neste contexto, a energia eólica se destaca como uma alternativa viável para reduzir o consumo de combustíveis fósseis, sendo uma fonte limpa e inesgotável.

A utilização da energia eólica como fonte alternativa de energia para geração de eletricidade é um exemplo crescente no mundo inteiro e vem se destacando por ser uma forma de energia limpa e renovável que não gera poluição e não agride o meio ambiente. Essa fonte de energia vem se desenvolvendo de forma intensiva em várias regiões desde o início de 1980, incentivado por uma política energética voltada para energia renovável e novas tecnologias (LOPEZ; 2012, p. 21).

Por isso, a tendência é de que, cada vez mais, essa fonte de energia ocupe um espaço maior na matriz elétrica mundial. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, os primeiros três meses de 2024, já demonstraram um grande avanço para matriz elétrica brasileira, onde, em destaque, entraram em operação comercial 25 novas usinas eólicas, crescimento relevante para o setor eólico.

O levantamento e a análise do potencial eólico são de extrema importância para que seja possível elaborar um projeto bem dimensionado. Tal importância torna este, o passo inicial do desenvolvimento de projetos eólicos, até mesmo para se dispor de uma pré-análise sobre a viabilidade econômica do empreendimento. Atualmente, com a difusão da energia eólica no mundo, encontram-se disponíveis mapas do potencial eólico de países, regiões e até mesmo de estados e cidades. Analisando estes, é possível identificar locais onde haja maior probabilidade de sucesso de um empreendimento eólico.

O estudo promove a utilização de energias renováveis, através de uma revisão bibliográfica focando especificamente na geração de energia eólica através de pequenos aerogeradores de eixo vertical com energia gerada armazenada em banco de baterias, envolvendo uma análise detalhada da viabilidade de instalação do projeto, e considerando fatores como, o potencial de geração de energia eólica na região, as tecnologias

disponíveis, os custos associados e os benefícios ambientais e econômicos. Além disso, uma análise específica dos dados relativos à velocidade média de vento na região, métodos de medição adequados às condições próprias, utilizando softwares de medição, obtendo assim, gráficos com dados diários, mensais e anuais da velocidade e potencial do vento. Assim como, a utilização do *software DIALux* para o estudo luminotécnico para o ambiente de instalação.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica para promover a utilização de fontes alternativas de energia, com um foco específico na geração de energia eólica através de aerogeradores de pequeno porte de eixo vertical, propostos para serem adequados a postes de iluminação na região dos Molhes da Barra, localizado na Praia do Cassino, cidade de Rio Grande - RS.

1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- A. Analisar a consistência e a intensidade dos ventos para determinar o aproveitamento e a eficácia dos aerogeradores de pequeno porte de eixo vertical;
- B. Avaliar as especificações técnicas necessárias para garantir o desempenho eficiente dos aerogeradores;
- C. Realizar simulação de iluminação para garantir o cumprimento dos procedimentos de iluminação pública da NBR 5101 (ABNT, 2012);
- D. Avaliação do sistema para geração de energia totalmente *off-grid*.

1.3 Justificativas

Diversos fatores demonstram a urgência e relevância da transição para fontes de energia renováveis. Em primeiro lugar, as alterações climáticas e a degradação ambiental agravam a crise ambiental contemporânea, cujas raízes se encontram principalmente na

utilização de combustíveis fósseis. Fontes de energia como, o carvão, o petróleo e o gás natural, não são apenas limitadas em quantidade, mas também têm efeitos devastadores no ambiente, incluindo emissões de gases com efeito de estufa, poluição do ar e da água e destruição de habitats naturais. Além disso, a dependência de fontes de energia não renováveis coloca em risco a segurança energética global.

Os recursos fósseis estão distribuídos de forma desigual em todo o mundo, o que pode levar a conflitos geopolíticos e à volatilidade dos preços da energia.

A transição para fontes renováveis, como a energia eólica, oferece uma solução para esses problemas, proporcionando uma fonte de energia mais segura, sustentável e economicamente viável.

A energia eólica, apresenta diversas vantagens pois trata-se de uma fonte de energia limpa, que não gera emissões de poluentes ou gases de efeito estufa durante sua operação. Além disso, tem avançado significativamente nas últimas décadas, tornando-se cada vez mais eficiente e econômica. A instalação de aerogeradores de pequeno porte, especialmente os de eixo vertical, pode ser adaptada para diferentes ambientes, incluindo áreas urbanas e costeiras, como a Praia do Cassino, destacada neste estudo.

A região deste estudo, os Molhes da Barra na Praia do Cassino, é conhecida por sua linda paisagem atrair muitos turistas, e sua extensão de quase dois quilômetros oferece condições ideais para a instalação de aerogeradores acoplados aos postes de iluminação, devido à falta de iluminação e aos seus ventos constantes. Além disso, a região apresenta uma oportunidade única para combinar a necessidade de iluminação pública com a geração de energia renovável, promovendo a sustentabilidade local e contribuindo para a modernização.

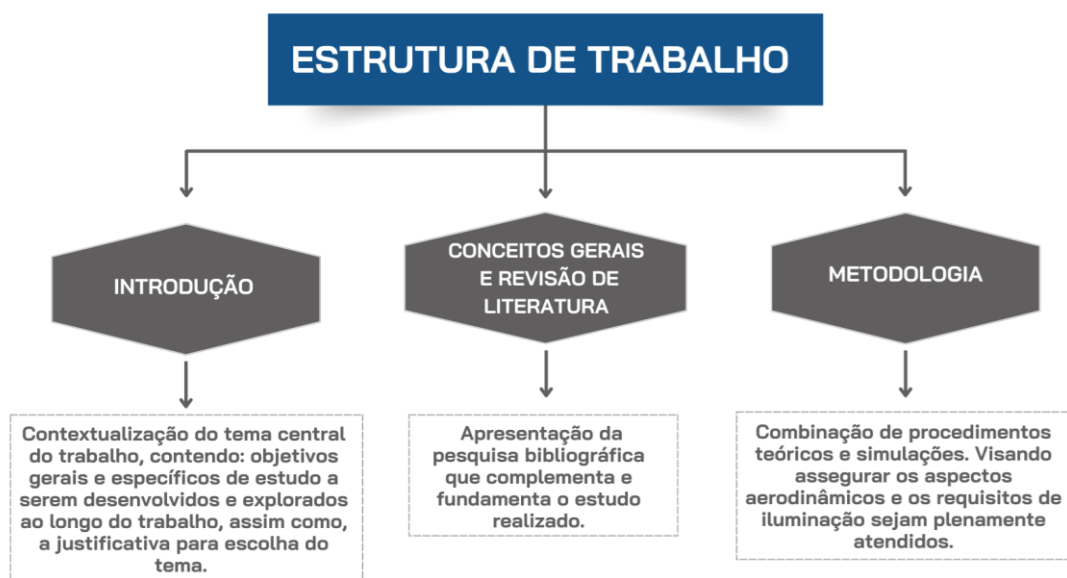
Dada a abundância do potencial eólico na região, o uso exclusivo de energia eólica já se torna uma solução viável e eficiente, sem a necessidade de complementar com sistemas de energia solar, por exemplo. Simplificando o sistema, reduzindo custos de instalação e manutenção, e ainda garantindo uma fonte contínua de energia limpa e renovável.

O foco em aerogeradores de pequeno porte de eixo vertical representa um passo significativo na diversificação das tecnologias de energia eólica, facilitando a integração em espaços urbanos e promovendo uma utilização mais descentralizada da energia eólica. O estudo pode não apenas atender às necessidades locais de energia, mas também servir como modelo para outras regiões do país e do mundo, incentivando políticas públicas voltadas para a sustentabilidade e a inovação tecnológica.

1.4 Estrutura de Trabalho

O presente trabalho foi estruturado em cinco capítulos, sendo eles: introdução, conceitos gerais e revisão da literatura, metodologia, apresentação da pesquisa e análise dos resultados, e considerações finais. O detalhamento de cada capítulo pode ser visto na Figura 1 abaixo.

Figura 1: Estrutura do presente trabalho.



Fonte: Elaborado pela Autora, 2024.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, é apresentada a pesquisa bibliográfica que complementa e fundamenta o estudo realizado. São destacados temas pertinentes à energia eólica, como o vento, as turbinas eólicas e suas especificações técnicas, análise e desempenho, e métodos de medição que representam o cenário eólico atual.

Utilizou-se, dados disponíveis de bibliografias, Atlas Eólico do Brasil de 2014, portais da ANEEL, *IRENA* e ABEEólica, publicações que, quando analisadas, têm em comum o fato de tratarem do setor eólico, dos países que mais utilizam desta fonte de energia e que possuem pesquisa mais avançada em relação à utilização de energia eólica e o desenvolvimento de novas tecnologias.

O presente capítulo divide-se em 12 subtópicos, abordando uma melhor descrição pretendida para o estudo.

2.1 Vento e Circulações Atmosféricas

O combustível do sistema de energia eólica é o vento, resultante do movimento do ar na atmosfera terrestre. O aquecimento provocado pela radiação solar incidente, somado ao movimento de rotação da Terra, origina os movimentos das massas de ar, formando assim, os ventos.

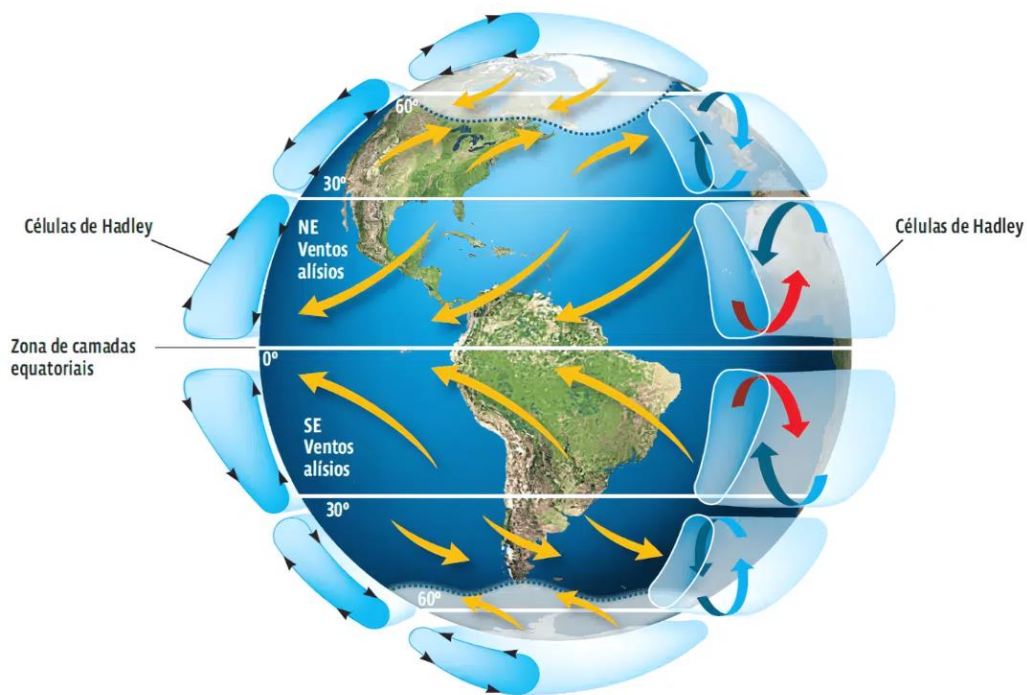
A aceleração aparente provocada pela rotação da Terra e que tende a desviar todo objeto, movendo-se livremente é conhecida como a força de Coriolis, esta força, afeta o movimento do vento, alterando sua direção. Sendo assim, o efeito desta força sobre o vento é fazer com que esse apresente movimentos tipicamente circulares, ou em espiras, em torno dos centros de pressão, que tendem a provocar deslocamentos de massa de ar entre o equador e os polos (Lopez, 2012).

As variações sazonais da velocidade e direção do vento são resultantes da inclinação de $23,45^\circ$ do eixo de rotação da Terra, ocasionando variações no aquecimento produzido pelo sol nas diferentes regiões do planeta (Pinho; 2008, p. 77).

O movimento de rotação da Terra igualmente influencia na formação dos ventos, provocando variações sazonais na sua intensidade e direção. De forma geral, os ventos

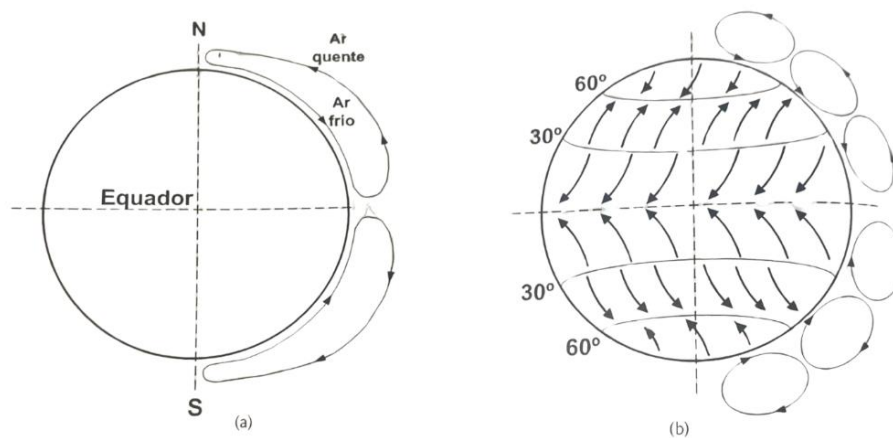
são classificados em gerais e locais. Sendo, os gerais, aqueles que sopram sobre a atmosfera, representados pelo modelo de circulação global, conforme ilustra a Figura 2 abaixo, e os locais próximo à superfície. Já os ventos locais, as mais importantes manifestações são verificadas em regiões de margens de grandes massas de água, como oceanos, grandes lagos e rios, e em regiões de relevo acidentado, como vales e montanhas.

Figura 2: Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar.



Fonte: Guia do Estudante, 2020.

Figura 3: Modelo de circulação global dos ventos na atmosfera terrestre.

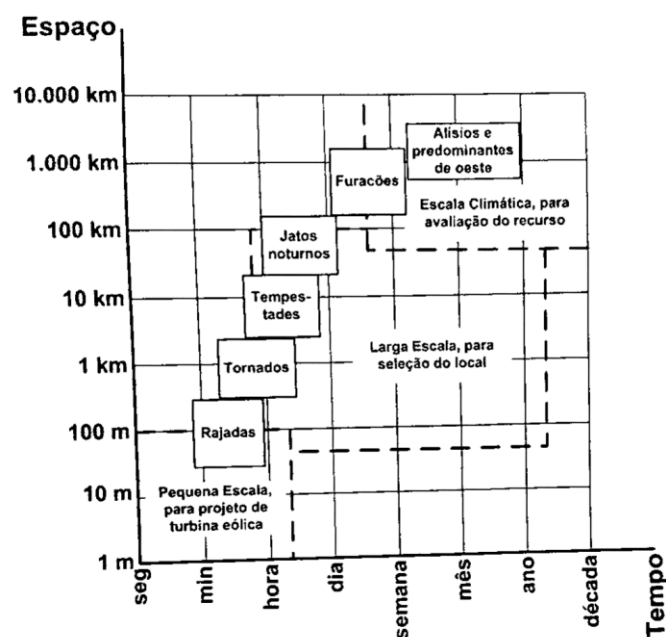


Fonte: Spera, 1994.

É de extrema importância, classificar também os ventos com relação às suas escalas de movimento, as quais podem ser, espaciais e temporais. Dentro desta classificação, podem ser conceituadas as seguintes escalas:

- Escala climática: abrange milhares de quilômetros e dura anos, sendo indicada para avaliação confiável do recurso eólico disponível;
- Larga escala: cobre dezenas de quilômetros e dura de dias a meses, ideal para verificar alterações sazonais na velocidade e direção do vento, auxiliando na seleção de locais para instalação de aerogeradores;
- Pequena escala: envolve dezenas de metros e dura de segundos a minutos, útil para verificar variações de pequena escala, como rajadas e turbulências, importantes para o funcionamento dos aerogeradores.

Figura 4: Escalas espacial e temporal de movimento dos ventos.



Fonte: Spera, 1994.

2.1.2 Perfil do Vento e Influência no Terreno

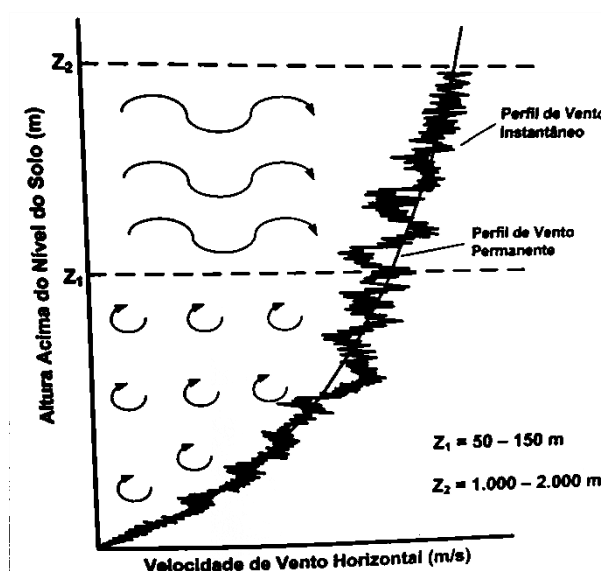
É de suma importância o conhecimento para estimar os recursos do vento em um local específico, a energia contida no vento deve ser a base para qualquer projeto de energia eólica.

Na superfície do solo, a velocidade do vento é nula, isso devido ao atrito existente entre o solo e o ar.

Quanto mais próximo ao solo, a velocidade aumenta mais rapidamente, sendo este aumento mais lento à medida em que a altura também aumenta. A variação se torna pouco significativa a uma altura aproximada de 150 m, e nula a aproximadamente 2 km sobre o solo (Walker; Jenkins, 1997).

O fenômeno da variação da velocidade do vento com altura é intitulado de perfil vertical do vento, a Figura 5 abaixo representa um gráfico dos perfis verticais de vento, permanente (médio) e instantâneo, com destaque para as regiões de maiores e menores variações do vento com a altura.

Figura 5: Perfil vertical de vento.



Fonte: Spera, 1994.

As variações ocorrem também na horizontal, porém costumam ser menos significativas, exceto em alguns locais com terrenos muito acidentados, onde a influência dos obstáculos é considerável.

2.2 Potencial Eólico

O aproveitamento da energia eólica requer extensões de área adequada, com velocidades médias anuais de vento que viabilizem a instalação do projeto. O levantamento e a análise do potencial eólico são pontos importantes para garantir a elaboração de um projeto bem dimensionado. Tal importância torna este o passo inicial do desenvolvimento de projetos de sistemas eólicos, até mesmo para se dispor de uma pré-análise sobre a viabilidade econômica do empreendimento.

Inicialmente, são necessárias a identificação e avaliação preliminares das potenciais áreas para viabilidade de instalação do sistema, para isso, se faz o uso normalmente de mapas eólicos e topográficos, dados meteorológicos de caráter geral, quando disponíveis, além das observações visuais, porém, esses procedimentos apenas fornecem indicativos sobre o potencial eólico disponível em determinado local ou região, sendo necessárias avaliações mais criteriosas, como as medições de campo durante um considerável espaço de tempo, normalmente o mínimo de três anos de medição, a fim de garantir a existência do potencial e justifique o investimento na instalação do sistema.

Atualmente, com a grande difusão da energia eólica no mundo, é possível encontrar mapas eólicos disponíveis, sendo esses, de países, regiões e até mesmo de estados e cidades. O exemplo mais conhecido hoje é o atlas eólico brasileiro, disponível para consulta e fornece indicativos preliminares sobre o potencial eólico de todo território nacional. Com a análise desses mapas, identificam-se locais onde haja maior probabilidade de sucesso de um empreendimento eólico.

Os modelos de micro-localização mais difundidos baseiam-se nas leis físicas que regem o fluxo do vento. Um exemplo da abordagem física é a metodologia do 'atlas eólico'. A metodologia do atlas eólico tem sido utilizada para avaliação de recursos eólicos e localização em todo o mundo, e modelos atuais de última geração são capazes de prever o recurso eólico com boa precisão em muitas áreas (Redlinger; Andersen; Morthorst, 2002, p. 13).

A avaliação da viabilidade técnica e econômica de empreendimentos eólicos requer uma predição confiável da energia gerada no projeto, e para isso, a determinação do recurso eólico requer, usualmente, uma rede anemométrica qualificada, contendo, equipamentos com alta confiabilidade, durabilidade e adequadamente dispostos em torres de medições, com anemômetros previamente calibrados em túnel de vento e um sistema eficiente de coleta de dados e verificações de falhas. De acordo com (Lopez, 2012) o recomendado é que as medições anemométricas sejam mantidas por todo o período de operação da usina, possibilitando um acompanhamento contínuo do desempenho das turbinas e melhorando as estimativas de longo prazo.

Uma maneira visual de se obter uma análise preliminar da potencialidade eólica de um determinado local é utilizando a escala de Beaufort, como representada na Tabela 1, que relaciona classes de vento a indicadores observados na terra.

Tabela 1: Escala de *Beaufort*.

| Número da Força de Beaufort | Velocidade do Vento | | Denominação | Indicadores em terra |
|-----------------------------|---------------------|-----------|-------------------|---|
| | m/s | km/h | | |
| 0 | < 1 | < 2 | Calmo | Fumaça sobe verticalmente. |
| 1 | 1 – 2 | 2 – 5 | Ar Leve | Fumaça deriva levemente na direção do vento. |
| 2 | 2 – 3 | 6 - 11 | Brisa Leve | Folhas farfalham. |
| 3 | 4 – 5 | 12 – 18 | Brisa Calma | Folhas movimentam-se. |
| 4 | 6 – 8 | 19 – 30 | Brisa Moderada | Movimento de pequenos galhos de árvores. |
| 5 | 9 – 11 | 31 – 39 | Brisa Fresca | Pequenas árvores balançam. |
| 6 | 11 – 14 | 40 – 50 | Brisa Forte | Grandes galhos balançam. |
| 7 | 14 – 17 | 51 – 61 | Corrente Fraca | Árvores inteiras movem-se. |
| 8 | 17 – 21 | 62 – 74 | Corrente | Gravetos e pequenos galhos são arrancados das árvores. |
| 9 | 21 – 24 | 75 – 87 | Corrente Forte | Grandes galhos são arrancados das arvores; leves danos estruturais. |
| 10 | 25 – 28 | 88 – 102 | Vendaval | Árvores quebram; pequenos danos estruturais. |
| 11 | 29 – 32 | 103 – 117 | Vendaval Violento | Danos generalizados. |
| 12 | > 33 | ≥ 118 | Força de Furacão | Movimento violento de árvores e muita destruição. |

Fonte: Adaptada pela Autora, 2024.

Caso às análises preliminares sejam positivas, deve-se passar para a segunda etapa, de levantamento do potencial eólico, a etapa de medição.

2.2.1 Instrumentação e Técnicas de Medição

Uma providência essencial no processo de medição do potencial eólico é a aquisição adequada dos equipamentos que compõem o sistema, incluindo sensores, registradores de dados e a torre para instalação dos instrumentos.

Os principais elementos que compõem um sistema de medição de potencialidade eólica são:

- Medidores de velocidade dos ventos – Anemômetros;
- Sensores de direção de vento – *Windvane*;
- Sensor de temperatura, pressão e umidade;
- Registradores de dados – *Datalogger*;
- Torre de instalação dos equipamentos – Torre de Medição Anemométrica.

Anemômetros são equipamentos que medem a velocidade do vento, e é essencial para o cálculo das previsões de energia, sendo o de copos o tipo padrão de sensor (Pinto, 2019).

O anemômetro é o principal equipamento do sistema de monitoração, responsável pela medição do parâmetro mais importante a ser considerado em projetos eólicos, a velocidade do vento. Pode ser classificado em dois tipos: rotacionais e não-rotacionais. Os rotacionais mais utilizados, são os anemômetros de conchas (ou de copos) e os anemômetros de hélices, conforme ilustrado nas Figuras 6: a) e b) respectivamente. Já os não-rotacionais, mesmo sendo utilizados em menor escala na indústria eólica, possuem uma variedade maior de tipos, cada um operando com um princípio básico diferente e sem apresentar partes móveis (Pinho, 2008).

Figura 6: a) Anemômetro de Conchas. b) Anemômetro de Hélices.



Fonte: S&E Instrumentos.

Anemômetros do tipo rotacionais tem a característica da sua boa faixa de exatidão e seus custos menos elevados, o que não significa que sejam menos eficientes. Anemômetros rotacionais modernos podem produzir sinais elétricos que permitem a determinação da velocidade de vento em qualquer instante. Em contrapartida, como uma desvantagem, esses anemômetros apresentam respostas mais lentas a variações na velocidade do vento, quando comparados com alguns sensores não-rotacionais (Nelson, 1996).

Para medições de direção de vento, utilizam-se anemoscópios, normalmente chamados de *windvane* ou simplesmente, sensores de direção, conforme apresentado pela Figura 7. Por sua precisão não ser tão crítica quanto a dos sensores de velocidade, diversos modelos podem ser utilizados, de diferentes pesos, tamanhos e preços (Pinho, 2008). Podem estar dispostos isoladamente ou integrados ao suporte do anemômetro. As medições de direção do vento são importantes, pois frequentes mudanças na direção podem indicar a presença de constantes rajadas de vento. De acordo com (Nelson, 1996) a situação ideal seria a verificação de uma única direção predominante durante 80% do tempo ou mais.

Figura 7: Sensor de direção disposto isoladamente.



Fonte: S&E Instrumentos.

Pressão atmosférica e temperatura, apesar de menos influentes, quando comparados a velocidade e a direção do vento, também são grandezas importantes para a determinação precisa do potencial eólico, pois a densidade do ar é influenciada por esses parâmetros. Os sensores de umidade muitas vezes são integrados aos de temperatura, com custos baixos.

De acordo com (Pinto, 2019), esses sensores devem ser instalados o mais próximo possível do topo da estação, sem interferir na medição do vento, sendo necessário, ainda, o uso de um escudo de proteção contra a radiação solar e a chuva, a fim de que as variáveis temperatura do ar e umidade relativa do ar não sejam comprometidos.

Figura 8: Sensor de temperatura.



Fonte: S&E Instrumentos.

Os dados medidos através destes sensores apresentados anteriormente, devem ser armazenados da melhor forma, para que seja possível realizar as coletas de dados e seu tratamento do melhor modo possível. Para isso, são utilizados registradores ou unidades de aquisição de dados, conhecido por *datalogger*.

Em função da especificidade da aplicação, a medição de vento para o setor eólico é comumente feita por meio de torres anemométricas TMAs, sendo esta definida como uma torre metálica, com estrutura tubular ou treliçada, de perfil triangular ou quadrado, estaiada ou autoportante, instrumentada com os sensores de medição, com sistemas de alimentação de energia, de aquisição de dados, de proteção contra descargas atmosféricas e de transmissão de dados (Pinto, 2019).

As torres de medições anemométricas (TMAs) são responsáveis pelo levantamento da potencialidade eólica, são normalmente treliçadas ou tubulares, autoportantes ou sustentadas por cabos de aço, conhecidas como estaiadas (Pinho, 2008).

A etapa de medição da potencialidade eólica para geração de energia requer bastante precisão. Pequenas imprecisões na coleta de dados de medição podem levar a sérias incertezas no desempenho final do sistema, com conseqüente riscos de inviabilidade econômica do empreendimento eólico. Alguns dos fatores que afetam a precisão da medição, podem ser, as instalações da torre e dos sensores, frequência, e taxa de coleta dos dados, tipos de equipamentos utilizados na medição, e histórico de calibração e manutenção dos equipamentos.

Figura 9: Torres de Medições Anemométrica (TMAs).

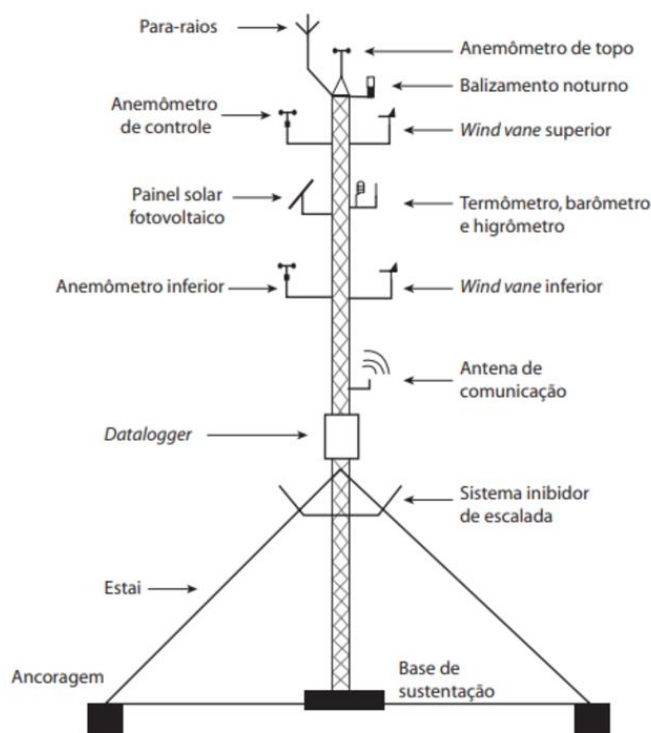


Fonte: RENOAIR.

Para a instalação das TMAs, deve ser totalmente em posição vertical, preferindo-se locais abertos e com a menor quantidade de obstáculos possível em sua proximidade. As obstruções podem provocar turbulências e rápidas variações na velocidade e na direção do vento (RENOAIR, 2020).

Na Figura 10 abaixo, é possível visualizar onde cada equipamento é acoplado em uma TMA. De acordo com (EPE, 2015), as TMAs geralmente têm uma altura que varia entre 80 e 150 metros.

Figura 10: Equipamentos que compõem as TMAs.



Fonte: EPE.

2.2.2 Análise do Potencial Eólico

Para o processo de determinação da potencialidade eólica, é de suma importância a utilização de uma modelagem precisa para a análise de dados medidos, como velocidade média, direção do vento, variações de alta frequência e em pequena escala, turbulência e rajadas de ventos, variações diárias, sazonais e interanuais. Esses parâmetros são particulares para cada local, e preferencialmente, devem ser obtidos através de medições no próprio local, durante um período considerável.

De acordo com (Rohatgi; Nelson, 1994), as medições devem ser realizadas por um período de pelo menos 5 anos, para se determinar valores confiáveis de velocidade de vento. Já para (Hickok, 1975), um período mínimo de 1 ano, se possível mais longo.

Atualmente, é utilizada a medição durante o período mínimo de 3 anos (Pinto, 2019) e (Vian, 2021).

A velocidade de vento utilizada em projetos eólicos para geração de eletricidade é resultante do cálculo de uma velocidade média dentro do intervalo de tempo

considerado a partir dos dados originalmente medidos, valores médios podem ser obtidos para um determinado período, conforme a Equação 1 abaixo (Pinho, 2008).

$$V_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \quad (1)$$

Onde V_m , é média dos N valores de velocidade medidos.

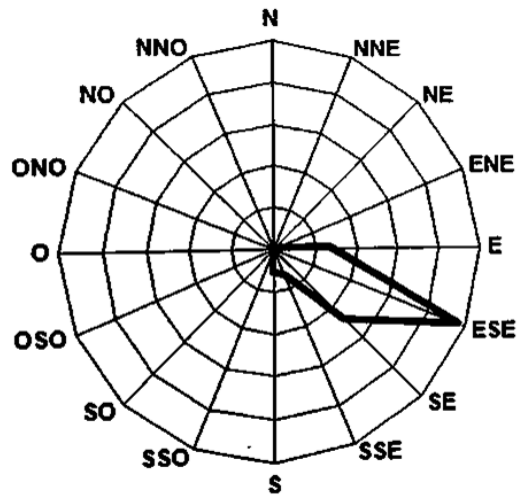
Como uma das principais manifestações de variabilidade dos ventos se apresenta sob forma sazonal, médias diárias e mensais são apropriadas para a elaboração de projetos confiáveis, as diárias para se observar os períodos do dia e as mensais para se verificar os meses do ano para onde haverá maior ou menor disponibilidade de energia.

De acordo com (Pinho, 2008) a maneira mais visual de analisar graficamente os dados estatísticos de vento é através de valores médios da velocidade do vento. Reunindo dados médios, e utilizando a Equação 1, podem ser obtidos gráficos diários, mensais e anuais representativos das velocidades médias registradas em um determinado período.

São realizadas também, medições de direção do vento, para se conhecer a direção predominante dos ventos em uma determinada localidade. Este, é um parâmetro importante, principalmente na etapa do projeto, pois quanto maior a porcentagem de tempo que o vento ocorrer em uma direção predominante, maior será a eficiência do processo de conversão de energia pelo aerogerador. Para se representar graficamente esse parâmetro usa-se a rosa dos ventos, um gráfico bidimensional que apresenta a distribuição da direção dos ventos.

A Figura 11 abaixo mostra um exemplo gráfico de uma rosa dos ventos com o a direção predominante este-sudeste (ESE).

Figura 11: Exemplo gráfico de uma rosa dos ventos.



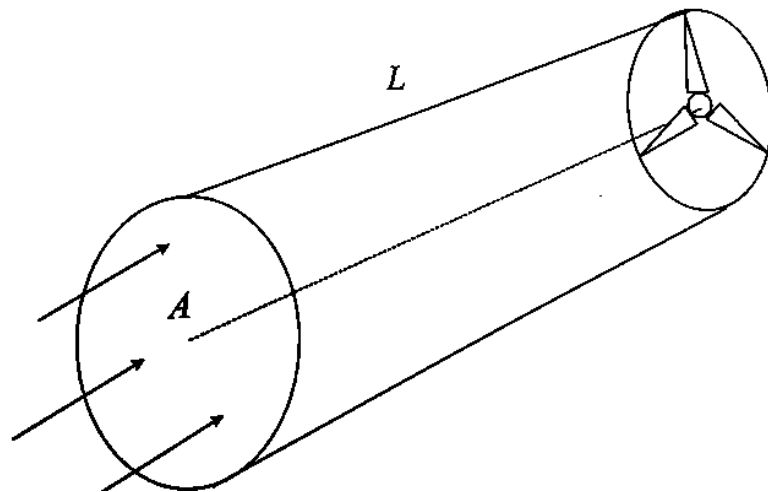
Fonte: (Pinho, 2008).

2.3 Conversão Eólica

A característica principal do vento a ser analisada quando se visa o aproveitamento eólico para geração de energia elétrica é a velocidade. A potência contida no vento é proporcional ao cubo da sua velocidade, o que torna evidente a importância deste fator em projetos de sistemas eólicos (Pinho, 2008).

Na Figura 12 abaixo, contendo um fluxo de vento, de velocidade v , através de um cilindro de área de seção transversal A e comprimento L (Lopez, 2012), uma massa m , movendo-se, possui energia cinética (E_c) dada pela Equação 2.

Figura 12: Fluxo de vento através de um cilindro.



Fonte: (Pinho, 2008).

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2)$$

Da Equação 2 para energia cinética no ar fluindo, segue-se a potência contida no vento passando por uma área A com a velocidade do vento v (Stiebler, 2008):

$$P_w = \frac{\rho}{2} A v^3 \quad (3)$$

Onde ρ é a massa específica do ar que depende da pressão e da umidade do ar, para cálculos práticos, assume-se $\rho \approx 1,2 \text{ kg/m}^3$. O ar flui em direção axial através da turbina eólica, A potência mecânica útil obtida é expressa por meio do coeficiente de potência C_p (Stiebler, 2008):

$$P = C_p \frac{\rho}{2} A v^3 \quad (4)$$

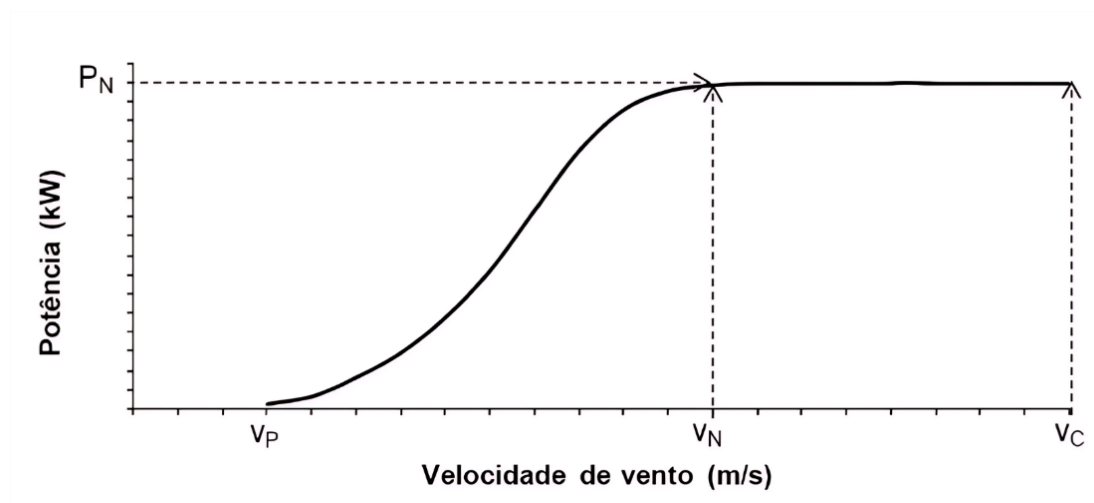
2.4 Desempenho de Aeroeradores

O desempenho dos aeroeradores é influenciado por diversos fatores. Porém, existem três parâmetros destaques relacionados a cálculos desenvolvidos para se estimar o desempenho de um sistema eólico, sendo esses, velocidade do vento, diâmetro do rotor e coeficiente de potência do aeroerador (Pinho, 2008).

Conforme a Equação 4, a potência gerada por um aeroerador depende do cubo da velocidade do vento, fazendo deste o parâmetro mais significativo no processo de conversão da energia cinética do vento em energia mecânica de rotação. Os valores de velocidade de vento aproveitáveis por um rotor eólico dependem da altura de instalação do aeroerador, das condições meteorológicas e da topografia do local de instalação (Stiebler, 2008).

São considerados, normalmente, quatro parâmetros de importância referentes a velocidades de vento para conversão de energia eólica em velocidade. Analisando a curva de potência ideal de um aeroerador, ilustrada na Figura 13 abaixo, e dos conceitos a seguir, pode-se compreender esses parâmetros.

Figura 13: Curva de potência ideal de um aeroerador.



(Pinho, 2008).

Onde:

- V_p : é a velocidade de partida (cut-in) – velocidade de vento mínima para que o rotor saia de seu estado de repouso inicial, iniciando o movimento das pás e conseqüentemente, gerando energia;
- V_N : é a velocidade nominal – velocidade de vento na qual a potência nominal (P_N) do aerogerador é extraída;
- V_C : é a velocidade de corte (cut-out) – valor de velocidade de vento na qual a regulação atua para interromper o movimento do rotor, protegendo o mesmo contra cargas excessivamente altas e danos estruturais.

A razão de velocidade de ponta de pá, TSR, do inglês *tip speed ratio*, é a relação entre a velocidade da ponta da pá (u) e a velocidade do vento não perturbada (V_0), dada pela Equação 5 abaixo (Stiebler, 2008).

$$TSR = \frac{u}{V} = \frac{\omega R}{V_0} \quad (5)$$

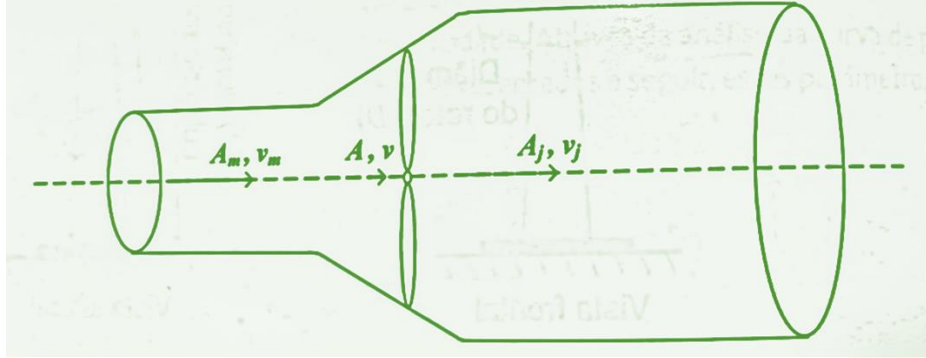
O coeficiente de potência (C_p), pode ser representado pela Equação 6 abaixo, apenas invertendo a Equação 4.

$$C_p = \frac{2P}{\rho AV^3} \quad (6)$$

O principal parâmetro de desempenho utilizado para avaliar a eficiência de um aerogerador é o coeficiente de potência. Este, relaciona a energia disponível no vento que passa pela área do rotor da turbina com a potência aerodinâmica extraída pela própria turbina. O valor teórico máximo deste coeficiente é de aproximadamente 0,59, conforme deduções baseadas em princípios da mecânica dos fluidos. Quanto mais próximo um aerogerador se aproximar deste limite, maior será sua eficiência (Custódio, 2013). Analisando a Figura 14 abaixo, com a sendo a razão entre as velocidades de vento a jusante (V_j) e a montante (V_m) do rotor eólico, o valor máximo de C_p é obtido quando (Pinho, 2008):

$$\frac{dC_p}{da} = 4(1-a)(1-3a) = 0 \quad (7)$$

Figura 14: Fluxo de vento ideal através de um rotor eólico.



Fonte: (Pinho, 2008).

E com isso, resulta em $a = \frac{1}{3}$, e $C_{p\text{máx}} = \frac{16}{27} \cong 0,593$. Este valor é conhecido como limite de Betz e é o máximo valor teórico da potência contida no vento que pode ser aproveitada por uma turbina eólica. De acordo com (Pinho, 2008), este limite não é devido a questões de projeto ou desenvolvimento, mas sim ao fato de a necessidade de conservar uma velocidade que possibilite seu fluxo através do rotor eólico. Na prática, os valores de C_p são ainda menores, quando introduzidas as perdas aerodinâmicas.

Outro aspecto técnico importante no funcionamento de uma turbina eólica, visto na Equação 5, é a razão de velocidade de ponta de pá, conhecida por TSR, e frequentemente representada pela letra grega λ . Este parâmetro adimensional é uma medida da velocidade da ponta da pá da turbina, em relação à velocidade do vento incidente. A velocidade da ponta da pá, por sua vez, depende da velocidade de rotação de projeto, e do diâmetro da turbina. Este parâmetro é fundamental para que seja definido o tipo de turbina a ser instalado em uma determinada localidade, de acordo com as velocidades médias do vento naquele local.

2.5 Produção de Energia

A produção de energia de um aerogerador é o fator econômico mais significativo. Incertezas na determinação da velocidade do vento e da curva de potência do aerogerador contribuem para erros na previsão da energia gerada e levam a um risco financeiro mais elevado (Custódio, 2013).

A estimativa da produção de energia é realizada em base anual, pois essa depende do comportamento do vento, que apresenta variações sazonais ao longo do ano. A produção anual de eletricidade é denominada de energia anual gerada (EAG) (Custódio, 2013).

Ainda, de acordo com (Custódio, 2013), inicialmente deve-se determinar a frequência de distribuição da velocidade do vento. Após, faz-se necessário dispor da curva de potência do aerogerador. A determinação da EAG é feita pelo cruzamento da estatística da velocidade do vento com a curva de potência do aerogerador.

Portanto, considerando-se que um ano contém 8.760 horas, a EAG de um aerogerador em kWh pode ser dada pela seguinte Equação 8 (Custódio, 2013):

$$EAG = \sum[f(v) \cdot P(v)] * 8760 \quad (8)$$

Onde:

- v: velocidade do vento [m/s];
- f(v): frequência de ocorrência da velocidade do vento v [%];
- P(v): potência produzida pelo aerogerador na velocidade do vento v [kW].

2.6 Turbinas Eólicas

A primeira turbina eólica operada automaticamente para geração de energia elétrica foi construída por Charles Brush em 1888. A capacidade do ferrador era de 12 kW e funcionou por 20 anos, carregando um sistema de baterias. A desproporção entre o tamanho da turbina e a capacidade do gerador resultava do tipo de sistema com elevado número de pás, proporcionando baixa velocidade (Lopez, 2012).

Poul la Cour foi um dos pioneiros da aerodinâmica moderna, onde construiu seu próprio túnel de vento para experimentos, e descobriu que, com menos pás, mais rápidas e mais eficientes, seriam as turbinas.

Figura 15: Turbina eólica de Poul la Cour.

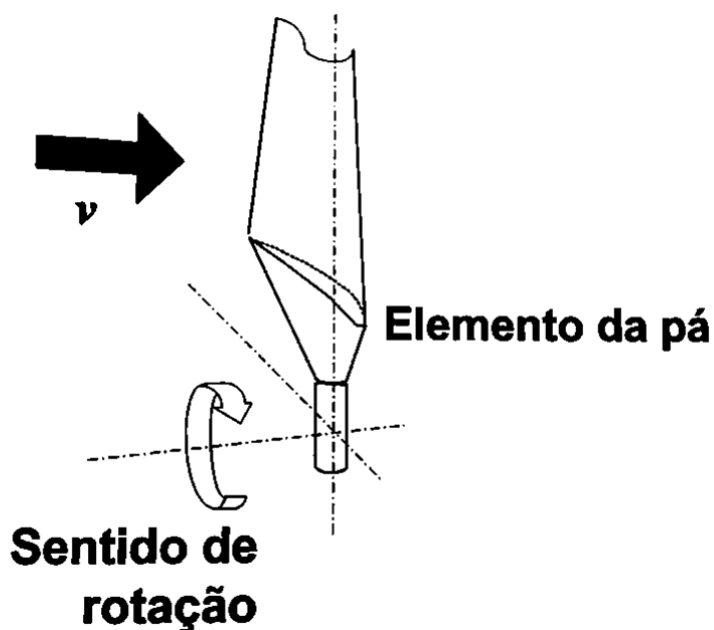


Fonte: Fapesp.

A turbina eólica, ou aerogerador, é o componente do sistema eólico responsável pelo aproveitamento da energia cinética dos ventos, transformando-a inicialmente em energia mecânica de rotação e, em seguida, em energia elétrica necessária à alimentação de diversas cargas, ou para ser transportada à rede elétrica. Para desempenhar eficientemente essas funções, o aerogerador é constituído de diversos componentes e subsistemas, com características particulares dependentes da aplicação (Pinho, 2008).

A compreensão de como os ventos atuam sobre as pás de uma turbina eólica de eixo horizontal ocorre quando o fluxo de ar passa pelo aerofólio, onde há o surgimento de forças distribuídas sobre a sua superfície.

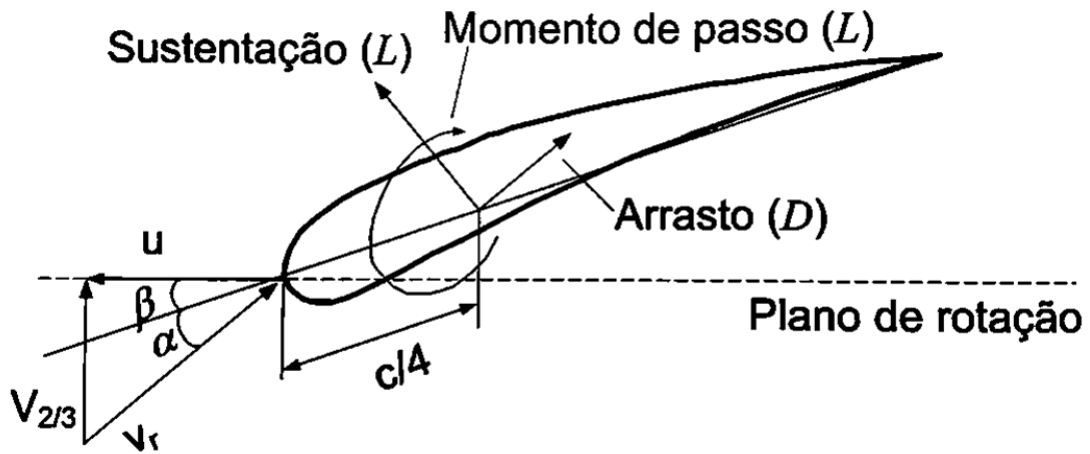
Figura 16: Elemento da pá de um rotor de eixo horizontal.



Fonte: (Pinho, 2008).

A velocidade do fluxo aumenta sob a superfície convexa do aerofólio, resultando em menores pressões, se comparadas com as pressões do lado côncavo, além disso, também surgem atritos viscosos entre o ar e a superfície do aerofólio, causando uma redução na velocidade de vento em regiões próximas à superfície do aerofólio. A resultante dessas forças é usualmente representada por duas forças e um momento, que agem no aerofólio a uma distância de $c/4$ da borda de ataque (Manwell, 2002). Essas, são as forças de sustentação (L , *lift*), e de arrasto (D , *drag*), e o momento é conhecido como momento de passo (M) ou, da literatura inglesa, *pitching moment*. Por fim, o ângulo formado entre o plano de rotação e a linha de corda é conhecido como ângulo de passo (β). A Figura 17 abaixo ilustra os conceitos (Pinho, 2008).

Figura 17: Teoria do aerofólio.



Fonte: (Paiva, 2016).

A força de sustentação é uma força perpendicular à direção da velocidade relativa do vento, consequência da distribuição desigual de pressão entre as superfícies superior e inferior do aerofólio. A força de arrasto é paralela à direção da velocidade relativa, e é dependente das forças de atrito viscoso na superfície do aerofólio e das pressões desiguais em ambas as extremidades do aerofólio, voltadas a favor e contra a direção do vento. O momento de passo age sobre um eixo perpendicular à seção transversal do aerofólio (Walker; Jenkins, 1997).

A Tabela 2 abaixo ilustra classificações típicas de turbinas eólicas de acordo com sua aplicação.

Tabela 2: Aplicação das turbinas eólicas.

| Pequeno (≤ 10 kW) | Intermediário (10 – 500 kW) | Grande (500 kW – 5 MW) |
|---|-----------------------------|--|
| Casas (conectadas à rede) | Potência aldeia | Usinas eólicas |
| Fazendas | Sistemas híbridos | Energia distribuída |
| Aplicações remotas autônomas (ex. carregamento de bateria, bombeamento de água, sites de telecomunicações) | Energia distribuída | Geração eólica <i>onshore</i> e <i>offshore</i> |

Fonte: (Elliot, 2002).

2.6.1 Tipos de Turbinas Eólicas

Atualmente existem diversos tipos de turbinas eólicas que já são utilizadas em diferentes aplicações e funcionam em variadas regiões. Quanto à capacidade de geração de potência, conforme a tabela 2, as turbinas eólicas são classificadas em pequeno (até 10 kW), médio (entre 10 kW e 500 kW) e grande porte (acima de 500 MW). Os dois tipos básicos de turbinas eólicas são as de eixo vertical (TEEV), conhecidas como Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) em inglês, e as de eixo horizontal (TEEH), conhecidas como Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT). Essas turbinas diferem em relação ao custo de produção, e a velocidade do vento na qual atingem sua maior eficiência (Lopez, 2012).

2.6.2 Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal

As turbinas eólicas ou aerogeradores de eixo horizontal são atualmente mais utilizados para geração de energia elétrica. Isso ocorre, principalmente em função do maior rendimento das turbinas de grande porte.

Possuem seu eixo de rotação situado à direção do vento, sendo os modelos mais comuns aqueles constituídos por três pás (Pinho, 2008).

A Figura 17 abaixo ilustra um dos primeiros parques eólicos localizado na Alemanha.

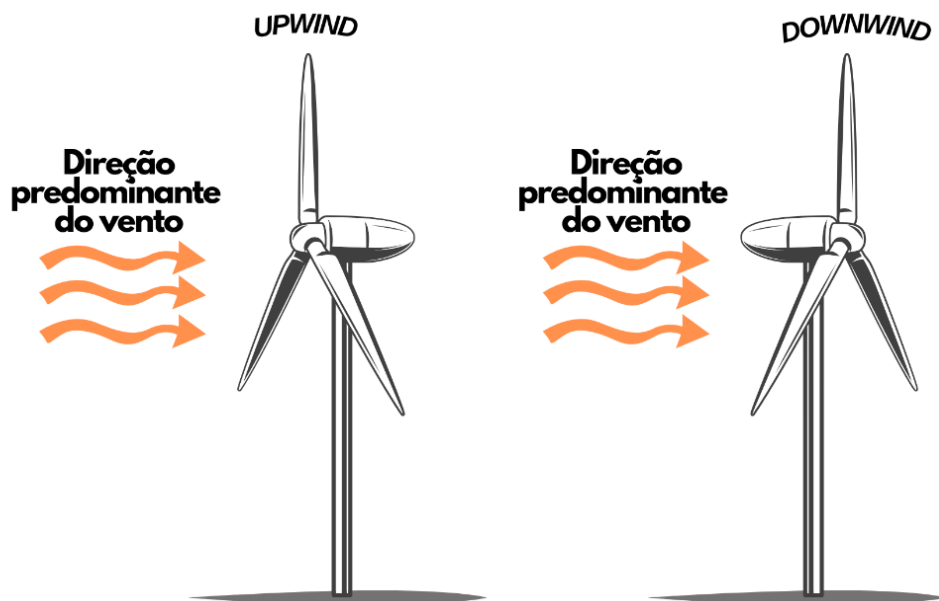
Figura 18: Parque eólico localizado na Alemanha.



Fonte: *Wind Energy Germany*.

Um critério importante para classificação dos aerogeradores, é a orientação de seu rotor com relação ao vento. Existem dois tipos: aqueles que possuem seu rotor a montante da torre (*upwind*) e aqueles cujo rotor se encontra a jusante da torre (*downwind*), conforme ilustrado na Figura 19. Rotores do tipo *downwind* apresentam como vantagem o fato de não necessitarem de mecanismos de orientação ao vento, porém a própria torre se torna um obstáculo ao fluxo de vento, o que ocasiona, eventualmente, mais perdas. Por conta desta desvantagem, os rotores *downwind* são menos utilizados que os *upwind*, pois estes, apesar de necessitarem de dispositivos de orientação, acabam sendo mais eficientes (Pinho, 2008).

Figura 19: Tipos de rotores com relação a sua orientação: *upwind* e *downwind*.



Fonte: (Autora, 2024).

2.6.3 Turbinas Eólicas de Eixo Vertical

As turbinas de eixo vertical possuem seu eixo de rotação situado perpendicularmente à direção do vento, sendo um gerador de energia em que o eixo do rotor principal é fixado verticalmente, enquanto o gerador e outros componentes que produzem eletricidade, estão localizados na base. Esse tipo de turbina é utilizado para locais de pequeno porte, como em residências (Lopez, 2012).

Na década de 1980, surgiu a máquina *Darrieus*, turbina eólica considerada revolucionária de eixo vertical, utilizava flaps (abas) para controlar a potência e o sistema de transmissão hidráulico. Na Figura abaixo, é possível observar o modelo da turbina utilizado atualmente.

Figura 20: a) Turbina Eólica *Darrieus* em Central Wahington. b) Vista lateral da turbina.



Fonte: elprocus, 2019.

O rotor *Darrieus* é um sistema baseado em elevação (sustentação), onde cada pá recebe o conjugado máximo apenas duas vezes por revolução. Consequentemente, a potência de saída é elevada de forma senoidal. Um dos principais desafios do sistema é a necessidade de montá-lo sobre torres e utilizar estaiamento para manter a turbina ereta, o que resulta na aplicação de forças sobre os rolamentos da turbina. Os modelos de eixo vertical são projetados visando a um bom rendimento sob turbulências do vento em áreas urbanas, e podem utilizar a característica aerodinâmica de arraste ou elevação (Lopez, 2012).

Vantagens das TEEV baseada em elevação:

- Ótima eficiência;
- Direção do vento não altera o rendimento;
- Menor sensibilidade a turbulências;
- Produz muito pouca vibração.

Vantagens das TEEV baseada em arraste:

- Operação comprovada;
- Pouco ruído;
- Confiável e robusta;
- Direção do vento não afeta o rendimento;
- Pode se beneficiar de fluxos de turbulência;

- Produz pouca vibração.

Um projeto que alia as duas características aerodinâmicas é o modelo *Venturi*, ilustrado na Figura 21 abaixo.

Figura 21: Turbina eólica modelo *Venturi*.



Fonte: (Paulides, 2009).

Um exemplo que utiliza a força de arraste é o modelo *Savonius*, nessa turbina predomina a força de arrasto, ou seja, as turbinas giram predominantemente pela pressão do ar sobre as pás. Sua funcionalidade se dá a partir do vento impulsionando semicírculos forçando o rotor girar. Nesse tipo de turbina a velocidade das pás não pode ser maior que a do vento, o que limita a sua eficiência.

Figura 22: a) Turbina Eólica *Savonius*. b) Turbina Eólica *Savonius*, contendo anemômetro.



Fonte: Oak Energia.

A turbina *Darrieus* ainda pode ser constituída de pás retas (*Giromill*, *Darrieus-H*), helicoidais ou curvas (*Troposkein*), podendo ter duas ou mais pás dependendo da aplicação. A turbina *Darrieus-H* é uma tecnologia moderna e um dos conversores de energia eólica mais promissores para locais onde há variações rápidas na direção do vento.

Figura 23: Turbina eólica modelo *Darrieus-H*.



Fonte: (Paulides, 2009).

A turbina eólica helicoidal é mais um exemplo de modelo de eixo vertical, foi construída com o objetivo de cobrir o fornecimento de energia elétrica para uma residência com consumo médio de aproximadamente 1.500 kW/h por ano. Com sua configuração comum, a turbina eólica helicoidal é composta por três pás fixadas a um eixo de rotor vertical. Assim como o modelo *Darrieus-H*, podem ser instaladas com segurança em um poste ou telhado, e por isso são os sistemas de energia com melhor custo-benefício para uso fixo, residencial, comercial, público e móvel (Windmills, 2022).

Figura 24: Exemplos de turbinas eólicas modelo *Helical*.



Fonte: *WindCycle*.

3 METODOLOGIA

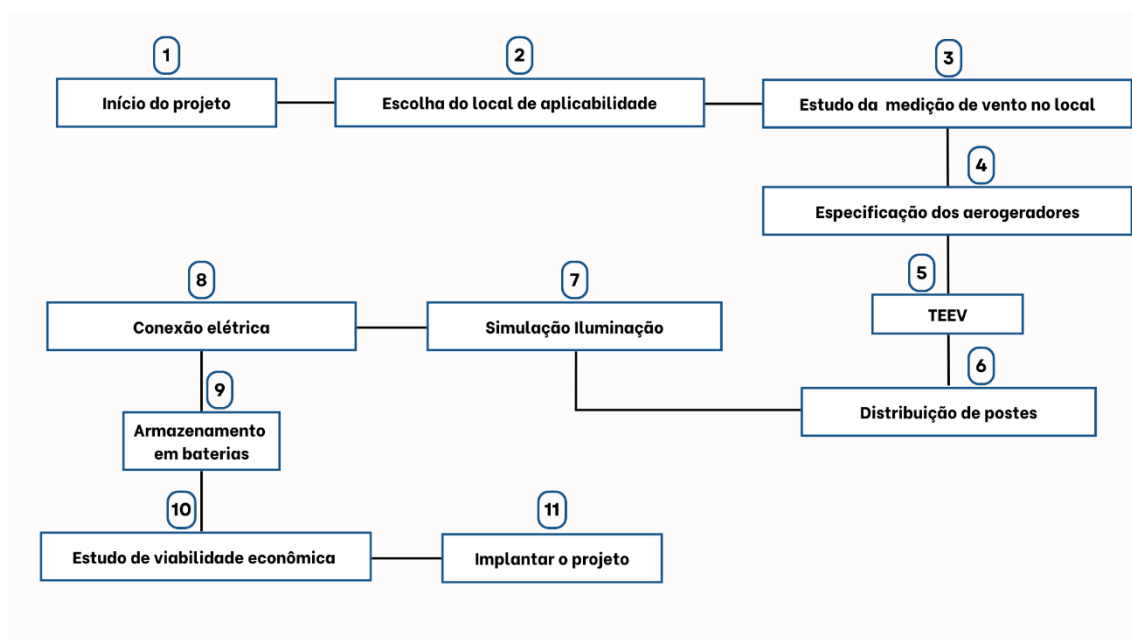
A metodologia utilizada neste trabalho é composta por procedimentos teóricos e simulações.

Os procedimentos teóricos se baseiam no conjunto turbina gerador, esboço da aerodinâmica do poste de iluminação, assim como, a estrutura e distribuição dos postes ao longo do local de aplicabilidade, realizados conforme as normas vigentes.

As simulações realizaram-se para distribuição dos postes de iluminação de modo a alcançar o grau de iluminância exigido pela NBR 5101 (ABNT, 2012). O objetivo da simulação é garantir que a iluminação, proporcionada pelas luminárias acopladas a postes, seja adequada e conforme os padrões regulamentares, tornando o projeto viável do ponto de vista da iluminação.

Essa combinação de análise teórica e simulação prática visa assegurar que tanto os aspectos aerodinâmicos quanto os requisitos de iluminação sejam plenamente atendidos, garantindo a eficácia e a eficiência do projeto.

Figura 25: Estrutura do Projeto.



Fonte: Ilustrada pela autora, 2024.

Para iniciar o projeto, é necessário verificar o local de aplicabilidade do mesmo, em seguida, deve-se proceder ao estudo da medição do vento no local escolhido. Para isso, neste projeto foram utilizados softwares de medição, como *WeatherSpark* e *Windy*, os quais possuem Estação Meteorológica Automática (EMA) instaladas na região da Praia do Cassino. Posteriormente, deve ser realizada a especificação dos aerogeradores, neste caso, optou-se pelo uso de turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV). Após, passa-se à distribuição dos postes de iluminação, para o qual foi utilizado o software *DIALux*, onde foi realizada uma simulação específica para o projeto. Em seguida, define-se a conexão elétrica, estabelecida como 100% *off-grid*, com armazenamento em banco de baterias. Por fim, foi realizado um levantamento da viabilidade econômica inicial do projeto.

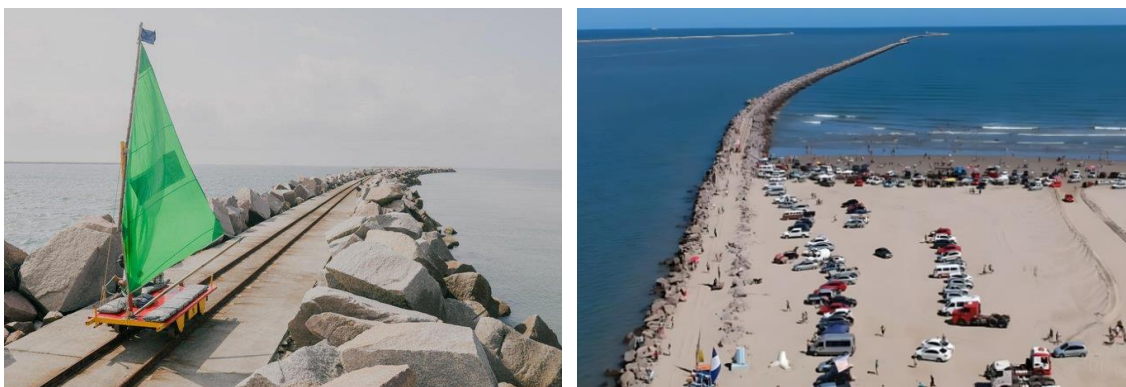
3.1 Local de Aplicabilidade

Realizou-se um levantamento na região mais movimentada da Praia do Cassino, situada na cidade de Rio Grande, no Rio Grande do Sul. Como resultado, determinou-se que o local de aplicabilidade do projeto será os Molhes da Barra, uma área turística que oferece passeios de “vagonetas” até o final da extensão dos molhes, operando apenas durante o dia devido à ausência de iluminação no local. Após a instalação dos postes de iluminação pública, a área poderá ser utilizada também durante o período noturno.

A instalação de postes de iluminação pública com energia gerada por meio de turbinas eólicas de eixo vertical acopladas é de grande importância, essa solução promove a sustentabilidade ao utilizar uma fonte de energia renovável.

Outra vantagem significativa é a redução dos custos operacionais e de manutenção a longo prazo, uma vez que a energia eólica é gratuita após a instalação do equipamento, o que proporciona maior autonomia energética para a região, diminuindo a vulnerabilidade a falhas na rede elétrica convencional. Ademais, a implementação dessa tecnologia pode transformar os postes de iluminação em marcos de inovação e conscientização ambiental, incentivando a adoção de práticas sustentáveis por parte da comunidade e dos turistas que visitam a área.

Figura 26: Molhes da Barra, região da Praia do Cassino, Rio Grande - RS.



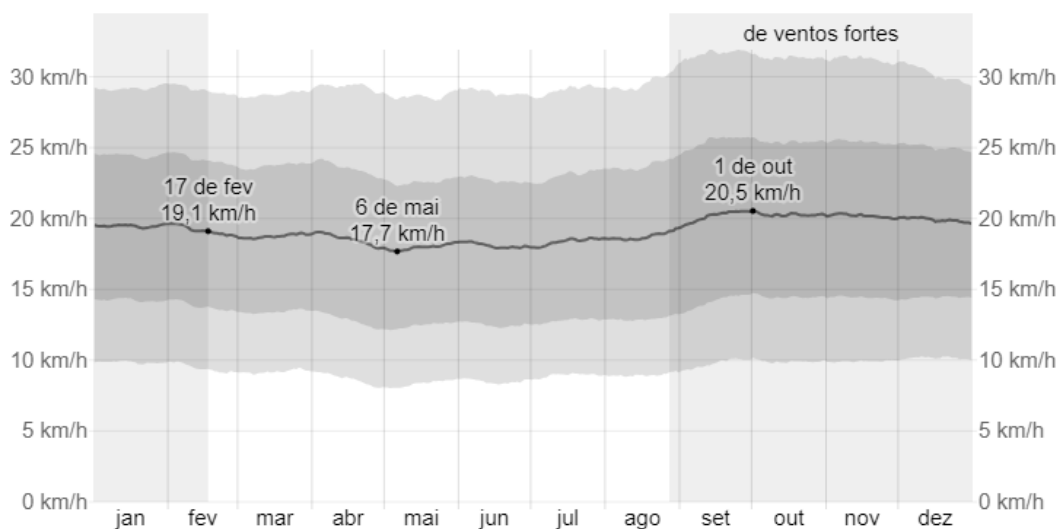
Fonte: GZH.

3.1.1 Procedimentos de Medição de Vento

Conforme visto a partir do item 2.2, a medição do vento é essencial na hora de determinar os locais mais adequados para a instalação das turbinas eólicas, para que assim se possa obter o máximo rendimento possível, sendo uma etapa essencial no desenvolvimento de projetos, proporcionando dados críticos para a tomada de decisões informadas e garantindo a eficiência, sustentabilidade e sucesso do projeto.

Para o procedimento de pesquisa e levantamento de dados foi utilizado, principalmente, o *WeatherSpark*, onde tem-se que a velocidade horária média do vento na Praia do Cassino passa por variações sazonais pequenas ao longo do ano. A época de mais ventos no ano dura 5,6 meses, de 27 de agosto a 17 de fevereiro, conforme a Figura 27 abaixo, com velocidades médias do vento acima de 19,1 km/h, equivalente a 5,31 m/s. O mês de ventos mais fortes em Rio Grande é outubro, com 20,5 km/h de velocidade média horária do vento, equivalente a 5,69 m/s.

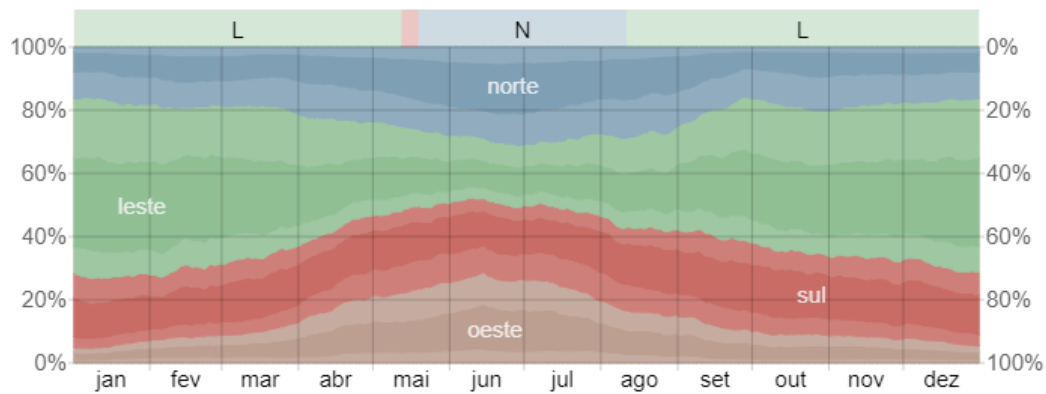
Figura 27: Velocidade média horária do vento.



Fonte: ©WeatherSpark.com.

A direção média horária predominante do vento em Rio Grande varia ao longo do ano, e conforme os dados disponibilizados pela (Weather Spark, 2024), o vento mais frequente vem do sul durante 1 semana, de 12 de maio a 19 de maio, com porcentagem máxima de 27% em 16 de maio, após, o vento mais frequente vem do norte durante 2,7 meses, de 19 de maio a 11 de agosto, com porcentagem máxima de 31% em 29 de junho, e por fim, do leste durante 9 meses, de 11 de agosto a 12 de maio, com porcentagem máxima de 55% em 1° de janeiro. Na Figura abaixo pode-se visualizar a porcentagem de horas com vento em cada direção cardeal, excluindo períodos com velocidade média inferior a 1,6 km/h.

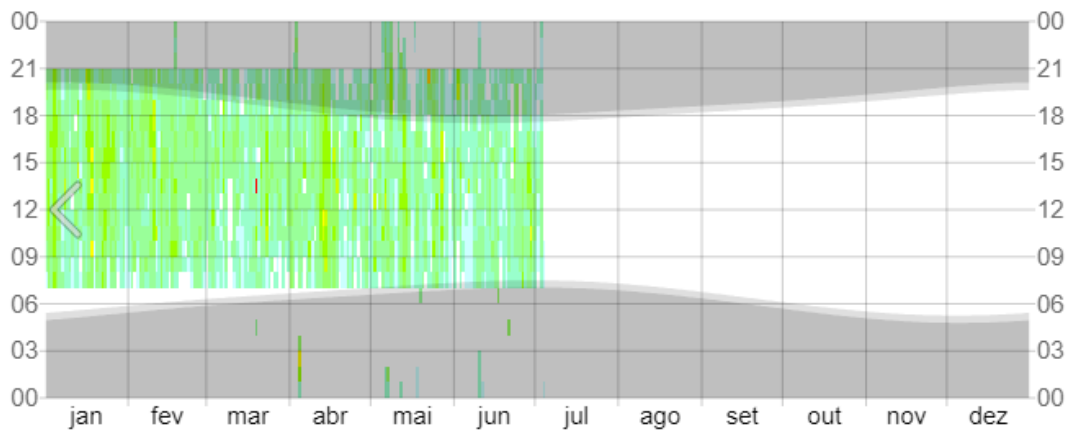
Figura 28: Porcentagem de horas com vento em cada direção cardeal.



Fonte: ©WeatherSpark.com.

A velocidade do vento horária registrada, com faixas codificadas por cores de acordo com a escala *Beaufort* Tabela 1 vista no item 2.2, a qual relaciona a velocidade do vento com seus efeitos observáveis no ambiente, pode ser vista na Figura 29 abaixo:

Figura 29: Velocidade horária do vento registrada conforme a tabela 1 da escala de *Beaufort*.



Fonte: ©WeatherSpark.com.

Onde as áreas sombreadas indicam o crepúsculo civil, período do dia que ocorre logo após o pôr do sol e antes do nascer do sol, e a noite, os indicativos das cores correspondem:

Figura 30: Velocidade horária do vento registrada conforme a tabela 1 da escala de *Beaufort*.



Fonte: Adaptada pela autora, 2024.

3.2 Conjunto Turbina Gerador

Após a decisão do local de aplicabilidade e a realização do estudo de medição de vento, averiguou-se o modelo da turbina que atende a demanda de projeto. O modelo da turbina eólica de eixo vertical (TEEV) mais adequado para o projeto é o *Darrieus-H*, este pode ser visto na Figura 31 abaixo.

Figura 31: Modelo do aerogerador definido para o projeto, TEEV *Darrieus-H*.

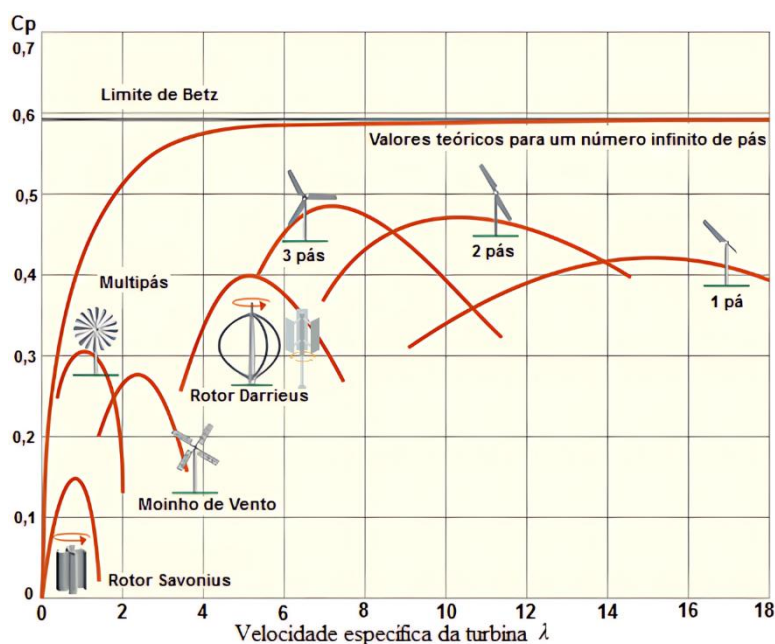


Fonte: Windcycle.

Conforme descrito no item 2.4.3, o modelo TEEV *Darrieus-H* é uma tecnologia moderna e considerada uma das mais promissoras para conversão de energia eólica em regiões com rápidas variações na direção do vento. Essa característica o torna adequado para o projeto, já que na região da Praia do Cassino a velocidade do vento varia sazonalmente ao longo do ano.

O modelo *Darrieus-H* é mais eficiente, por exemplo, quando comparado ao *Savonius*, e isso pode ser visualizado na Figura 32 abaixo, onde é possível observar algumas faixas de desempenho para diferentes tipos de turbinas eólicas.

Figura 32: Faixas de desempenho típicas de turbinas eólicas.



Fonte: Adaptado de (Alabdali, 2020).

O modelo *Darrieus-H* tem um coeficiente de potência (C_p) superior ao das turbinas *Savonius*, o que implica que este modelo converte uma maior parte da energia cinética do vento em energia mecânica útil. As turbinas helicoidais também podem funcionar em diversas velocidades, mas geralmente não atingem o mesmo nível de eficiência em ventos muito altos.

Outro ponto importante é que o modelo *Darrieus-H* é eficaz em uma ampla faixa de velocidades do vento, funcionando bem tanto em ventos baixos quanto em ventos altos, ao contrário da turbina *Savonius*, que é mais adequada para ventos de baixa velocidade.

O design simétrico do modelo *Darrieus-H* tende a produzir menos vibrações, resultando em menor desgaste mecânico e menor necessidade de manutenção em comparação com os outros modelos de TEEV, como as turbinas helicoidais, devido a sua aerodinâmica, podem experimentar forças desequilibradas, levando a maiores vibrações.

3.3 Estrutura do Poste

Considerando que o local de aplicabilidade está situado em uma praia, realizou-se um estudo para os postes de iluminação em áreas costeiras, esses são geralmente fabricados com materiais como alumínio, aço galvanizado, aço inoxidável ou fibra de

vidro para resistir à maresia e evitar a ferrugem. Cada um desses materiais oferece alta resistência à corrosão e durabilidade em ambientes marinhos.

As três questões que envolveram a escolha do poste de iluminação basearam-se em:

- Revestimento de proteção;
- Curva fotométrica das luminárias conforme a altura do poste;
- Fixação do poste.

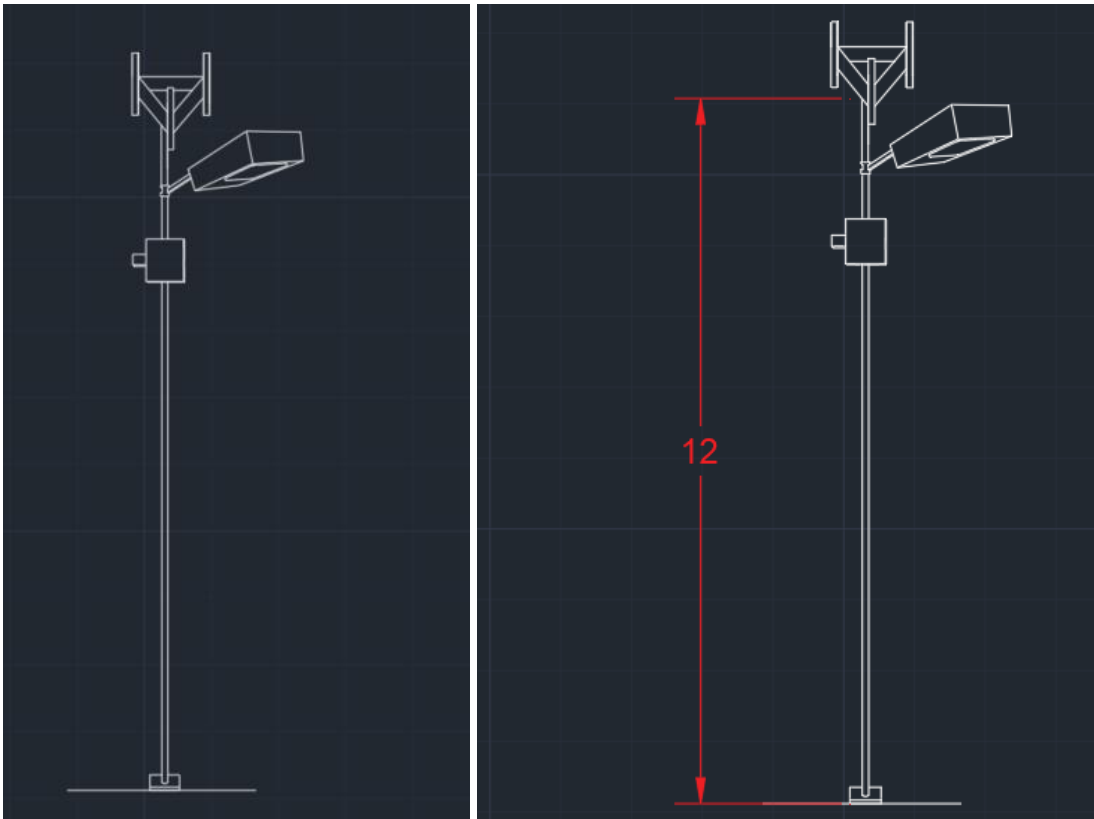
O Revestimento de proteção é diretamente relacionado à proteção contra corrosão do metal utilizado na fabricação dos postes para garantir sua durabilidade. Para o projeto utilizou-se postes feitos de aço protegidos com galvanização a fogo, excelentes para áreas litorâneas, proporcionando proteção interna e externa contra ferrugem por muitos anos.

Para a seleção de potência de iluminação em postes conforme a altura, acima de 8 m, utilizou-se uma lâmpada de 200 W.

Decidiu-se o tipo de fixação como engastado (também conhecido como enterrado), uma parte fica dentro do solo, sendo seguidas as medidas especificadas na NBR 14744 (ABNT, 2001) para determinar a altura adequada do engastamento, assim como a recomendação do uso de galvanização a fogo para proteger o poste contra corrosão, tendo em vista que sua parte interna ficará sujeita à umidade do solo.

A altura do poste, a distribuição e a distância entre eles foram definidas de acordo com as especificações normativas, assegurando a conformidade com os padrões técnicos estabelecidos. Em geral, a altura do poste poderá variar entre seis e doze metros, dependendo da especificação do local e do espaçamento de segurança entre os postes. Para o projeto, partiu-se da altura de 12 m, utilizando o *software* AutoCAD 2022, foi elaborado pela (Autora, 2024) a aerodinâmica do poste já acoplado ao modelo da turbina definido no item 3.2, conforme ilustra a Figura 33 abaixo.

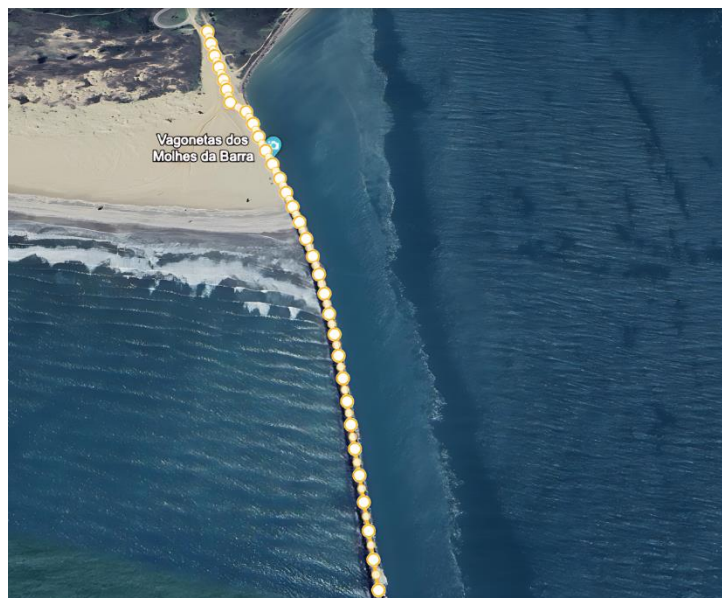
Figura 33: Aerodinâmica do poste de iluminação acoplado ao modelo de TEEV Darrieus-H



Fonte: Ilustrada pela autora, 2024.

A distância total do percurso escolhido do início dos Molhes da Barra até o final da rota das vagonetas é de 1202 m, totalizando assim um total de 1,2 km. Totalizando 32 postes de iluminação, respeitando a distância mínima do vão médio de 35 m, distribuídos conforme a Figura 34.

Figura 34: Distribuição de postes.



Fonte: Adaptada no *Google Earth* (Autora, 2024).

Após a definição da altura ideal do poste de iluminação é feita a escolha da luminária, onde a curva fotométrica varia conforme a altura do poste. Para o projeto considerou-se o percentual de fluxo luminoso (luminância e iluminância) necessário para iluminar os Molhes da Barra. A norma que regulamenta esse percentual e outros requisitos mínimos para a iluminação de vias públicas é NBR 5101 (ABNT, 2012).

3.4 Aspectos Luminotécnicos

A luminária definida para o projeto, conforme visto no item 3.3, foi de 200 W, com magnetização de corrente alternada (CA), onde a alimentação elétrica utilizada para acender a luminária é fornecida por uma fonte de corrente alternada (CA), ao invés de corrente contínua (CC). O modelo próprio para o poste de iluminação pode ser visualizado na Figura 35 abaixo.

Figura 35: Modelo de luminária LED.



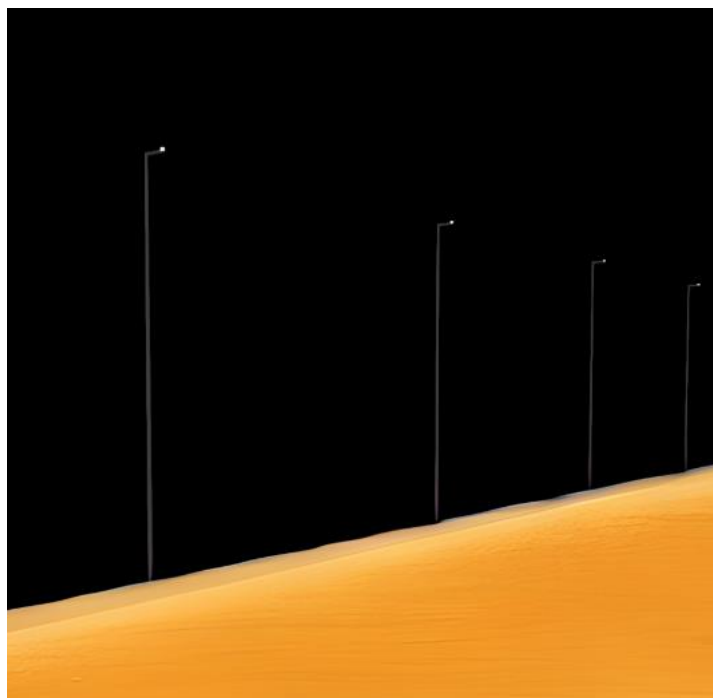
Fonte: *Yumin*.

Este é um modelo que atende a demanda do projeto e é amplamente disponível no mercado atualmente, oferecendo muitas opções de marcas à escolha para o projeto.

3.5 Estudo Luminotécnico

Utilizando o software DIALux, realizou-se a simulação da iluminação para este projeto. Para garantir resultados precisos e corretos, a simulação respeitou o espaçamento adequado entre cada poste, onde foi adotado um cenário de distribuição com 4 postes de iluminação, os quais, poderão ser replicados para todo o trecho, conforme ilustrado na Figura 36.

Figura 36: Simulação para quatro postes de iluminação.



Fonte: Adaptada no DIALux (Autora, 2024).

A simulação de iluminação neste projeto trouxe diversos benefícios, como a garantia que toda a área seja adequadamente iluminada, evitando sombras e pontos excessivamente brilhantes, assim como a ajuda para identificar soluções que maximizaram a eficiência energética, incluindo a seleção de luminárias adequadas e o posicionamento estratégico dos postes, contribuindo para a redução do consumo de energia e dos custos operacionais.

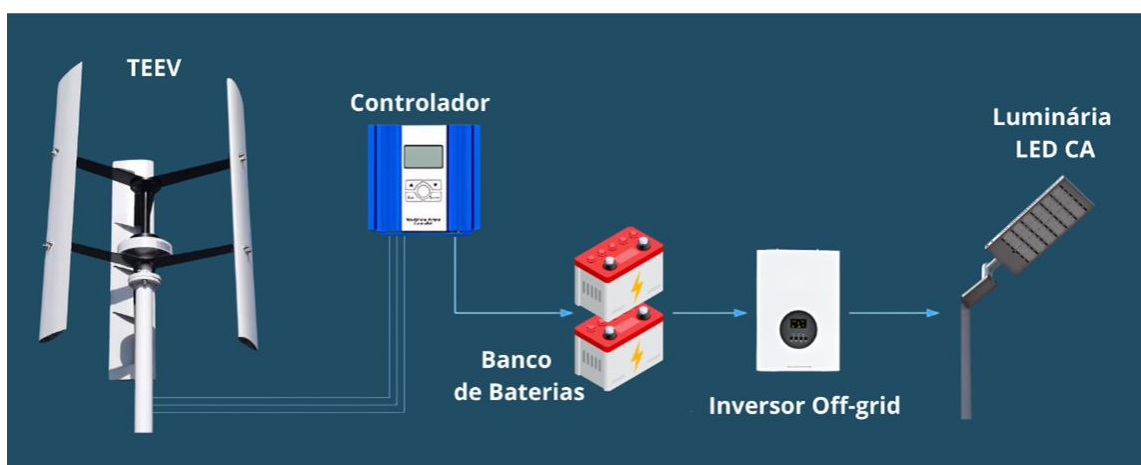
3.6 Conexão Elétrica

A conexão elétrica deste projeto será do tipo off-grid, sendo assim, independente da rede elétrica convencional. A energia gerada pelas turbinas eólicas será armazenada em um banco de baterias, permitindo o fornecimento de energia contínuo para a luminária mesmo quando as condições de vento não forem ideais.

3.6.1 Armazenamento em Banco de Baterias

O sistema de armazenamento em baterias é importante para garantir que a iluminação funcione de forma ininterrupta durante a noite e em períodos de baixa geração eólica. As baterias são carregadas durante o dia e em momentos de alta produção de energia, armazenando o excedente para uso posterior. O esquema de conexão do projeto pode ser visto na Figura 37 abaixo.

Figura 37: Conexão do projeto *off-grid*.



Fonte: Ilustrada pela autora, 2024.

A Figura 37 ilustra a conexão elétrica do projeto, um sistema de geração e armazenamento de energia eólica para alimentar uma luminária LED.

Neste, estão conectados:

- Turbina Eólica de Eixo Vertical modelo *Darrieus-H*;
- Controlador de Carga;
- Banco de Baterias;

- Inversor *Off-grid*;
- Luminária LED CA.

O fluxo de energia inicia com a TEEV gerando eletricidade a partir do vento, a eletricidade gerada é então enviada ao controlador de carga, onde, é regulada essa energia e enviada para o banco de baterias, onde a energia elétrica é armazenada. Quando necessário, o banco de baterias fornece energia ao inversor *off-grid*, este, converte a energia de corrente contínua (CC) das baterias para corrente alternada (CA), e com isso, a corrente alternada alimenta a luminária LED, que fornece iluminação.

Se caracterizando um sistema útil para o local, considerado autossuficiente, e com a principal vantagem sendo a autonomia energética, tornando o projeto mais sustentável e menos vulnerável a falhas da rede elétrica.

4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Utilizando a metodologia descrita no Capítulo 3, dividiu-se os resultados em três etapas. Na primeira etapa, serão vistos os resultados da simulação, na segunda, o cálculo de energia anual gerada, e por fim, a viabilidade econômica de implantação do projeto.

4.1 Procedimento da Simulação

Para a simulação descrita no Item 3.5, foram seguidas as especificações da NBR 5101 (ABNT, 2012), onde este projeto se enquadra em uma via de grande tráfego noturno de pedestres, com classe de iluminação P2, conforme ilustrado na Figura 38 abaixo.

Figura 38: Classes de iluminação para cada tipo de via.

| Descrição da via | Classe de iluminação |
|---|----------------------|
| Vias de uso noturno intenso por pedestres (por exemplo, calçadas, passeios de zonas comerciais) | P1 |
| Vias de grande tráfego noturno de pedestres (por exemplo, passeios de avenidas, praças, áreas de lazer) | P2 |
| Vias de uso noturno moderado por pedestres (por exemplo, passeios, acostamentos) | P3 |
| Vias de pouco uso por pedestres (por exemplo, passeios de bairros residenciais) | P4 |

Fonte: NBR 5101 (ABNT, 2012).

Seguindo a Figura 39 abaixo, para essa classe de iluminação, tem-se a iluminância horizontal média, $E_{med} = 10$ lux, e o fator de uniformidade mínimo, $U = 0,25$.

Figura 39: Iluminância média e fator de uniformidade mínimo para cada classe de iluminação.

| Classe de iluminação | Iluminância horizontal média E_{med} lux | Fator de uniformidade mínimo $U = E_{min}/E_{med}$ |
|----------------------|---|---|
| P1 | 20 | 0,3 |
| P2 | 10 | 0,25 |
| P3 | 5 | 0,2 |
| P4 | 3 | 0,2 |

Fonte: NBR 5101 (ABNT, 2012).

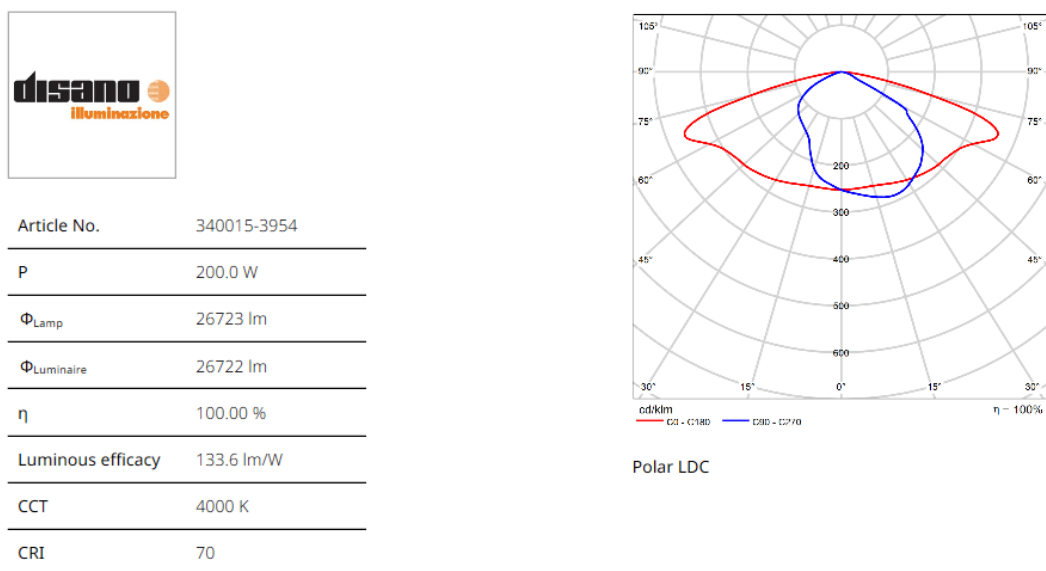
4.1.1 Resultado da Simulação

Conforme descrito no item 3.5, realizou-se a simulação da iluminação para este projeto primeiramente, com a distribuição de quatro postes de iluminação.

O *datasheet* da luminária utilizada para simulação pode ser visto na Figura 40 abaixo.

Figura 40: *Datasheet* da luminária utilizada.

Disano Illuminazione S.p.A - 3470 Denia ES 3 4000K CRI70 200W CLD Grey



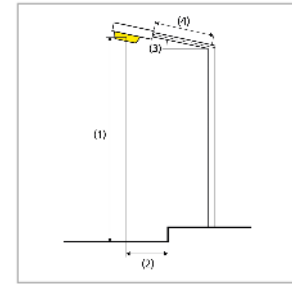
Fonte: DIALux.

Bem como, as características dos quatro postes utilizados para a simulação. Conforme visto no item 3.3, respeitando a distância mínima do vão médio de 35 m para cada poste.

Figura 41: Características de cada poste.

3470 Denia ES 3 4000K CRI70 200W CLD Grey (single side bottom)

| | |
|--------------------------|--------------------------|
| Pole distance | 36.000 m |
| (1) Light spot height | 12.000 m |
| (2) Light point overhang | 0.046 m |
| (3) Boom inclination | 30.0° |
| (4) Boom length | 0.000 m |
| Annual operating hours | 4000 h: 100.0 %, 200.0 W |



Fonte: DIALux.

Resultando em sucesso na simulação, a Figura 42 abaixo, retirada do relatório gerado pelo *software* DIALux. Pode-se observar o cumprimento da NBR 5101 (ABNT, 2012), vista no item 4.1, onde a classificação P2, remete a $E_{med} = 10$ lux.

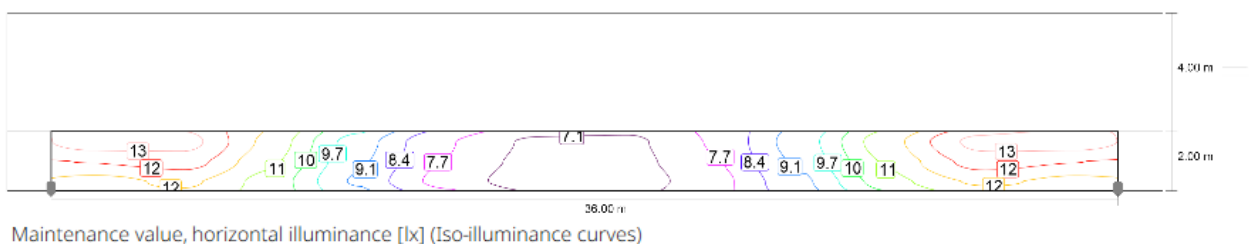
Figura 42: Resultado gerado da primeira simulação.

Street 1

Sidewalk 2 (P2)

Results for valuation field

| | Symbol | Calculated | Target | Check |
|-----------------|-----------|------------|--------------------|-------|
| Sidewalk 2 (P2) | E_{av} | 10.00 lx | [10.00 - 15.00] lx | ✓ |
| | E_{min} | 6.73 lx | ≥ 2.00 lx | ✓ |



Fonte: DIALux.

Com isso, obtendo o fator de uniformidade de aproximadamente 0,67. Condizente com a norma, acima do mínimo esperado.

Figura 43: Resultados gerados da primeira simulação, $E_{med} = 10 \text{ lux}$, e $U = 0,67$.

| | E_{av} | E_{min} | E_{max} | $U_o (g_1)$ |
|---|----------|-----------|-----------|-------------|
| Maintenance value, horizontal illuminance | 10.0 lx | 6.73 lx | 13.4 lx | 0.67 |

Fonte: DIALux.

Os resultados obtidos na simulação validam a eficiência do projeto em proporcionar uma iluminação adequada e uniforme para o projeto, classificado em P2, via de grande tráfego noturno de pedestres, conforme especificado nas normativas técnicas aplicáveis.

Ampliando assim a possibilidade de uso noturno da área turística dos Molhes da Barra na Praia do Cassino, considerando segurança no tráfego para os pedestres, assim como, para a utilização das vagonetas.

4.2 Energia Anual Gerada

Para o modelo de TEEV *Darrieus-H* adequado ao projeto foi realizado o cálculo da energia anual gerada, conforme visto no Item 2.5, a EAG, é um fator de suma importância econômica. Seguindo a metodologia de acordo com (Custódio, 2013) exemplificada no item 2.5, a primeira etapa do cálculo pode ser vista na Figura 44 abaixo.

Figura 44: Tabulação dos dados de vento na forma de frequência de distribuição.

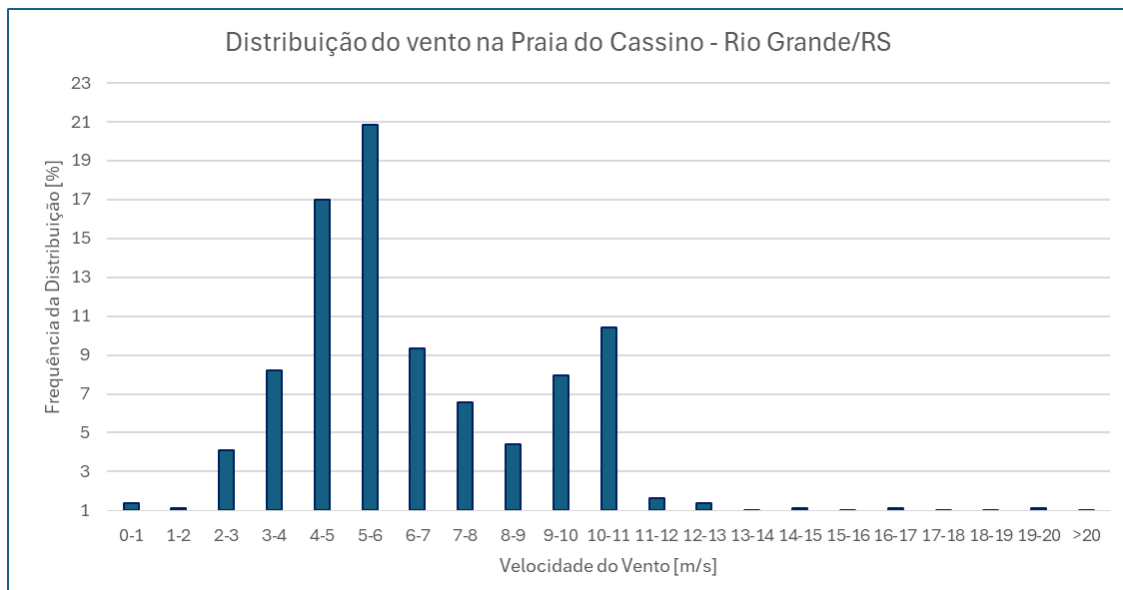
| EAG para Praia do Cassino - Rio Grande/RS com o Modelo de TEEV: <i>Darrieus - H</i> | | |
|---|--------------------|-------------------------|
| Velocidade do Vento [m/s] | N ° de Ocorrências | Frequência Relativa [%] |
| 0-1 | 5 | 1,370 |
| 1-2 | 4 | 1,096 |
| 2-3 | 15 | 4,110 |
| 3-4 | 30 | 8,219 |
| 4-5 | 62 | 16,986 |
| 5-6 | 76 | 20,822 |
| 6-7 | 34 | 9,315 |
| 7-8 | 24 | 6,575 |
| 8-9 | 16 | 4,384 |
| 9-10 | 29 | 7,945 |
| 10-11 | 38 | 10,411 |
| 11-12 | 6 | 1,644 |
| 12-13 | 5 | 1,370 |
| 13-14 | 3 | 0,822 |
| 14-15 | 4 | 1,096 |
| 15-16 | 2 | 0,548 |
| 16-17 | 4 | 1,096 |
| 17-18 | 1 | 0,274 |
| 18-19 | 2 | 0,548 |
| 19-20 | 4 | 1,096 |
| >20 | 1 | 0,274 |
| TOTAL | 365 | 100 |

Fonte: Ilustrada pela autora, 2024.

Onde as velocidades do vento foram analisadas, juntamente com o número de ocorrências de cada uma, ou seja, a frequência com que cada velocidade se repete dentro de intervalos específicos, variando de 0 m/s até velocidades superiores a 20 m/s. A análise dos números de ocorrências foi realizada com base nos dados específicos de velocidade do vento para Rio Grande/RS, disponibilizados pelo *Weather Spark*.

Na Figura abaixo, é apresentado um gráfico com os histogramas das frequências de distribuição da velocidade do vento obtido através da Figura 44 acima.

Figura 45: Histogramas das frequências de distribuição da velocidade do vento.



Fonte: Ilustrada pela autora, 2024.

Neste seguimento, as velocidades do vento na região foram novamente analisadas, juntamente com a frequência de ocorrência, ou seja, a porcentagem de repetição de cada velocidade dentro do intervalo de 1 a 21 m/s. A velocidade máxima registrada durante o período analisado, de julho de 2023 a junho de 2024, foi de 21 m/s, abrangendo um total de 12 meses.

Figura 46: Seguimento para determinação da EAG.

| EAG para Praia do Cassino - Rio Grande/RS com o Modelo de TEEV: <i>Darrieus - H</i> | | | |
|---|------------------------------|------------------------------|-------------|
| Velocidade do Vento [m/s] | Frequência de Ocorrência [%] | Potência do Aerogerador [kW] | $f(v).P(v)$ |
| 1 | 1,233 | 0,91 | 0,01 |
| 2 | 2,603 | 1,82 | 0,05 |
| 3 | 6,164 | 2,73 | 0,17 |
| 4 | 12,603 | 3,64 | 0,46 |
| 5 | 19,880 | 4,55 | 0,90 |
| 6 | 15,125 | 5,45 | 0,83 |
| 7 | 7,945 | 6,36 | 0,51 |
| 8 | 5,479 | 7,27 | 0,40 |
| 9 | 6,164 | 8,18 | 0,50 |
| 10 | 9,178 | 9,09 | 0,83 |
| 11 | 6,566 | 10,00 | 0,66 |
| 12 | 0,630 | 10,1 | 0,06 |
| 13 | 1,096 | 10,1 | 0,11 |
| 14 | 0,959 | 10,1 | 0,10 |
| 15 | 0,822 | 10,1 | 0,08 |
| 16 | 0,822 | 10,1 | 0,08 |
| 17 | 0,685 | 10,1 | 0,07 |
| 18 | 0,411 | 10,1 | 0,04 |
| 19 | 0,822 | 10,1 | 0,08 |
| 20 | 0,685 | 10,1 | 0,07 |
| 21 | 0,128 | 10,1 | 0,01 |
| TOTAL | | | 6,03 |

Fonte: Ilustrada pela Autora, 2024.

Por conseguinte, dada a especificação do fabricante, da velocidade e potência nominal, foi possível determinar a potência do aerogerador adequado ao projeto, em cada um dos intervalos das velocidades, assim como, a energia gerada. As especificações do aerogerador podem ser vistas na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3: Especificações do Fabricante.

| Item | Especificação |
|--------------------------------|--------------------------|
| Potência Máxima | 10,1 kW |
| Potência Nominal | 10 kW |
| Velocidade de Partida | 1 m/s |
| Velocidade Nominal | 11 m/s |
| Velocidade de Segurança | 45 m/s |
| Número de Pás | 3 |
| Material da Pá | Fibra de Nylon |
| Peso | 20 kg |
| Comprimento das Pás | 1 m |
| Diâmetro do Rotor | 0,6 m |
| Sistema de Controle <i>YAW</i> | Automatizado |
| Isolamento | Cabo para Isolamento |
| Gerador | Ímã Permanente Trifásico |
| Temperatura de Trabalho | - 40°C a 80°C |

Fonte: Ilustrada pela Autora, 2024.

O raciocínio utilizado para calcular as potências ilustradas na Figura 46 foi o seguinte: dado que, para a velocidade nominal de 11 m/s a potência nominal é de 10 kW, qual potência seria gerada para os valores de velocidade apresentados na Figura 46, tendo em vista a potência máxima da turbina de 10,1 kW.

Com isso, substituindo o valor na Equação 8, obteve-se o seguinte valor para energia anual gerada pelo aerogerador adequado ao projeto, levando em conta o levantamento de 12 meses em aproximadamente 8.760 horas:

$$EAG = 6,03 * 8760 \quad (9)$$

Com isso em kWh, tem-se:

$$EAG = 52.822,8 \text{ kWh} \quad (10)$$

Convertendo para MWh:

$$EAG = 52.82 \text{ MWh} \quad (11)$$

A produção anual de eletricidade pelo aerogerador adequado ao projeto foi de 55,82 MWh. Essa é uma métrica essencial para a gestão eficiente e sustentável do projeto.

4.3 Viabilidade de Implantação do Projeto

Para obter uma noção básica de viabilidade de implantação do projeto, foi elaborada a tabela 4 orçamentária a seguir, que apresenta uma estimativa dos principais custos associados ao projeto. Os valores indicados são aproximados, baseados em uma avaliação preliminar e podem sofrer ajustes conforme o andamento do projeto e a obtenção de propostas de preços mais precisas.

Tabela 4: Viabilidade inicial dos principais equipamentos e mão de obra para implantação do projeto.

| Equipamentos/Serviços | Quantidade | Custo Aproximado |
|------------------------------|-------------------|-------------------------|
| Postes + Galvanização a fogo | 32 | R\$ 224.000,00 |
| TEEV | 32 | R\$ 163.112,32 |
| Luminária LED | 32 | R\$ 5.568,00 |
| Mão de Obra | - | R\$ 98.170,08 |
| TOTAL | - | R\$ 490.850,4 |

Levando em conta orçamentos com o custo de R\$ 7.000,00 para cada poste de aço de 12 metros, incluindo galvanização a fogo, é aplicado um desconto devido à quantidade de 32 unidades. O valor não cobre a base do poste.

O modelo de TEEV definido para o projeto é atualmente vendido no mercado por aproximadamente R\$ 5.097,26. Esse valor não inclui a estimativa da taxa de imposto, mas oferece uma garantia de 20 anos.

Para a luminária LED, o custo calculado foi de R\$ 174,00 por unidade, considerando a grande oferta disponível no mercado atualmente, o que torna as vendas mais competitivas e o custo mais baixo.

Para mão de obra, 25% dos custos totais.

Estes, são custos primordiais e iniciais para o projeto. Outros específicos e importantes como por exemplo, cabeamento, devem ser levados em conta de 10-20% do custo total.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Destacou-se neste projeto, a significativa contribuição para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental da região, tendo em vista amplo potencial eólico a ser aproveitado, visualizado ao longo do estudo. A implementação de postes de iluminação pública alimentada por energia eólica, através de aerogeradores de eixo vertical de pequeno porte, não apenas atende às demandas por infraestrutura segura e eficiente, mas também promove um modelo sustentável que beneficia, tanto a comunidade local da área de implantação, quanto o meio ambiente.

A escolha da fonte de energia eólica para a geração de energia elétrica utilizada neste projeto, não só reduz os custos operacionais a longo prazo, devido as diversas vantagens da turbina eólica de eixo vertical como a baixa manutenção, mas também diminui a dependência de recursos não renováveis e contribui para a redução das emissões de carbono, e isso não apenas fortalece a capacidade de recuperação energética da região, mas também a posiciona como um belo exemplo de práticas ambientais responsáveis.

Além disso, o modelo de turbina eólica de eixo vertical aplicado neste estudo, proporciona vantagens como, uma excelente eficiência, não é dependente de direção do vento, a mudança não altera o seu rendimento, ainda possui uma sensibilidade menor a turbulências, quando comparadas as turbinas eólicas de eixo horizontal, produz pouca vibração e ruído baixo, com isso, não afetará em nenhum momento a área turística.

A integração de critérios socioeconômicos e ambientais vistas neste projeto não apenas reforçam o compromisso com o desenvolvimento sustentável, mas também abre novas oportunidades para o crescimento econômico através da utilização noturna do local de turismo e da valorização da infraestrutura urbana. A iluminação pública não é apenas um componente funcional, se torna também, uma concretização do compromisso da comunidade com um futuro mais limpo, renovável e próspero.

Com a análise da avaliação de geração de energia (EAG), ficou evidente um excedente significativo de energia. Originalmente, o projeto tinha como meta a implementação de dois cenários: *on-grid* e *off-grid*, no entanto, devido à falta de um inversor adequado para conexão à rede elétrica, só foi viável implementar o cenário *off-grid*. Deixando em aberto a possibilidade de adotar o cenário *on-grid* assim que um inversor adequado estiver disponível garantindo uma operação eficiente e confiável.

Além disso, a estrutura ainda pode ser utilizada de forma mais completa para oferecer diversos serviços e funcionalidades, como *Wi-Fi*, carregamento de celular, câmeras de monitoramento para a segurança dos turistas, durante o percurso, estações meteorológicas para fornecer informações climáticas em tempo real, e muito mais.

Por fim, o intuito da implementação deste projeto não se limita apenas melhorar a qualidade de vida dos residentes e turistas, mas também estabelece um padrão muito elevado de inovação sustentável, até agora nunca implementado no país, que pode inspirar outras comunidades a adotar soluções similares. Este projeto entrega uma solução com a combinação de benefícios econômicos, sociais e ambientais, e se torna um modelo exemplar, com custos adequados a entrega de solução energética eficiente, de como podemos alcançar o equilíbrio entre o desenvolvimento urbano e a preservação ambiental em benefício das gerações presentes e futuras.

REFERÊNCIAS

- ABEEólica. Energia Eólica. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/>>. Acesso em 12 jun. de 2024.
- AMARANTE, O. A.; BROWER, M.; ZACK, J.; EOLICA, C. S. E. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Ministerio de Minas e Energia Eletrobras. 2001.
- AMJADY, N.; KEYNIA, F.; ZAREIPOUR, H. **Short-term wind power forecasting using ridgelet neural network**. Electric Power Systems Research, v. 81, n. 12, p. 2099–2107, 2011. Elsevier.
- ANAYA-LARA, Olimpo; JENKINS, Nick; EKANAYAKE, Janaka; CARTWRIGHT, Phill; HUGHES, Mike. **Wind Energy Generation**. United Kingdom: British Library, 2009.
- BARAKATI, S. M. **Wind turbine systems: History, structure and dynamic model**. In: ZOBAA, A. F.; BANSAL, R. (Ed.). Handbook of Renewable Energy Technology. Zahedan, Iran: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2011. v. 1.
- COSTA, A. et al. **A review on the young history of the wind power short-term prediction**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier. v. 12, n. 6, p. 1725–1744, 2008.
- CUSTÓDIO, Ronaldo. **Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: Acta, ABEEólica, Synergia, 2013.
- ERNST, B.; ROHRIG, K.; SCHORN, P.; REGBER, H. **Proceedings of the European Wind Energy Conference**. Dinamarca: Copenhagen, 2001.
- FOX, Brendan; FLYNN, Damian; BRYANS, Leslie; JENKINS, Nick; MILBORROW, David; O'MALLEY, Mark; WATSON, Richard; ANAYA-LARA, Olimpo. **Wind Power Integration Connection and System Operational Aspects**. London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2007.

GOLDEMBERG, J. **Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento**. São Paulo: Edusp, 2a. ed., 2003.

JUNG, J.; BROADWATER, R. P. **Current status and future advances for wind speed and power forecasting**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 31, p. 762–777, 2014. Elsevier.

LOPEZ, Ricardo. **Energia Eólica**. São Paulo: Artliber, 2002.

MILLIGAN, M.; MILLER, A.; CHAPMAN, F. **Estimating the Economic Value of Wind Forecasting to Utilities**. 1995.

PINHO, João; BARRETO, Eduardo. **Sistemas Híbridos: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

PINTO, M. O. **Fundamentos de Energia Eólica**. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2012.

PINTO, Milton. **Energia Eólica Princípios e Operação**. São Paulo: Érica, Saraiva, 2019.

REDLINGER, Robert; ANDERSEN, Per Dannemand; MORTHORST, Poul. **Wind Energy in the 21st Century: Economics, Policy, Technology and Changing Electricity Industry**. New York: Palgrave, 2002.

SCHUBERT, Camargo; Eletrosul Centrais Elétricas S.A. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Ministerio de Minas e Energia Eletrobras. 2014.

STIEBLER, Manfred. **Green Energy and Technology: Wind Energy Systems for Electric Power Generation**. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2008.

VIAN, A.; MARCIO, C.; AGUILAR, G.; GOUVEA, M.; GEMIGNANI. **Energia Eólica: Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Blucher, 2021.

ZOBAA, A. F.; BANSAL, R. **Handbook of Renewable Energy Technology**. 1. ed. Singapura: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2011. 851 p. ISBN 13 978-981-4289-06-1.

ANEXOS



GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA EM RIO GRANDE NA PRAIA DO CASSINO

Louise Domingues Coelho, Aluno de graduação

Carlos Sonier Cardoso do Nascimento, Docente

E-mail: louisecoelho.aluno@unipampa.edu.br

Atualmente, no setor energético brasileiro, é possível observar um crescimento significativo na aplicação de fontes de energias renováveis, isso devido à necessidade de uma trajetória de descarbonização, que é o processo de redução das emissões de carbono na atmosfera, especialmente o dióxido de carbono, que vem sendo adequado nos últimos anos. As fontes de energias limpas e renováveis desempenham um papel crucial na redução das emissões, mitigando as mudanças climáticas, promovendo a sustentabilidade e impulsionando o desenvolvimento econômico. A adoção generalizada de fontes de energias renováveis é fundamental para atingir as metas de descarbonização do governo federal, com a expectativa de serem concluídas no decorrer do longo caminho até o fim do ano de 2030, e criar um futuro ainda mais limpo e sustentável para o planeta, assim como, o investimento nessas fontes impulsiona o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e acessíveis, e isto, por sua vez, acelera ainda mais os avanços tecnológicos e a adoção de práticas mais sustentáveis em outros setores da economia, amplificando assim os benefícios da descarbonização. A implantação de tecnologias renováveis não apenas reduz as emissões de carbono, mas também tem um impacto positivo na qualidade do ar, essencial para saúde humana, na saúde pública e na criação de, cada vez mais, empregos verdes. Além disso, essas fontes muitas vezes oferecem uma fonte de energia mais estável e acessível em áreas remotas ou em desenvolvimento, promovendo o desenvolvimento sustentável e, conseqüentemente, melhorando a qualidade de vida das comunidades. A

utilização da energia eólica como fonte alternativa de energia para geração de eletricidade é um exemplo crescente no mundo inteiro. Este trabalho pretende contribuir para a promoção da utilização de energias renováveis através de uma revisão bibliográfica que abrange o estudo de geração de energia eólica para o uso de pequenos aerogeradores adequados a postes de iluminação, com foco nas zonas mais movimentadas da Praia do Cassino, maior praia do mundo com extensão de 254 quilômetros, localizada na cidade de Rio Grande, no extremo sul do Rio Grande do Sul. Nesta revisão, serão analisados diferentes modelos de rotores de turbinas eólicas com o objetivo de identificar a turbina mais eficiente e adequada para a aplicação do estudo, com o intuito de aprimorar a maior praia do mundo, promovendo mais iluminação e, conseqüentemente, segurança aos moradores e turistas. Além disso, serão analisados dados relativos à velocidade média de vento na área, métodos de medição adequados às condições específicas da Praia do Cassino, utilizando softwares específicos de medições, obtendo assim, gráficos com dados diários, mensais e anuais da velocidade e potencial do vento. Com estes dados, é possível obter resultados da eficiência do projeto proposto, e em quanto tempo poderá se pagar o mesmo. A combinação deste estudo proporcionará uma abordagem mais completa e fundamentada para encontrar soluções sustentáveis de geração de energia. O estudo proposto visa não apenas contribuir para a expansão das energias renováveis no Brasil e no mundo, mas também, principalmente, contribuir para o desenvolvimento local da região, explorando ainda mais o potencial da área da Praia do Cassino como um local adequado para pequenas turbinas eólicas gerarem eletricidade, e contribuindo assim para a mitigação das alterações climáticas e para a construção de um futuro cada vez mais sustentável. Como resultados, averiguou-se o modelo turbina que atende as demandas do projeto, bem como, a distribuição da quantidade de postes, totalizando 7 postes com pequenos aerogeradores de eixo vertical do modelo Darrieus-H, produzindo 5.040 kWh mensais, equivalente ao consumo de aproximado de 50 residências.

Agradecimentos: O presente trabalho foi realizado com o apoio de: Universidade Federal do Pampa.

Palavras-chave: Energia Renovável. Energia Eólica. Aerogerador. Velocidade do Vento.