Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco
Campus Garanhuns
Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica

JOELITON SILVA DE OLIVEIRA

ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA RESIDENCIAL OFF-GRID

Garanhuns – PE
2025

JOELITON SILVA DE OLIVEIRA

ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA RESIDENCIAL OFF-GRID

Trabalho de conclusão de curso apresentado a Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Pernambuco, campus Garanhuns, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Severino da Silva

Garanhuns – PE

2025

O48a Oliveira, Joeliton Silva de
Análise técnica e econômica da implantação de um sistema de geração eólica residencial off-grid / Joeliton Silva de Oliveira ; orientador Márcio Severino da Silva, 2025.
75f. : il.

Orientador: Márcio Severino da Silva.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Federal de Pernambuco. Pró-Reitoria de Ensino. Diretoria de Ensino. Campus Garanhuns. Coordenação do Curso Superior em Engenharia. Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, 2025.

1. Energia eólica. 2. Energia - fontes alternativas. 3. Geração de energia - Brasil. I. Título. II. Silva, Márcio Severino da. III. Instituto Federal de Pernambuco.

CDD 621.312136

Louise Machado Freire Dias –CRB4/2267

JOELITON SILVA DE OLIVEIRA

ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA RESIDENCIAL OFF-GRID

Trabalho de conclusão de curso apresentado a Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Pernambuco, campus Garanhuns, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado em: ____/____/____

_____

Prof. Dr. Márcio Severino da Silva (IFPE, campus Garanhuns)
Orientador

_____

Prof. Esp. Manoel Alves Cordeiro Neto (IFPE, campus Garanhuns)
Avaliador interno

_____

Eng. Me. Vladmir Reis Pontes (Engeform Energia)
Avaliador externo

Dedico este trabalho aos meus pais, que são os verdadeiros protagonistas desta conquista.

.

AGRADECIMENTOS

Expresso, primeiramente, minha gratidão a Deus, por estar sempre comigo e iluminar cada passo da minha jornada. À minha família, em especial à minha mãe, Maria Nazaré, por seu apoio incondicional, incentivo constante e por me ensinar o valor da educação. Ao meu pai, Josemir, que sempre fez de tudo para que seus filhos pudessem estudar e que, a cada dia, me mostra que é o trabalho que dignifica o homem. À minha irmã, Nadiele, por ser a maior fonte de alegria em minha vida, por seu carinho e companheirismo. Cada palavra, gesto e sorriso de vocês foi fundamental para que eu chegasse até aqui.

Agradeço ao meu amigo Manuel Curvelo (Manezinho) por todo o incentivo durante toda a jornada, pelas palavras de apoio e pela amizade constante que fizeram a diferença ao longo desse percurso.

Ao meu amigo Matheus Saturno, por todo o apoio, ajuda e suporte durante o desenvolvimento deste trabalho, demonstrando sempre companheirismo e disposição nos momentos em que mais precisei.

À minha amiga e professora Manuele Regina, por todo o apoio e dedicação ao longo do curso. Sua ajuda foi essencial para a conclusão desta graduação.

Aos meus amigos João Neto, Jonas, Jaianny, Moisés, Bruno Henrique, Tarcísio, Ingrid Matias e Isaías pelo incentivo e companheirismo ao longo de todo o curso.

Sou profundamente grato à equipe Serra das Vacas, onde tive o privilégio de estagiar, sendo acolhido por pessoas incríveis e construindo amizades que levarei para toda a vida. Aos amigos que conquistei ao longo desta graduação, sem os quais o caminho teria sido muito mais árduo.

Agradeço também a todos os professores do Instituto Federal de Pernambuco por sua dedicação e contribuição para minha formação. Em especial, ao meu orientador, Márcio Silva, por seu comprometimento e dedicação, que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

"O novo sempre vem."

— Como Nossos Pais

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo a partir do desenvolvimento de um sistema de monitoramento de vento para análise da viabilidade da geração eólica residencial, utilizando o Arduino. O projeto envolveu a coleta de dados sobre velocidade e intensidade do vento ao longo de três meses, tendo a finalidade de analisar os dados coletados e avaliar a viabilidade de implantação de um sistema de geração por meio de aerogeradores de pequeno porte. Com base nos nesses dados, foi realizado o dimensionamento dos aerogeradores mais adequados, identificando-se o modelo mais eficiente para o local estudado. Além disso, foi feito uma análise do tempo de retorno do investimento, considerando a viabilidade econômica do sistema. O estudo aponta que o monitoramento detalhado do vento é essencial para otimizar a escolha do aerogerador e garantir a viabilidade econômica da instalação do sistema eólico residencial. Este estudo contribui para a disseminação da geração de energia renovável em pequena escala, promovendo maior sustentabilidade e redução de custos para consumidores residenciais.

Palavras-chave: Energia eólica. Monitoramento de vento. Arduino. Viabilidade econômica.

ABSTRACT

This work aimed to develop a wind monitoring system for analyzing the feasibility of residential wind power generation using Arduino. The project involved collecting data on wind speed and intensity over three months to analyze the collected data and assess the feasibility of implementing a generation system using small-scale wind turbines. Based on these data, the most suitable wind turbines were sized, identifying the most efficient model for the studied location. Additionally, an analysis of the investment payback period was conducted, considering the system's economic feasibility. The study highlights that detailed wind monitoring is essential for optimizing the selection of wind turbines and ensuring the economic feasibility of installing a residential wind power system. This study contributes to the expansion of small-scale renewable energy generation, promoting greater sustainability and cost reduction for residential consumers.

Keywords: Wind energy, Wind monitoring, Arduino, Economic feasibility.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Dinâmica de circulação atmosférica e formação do vento. 17
Figura 2 – Brisa diurna 18
Figura 3 - Brisa Noturna 18
Figura 4 - Torre de medição (TMA) 19
Figura 5 - Anemômetro e anemóscopio 20
Figura 6 - Representação esquemática de um anemômetro de copos, evidenciando as forças do vento que atuam sobre suas superfícies. 21
Figura 7 - Entrada simples de velocidade do vento (representada pela linha sólida) e a resposta de um anemômetro de copo (representada pela linha tracejada). 22
Figura 8 - Esquema ilustrativo de anemoscópio. 23
Figura 9 - Rosa dos ventos variações de direção e velocidade do vento 24
Figura 10 - Distribuição de Weibull 25
Figura 11 - Fluxo de ar através de uma área transversal A 27
Figura 12 - Configuração de um aerogerador de eixo horizontal 28
Figura 13 - Detalhe das funções dos componentes dos aerogeradores 28
Figura 14 – Principais componentes construtivos microturbina eólica. 29
Figura 15 – Diagrama de blocos do sistema de geração. 30
Figura 16 - Curva de potência de um aerogerador 31
Figura 17 – Diagrama sistema off grid 33
Figura 18 – Arduino Uno 35
Figura 19 – Sensor de Velocidade do vento NRG 40C 36
Figura 20 – Sensor de direção de Vento NRG Systems 200M 36
Figura 21 - Circuito empregado para realização das medições 37
Figura 22 – Circuito físico empregado para realização das medições 38
Figura 23 - Localização do estudo sobre o vento 40
Figura 24 - Local de instalação da estação de coleta de dados. 41
Figura 25 - Localização do estudo sobre o vento 41
Figura 26 – Média de vento mensal da cidade de Garanhuns - PE 42
Figura 27 – Distribuição de Weibull 43
Figura 28 - Curva de potência aerogerador Razec. 45
Figura 29 - Curva de potência aerogerador Notus 138 45
Figura 30 - Curva de potência aerogerador Gerar 246 46

Figura 31 – Curva de potência aerogerador Verme 555 47
Figura 32 - Curva de potência aerogerador WINDSPOT 1,5 KW.....47
Figura 33 - Curva de potência aerogerador SilentWind 48
Figura 34 - Curva de potência aerogerador AR TurbineBreeze 49
Figura 35 - Curva de potência aerogerador HY Energy – HY 600 W.....49
Figura 36 - Curva de potência aerogerador HY Energy – HY 1000 W.....50
Figura 37 - Curva de potência aerogerador HY Enerrgy – HY 1500 W.....50
Figura 38 - Curva de potência aerogerador HY Enerrgy – HY 3000 W.....51
Figura 39 - Curva de potência aerogerador Inverter 800 W 52
Figura 40 - Curva de potência aerogerador Inverter 1000 W 53
Figura 41 – Fluxograma da viabilidade técnica 54
Figura 42 – Fluxograma da viabilidade econômica 54
Figura 43 - Datalogger em operação durante o monitoramento.....55
Figura 44 - Distribuição de Weibull para os meses analisados 56
Figura 45 - Distribuição de Weibull Ajustada para Cada Mês 56
Figura 46 – Distribuiçõ das clases de vento.....58
Figura 47 – Rosa dos Ventos para local de estudo.....58
Figura 48 – Geração instantânea aerogerador Razec 59
Figura 49 – Payback para o sistema em estudo 67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Média dos ventos da cidade de Garanhuns- PE 42
Tabela 2 – Dados Gerais aerogerador Razec. 44
Tabela 3 - Dados Gerais aerogerador Notus 138.....45
Tabela 4 - Dados gerais aerogerador Gerar 246.....46
Tabela 5 - Dados gerais aerogerador Verme 555 46
Tabela 6 - Dados gerais aerogerador WINDSPOT 1,5 KW.....47
Tabela 7 - Dados gerais aerogerador SilentWind.....48
Tabela 8 - Dados gerais aerogerador AR TurbineBreeze 48
Tabela 9 - Dados gerais aerogerador HY Energy – HY 600 W 49
Tabela 10 - Dados gerais aerogerador HY Energy – HY 1000 W 50
Tabela 11 - Dados gerais aerogerador HY Energy – HY 1500 W 50
Tabela 12 - Dados gerais aerogerador HY Energy – HY 3000 W 51
Tabela 13 - Dados gerais aerogerador Inverter 800 W 52
Tabela 14 - Dados gerais aerogerador Inverter 1000 W 52
Tabela 15 – Dados de Vento.....57
Tabela 16 – Geração mensal para cada modelo.....60
Tabela 17 – Média da geração para cada modelo 60
Tabela 18 - Fator de capacidade.....61
Tabela 19 – Custo total dos aerogeradores 62
Tabela 20 – Custo de implantação do aerogerador Verne 555 65
Tabela 21– Custo de implantação do aerogerador Gerar 246 65
Tabela 22– Custo de implantação do aerogerador Inverter 1000 W 65
Tabela 23 – Reajuste tarifário 66
Tabela 24 – Economia acumulada ao longo dos anos.....66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IFPE	Instituto Federal de Pernambuco
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PRORET	Procedimento de Regulação Tarifária

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 14
1.1. Objetivos 14
1.1.1. Objetivos específicos 14
1.2. Estrutura do Trabalho 14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 16
2.1. Tipos de fontes de Energia 16
2.1.1. O vento 16
2.2. Medição de vento e Instrumentação 19
2.2.1. Torre anemométrica 19
2.2.2. Característica do Vento 23
2.2.3. Potencial Eólico 26
2.3. Funcionamento de um Aerogerador e seus componentes 27
2.3.1. Nacele 28
2.4. Aerogeradores de pequeno porte 29
2.4.1. Curva de Potência 30
2.4.2. Mini e Microgeração por meio de sistema off-grid 32
2.5. Viabilidade Econômica de Projetos de Investimento 33
3. MATERIAL E MÉTODOS 34
3.1. Coleta de dados 34
3.1.1. Equipamentos utilizados 34
3.2. Leitura dos sensores e Armazenamento dos Dados 37
3.2.1. Leitura da direção do vento 38
3.2.2. Leitura de Velocidade do Vento 39
3.3. Local de medição 39
3.3.1. Histórico de vento do local 41
3.4. Análise de Aerogeradores de pequeno porte 43
3.4.1. Curva de potência e dados gerais 44
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 54
4.1. Levantamento de informações eólicas 54
4.1.1. Análise dos dados coletados 55
4.1.1. Densidade de probabilidade de Weibull 55
4.1.2. Velocidade média do vento 57

4.1.3. Distribuição da velocidade do vento ao longo do tempo 57
4.1.4. Rosa dos ventos 58
4.2. Comparação entre os Aerogeradores 59
4.2.2. Custo para implantação do sistema 62
4.3. Viabilidade financeira 66
CONCLUSÕES 69
REFERÊNCIAS 70

1. INTRODUÇÃO

A busca por fontes de energias limpas tem ganhado destaque mundial visto à crescente preocupação com sustentabilidade e a necessidade de diversificação da matriz energética. O Brasil é um país que é reconhecido como um dos maiores produtores de energia renovável do mundo.

1.1. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo realizar o estudo de vento da região na cidade de Garanhuns-PE, e com tais dados e as respectivas curvas de potências dos aerogeradores de pequeno, analisar qual se adequa melhor os dados de vento coletados.

Este estudo é essencial para avaliar a viabilidade da utilização de aerogeradores de pequeno porte na geração de energia elétrica de forma sustentável e eficiente.

1.1.1. Objetivos específicos

- Realizar a coleta e análise dos dados de velocidade e direção do vento no local de estudo.
- Realizar análise de curva de potência dos principais aerogeradores de pequeno porte encontrados no mercado.
- Avaliar o desempenho dos aeroegeradores utilizando a curva de potência dos mesmos e os dados coletados de vento.
- Analisar a viabilidade técnica e financeira da implantação do sistema eólico residencial.

1.2. Estrutura do Trabalho

No capítulo 2, é apresentado a fundamentação teórica sobre a energia eólica, abordando conceitos relacionados às fontes de energia, medição de vento, funcionamento dos aerogeradores e análise da viabilidade econômica de sistema eólicos residenciais.

No capítulo 3, é apresentado a metodologia abordada para coleta e análise dos dados, mostrando os equipamentos empregados, bem como o processo de coleta dos dados de vento e as características do local estudado.

No capítulo 4, é apresentado os resultados das coletadas de dados, feito a análise e avaliação do desempenho dos aerogeradores e feita a comparação de diversos modelos encontrado no mercado.

No capítulo 5, é apresentado as conclusões do estudo bem como as conclusões econômicas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica que sustenta os principais temas abordados neste trabalho. Para isso, são utilizados embasamentos oriundos de pesquisas bibliográficas e documentos relevantes. Serão discutidos tópicos como fontes de energia renovável, análise e medição do vento, energia eólica residencial e o retorno de investimento por meio do método de *payback*.

2.1. Tipos de fontes de Energia

As fontes de energia não renováveis são finitas e esgotáveis, pois sua reposição na natureza ocorre de forma extremamente lenta, podendo levar milhões de anos sob condições específicas de pressão e temperatura. Exemplos dessas fontes incluem petróleo, carvão mineral e gás natural.

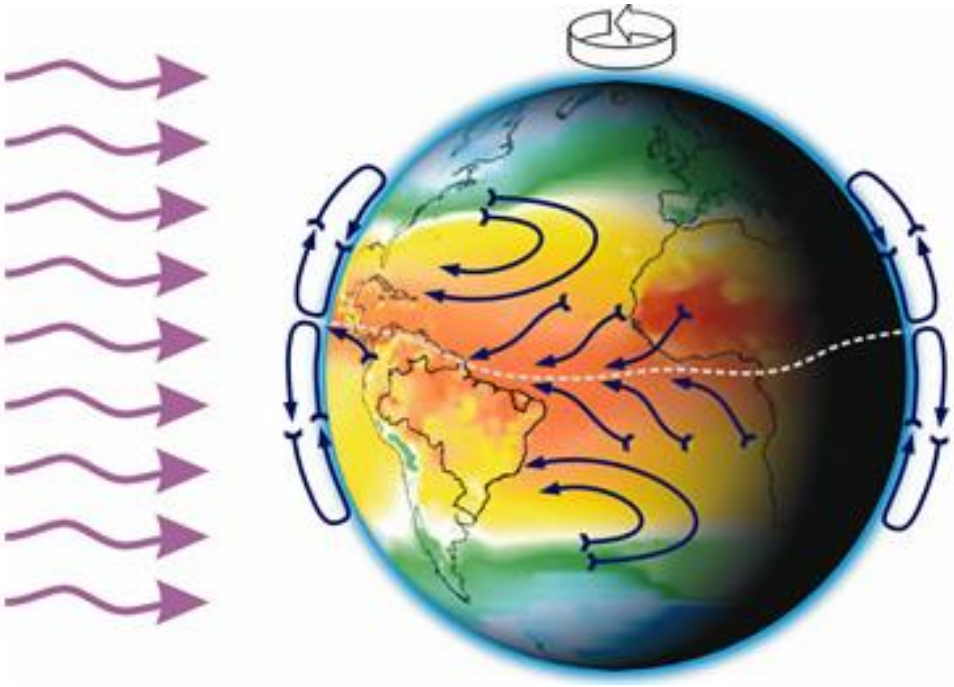
Por outro lado, as fontes de energia renovável destacam-se por serem inesgotáveis, uma vez que são continuamente renovadas ao longo do tempo. Entre os exemplos de fontes renováveis, estão a hídrica, solar, geotérmica, biomassa e eólica. Além disso, essas fontes são consideradas limpas, pois não emitem gases que contribuem para o efeito estufa (EPE, 2024).

2.1.1. O vento

De acordo com Tolmasquim (2016), o vento é gerado pelo aquecimento desigual da superfície da Terra, o que permite concluir que a energia eólica é uma forma indireta de energia solar. Esse aquecimento desigual entre as diferentes regiões da superfície terrestre e da atmosfera cria gradientes de pressão que promovem o movimento das massas de ar. Além disso, o efeito Coriolis, causado pela rotação da Terra, também influencia o deslocamento dessas massas.

As regiões tropicais, por receberem radiação solar quase perpendicular, são mais aquecidas em comparação às regiões polares, que apresentam temperaturas mais baixas. Essa diferença de temperatura cria gradientes térmicos: o ar quente nas regiões tropicais, localizado em baixas altitudes, tende a subir, sendo substituído por massas de ar mais frias provenientes das regiões polares. Esse ciclo contínuo dá origem aos ventos (Dutra, 2021), conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Dinâmica de circulação atmosférica e formação do vento.

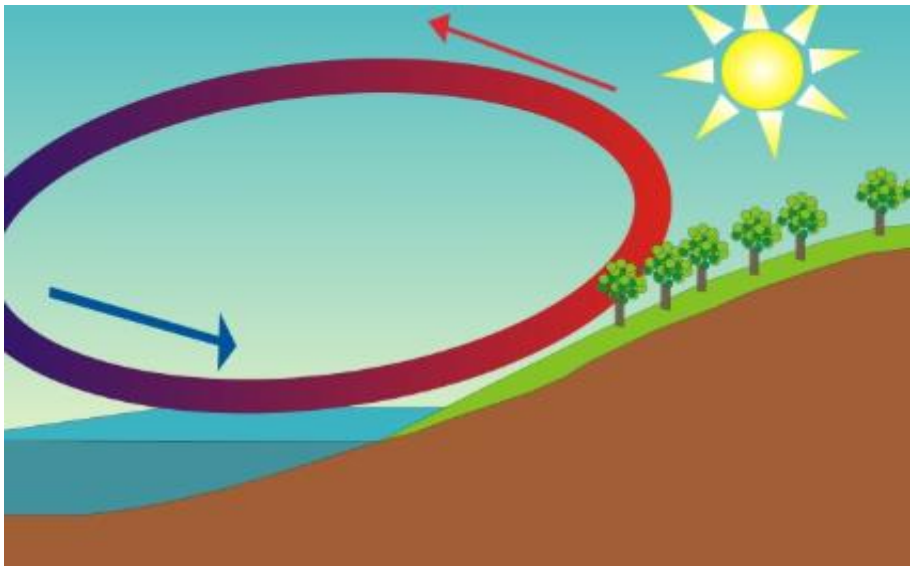


Fonte: CEPEL (2001).

Devido à inclinação de 23,5° do eixo da Terra em relação ao plano de sua órbita ao redor do Sol, ocorrem variações sazonais na distribuição da radiação solar recebida pela superfície terrestre. Essas variações influenciam a intensidade e a direção dos ventos, dando origem aos chamados ventos continentais ou periódicos, que incluem as monções e as brisas.

Durante o período diurno, a temperatura do ar aumenta em função da capacidade da Terra de refletir a radiação solar. Esse fenômeno dá origem às correntes de ar que sopram do mar em direção à terra, conhecidas como brisas marítimas (Fabricio, 2017). Essa dinâmica está ilustrada na Figura 2.

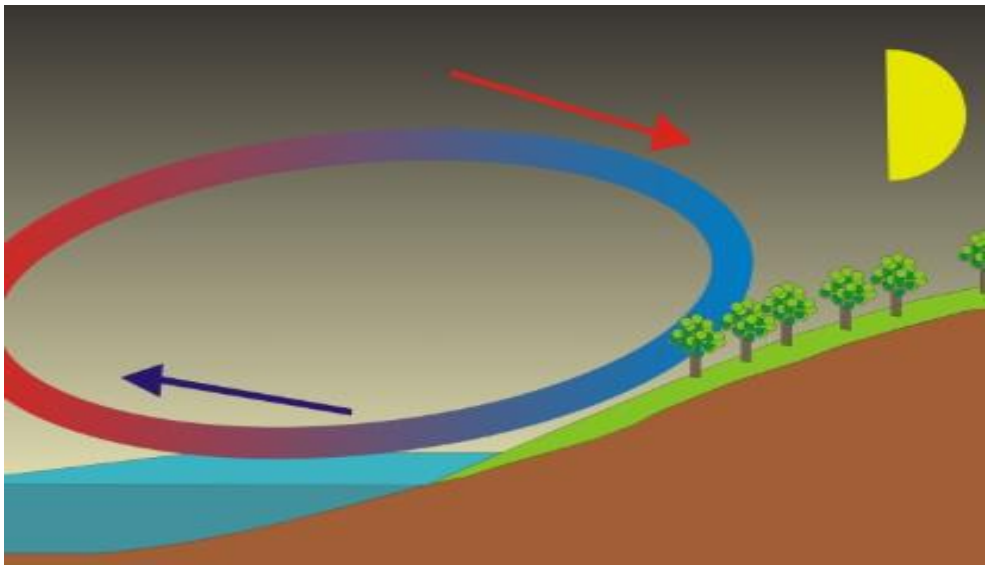
Figura 2 – Brisa diurna



Fonte: Blog História da Energia Eólica e suas Tecnologias

No período noturno a temperatura da terra esfria mais rapidamente do que a temperatura da água do mar assim ocorrendo a brisa terrestre que sobra da terra para o mar (Fabricio, 2017). Tal dinâmica está ilustrada na Figura 3, que demonstra do fluxo de ar resultante dessa variação térmica.

Figura 3 - Brisa Noturna



Fonte: Blog História da Energia Eólica e suas Tecnologias

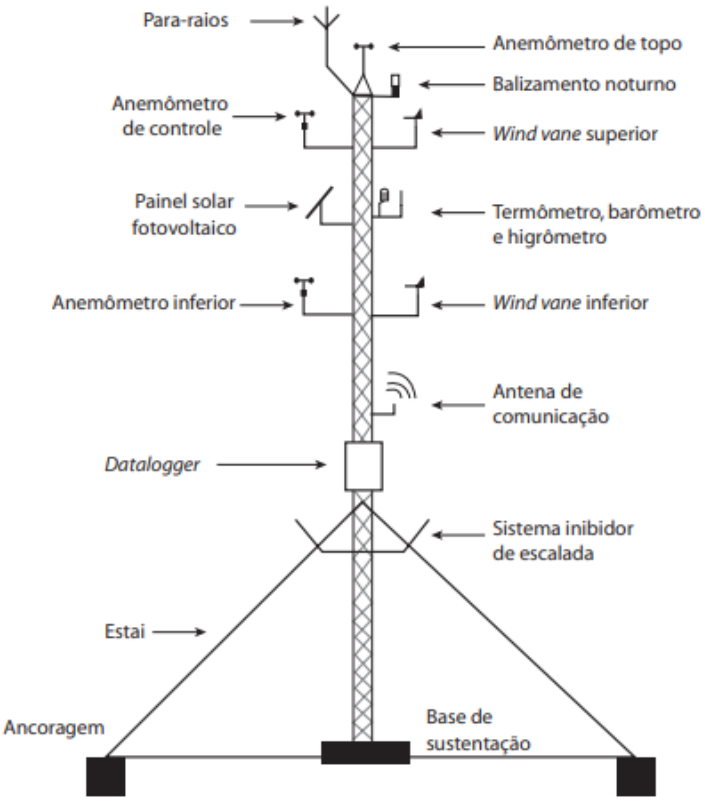
Tais ciclos de brisas marítimas e terrestres mostram como a diferença de temperatura entre terra e o mar influenciam os padrões de circulação do ar, sendo assim um exemplo prático de energia térmica em energia cinética.

2.2. Medição de vento e Instrumentação

2.2.1. Torre anemométrica

A torre de medição atmosférica (TMA) é um equipamento amplamente utilizado para monitorar condições climáticas e fornecer dados essenciais para estudos meteorológicos e projetos, como os de energia eólica. Geralmente, ela é equipada com sensores de alta precisão que medem grandezas como velocidade e direção do vento. Esses dados são coletados e armazenados para análise posterior, sendo fundamentais para avaliar o potencial energético de uma região e entender variações climáticas. A Figura 4 apresenta um exemplo de TMA.

Figura 4 - Torre de medição (TMA)

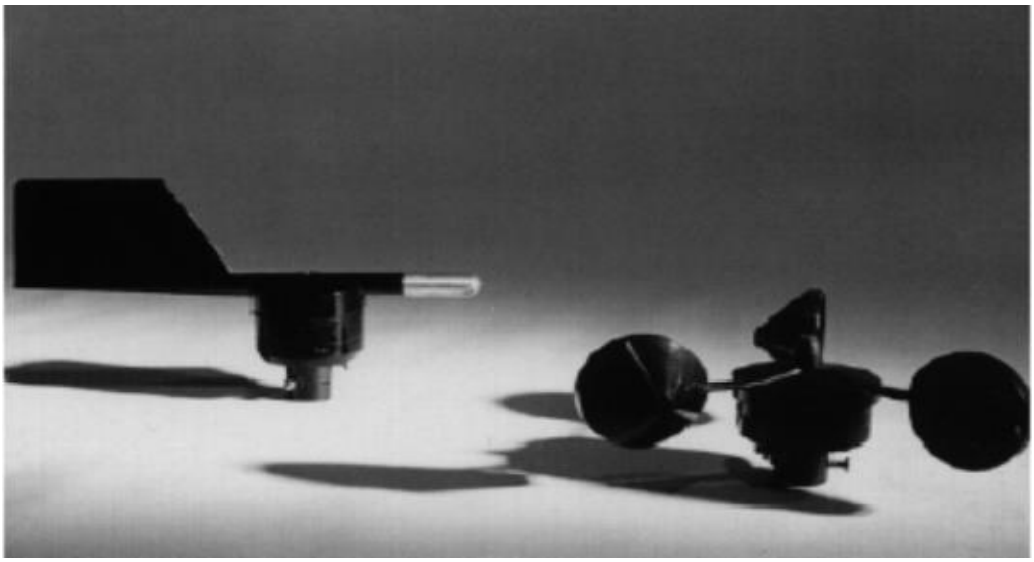


Fonte: INMET (2015).

2.2.1.1. Anemômetro

Para medir a velocidade e a direção do vento, é comumente utilizado um anemômetro de copos e um anemóscopio. O anemômetro de copos possui um eixo vertical e utiliza três ou quatro copos para captar o vento e medir sua velocidade. Já o anemóscopio é responsável por determinar a direção do vento (CARNEIRO, 2013), conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5– Anemômetro e anemóscopio

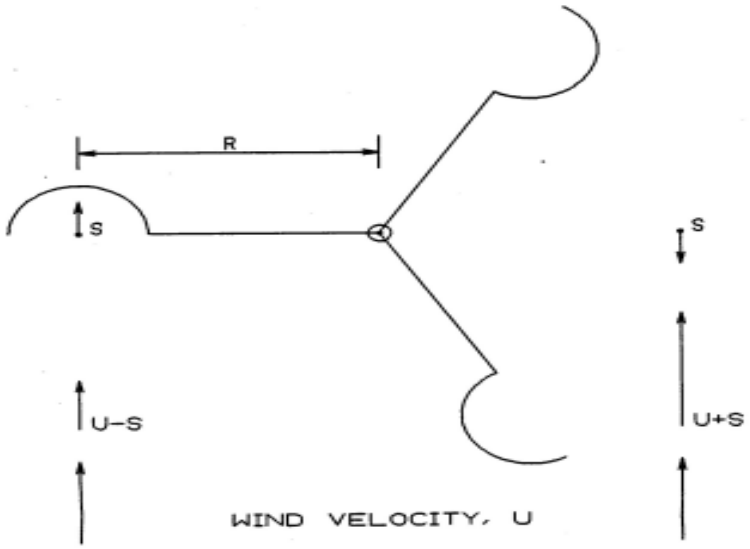


Fonte: Castro (2009).

2.2.1.2. Anemômetro de copos

De acordo com Pereira Filho (2003), o anemômetro de copos, ilustrado na Figura 5, gira devido à diferença no coeficiente de arrasto entre a face aberta e a face lisa de cada copo. A face aberta, ao receber o vento, apresenta maior resistência em relação à face lisa, o que gera o movimento rotacional característico do equipamento. Essa dinâmica é fundamental para a medição da velocidade do vento, conforme representado na Figura 6.

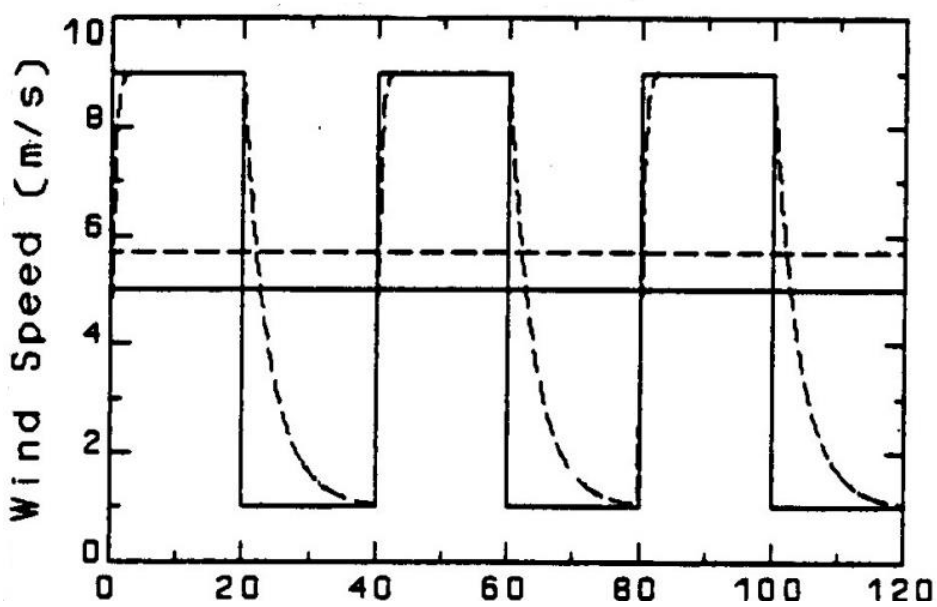
Figura 6 - Representação esquemática de um anemômetro de copos, evidenciando as forças do vento que atuam sobre suas superfícies.



Fonte: Pereira Filho (2003).

A saída do sinal de um anemômetro de copos é gerada pela taxa de rotação mecânica dos copos, cujas pás estão conectadas a um transdutor elétrico. Esse transdutor gera um sinal de voltagem DC proporcional à taxa de rotação da seta e, consequentemente, à velocidade do vento. Para obter soluções convencionais para a função de resposta a um passo, rampa ou sinal senoidal, é necessário assumir que a constante de tempo dependa da velocidade média do vento, e não da velocidade instantânea. Se a constante de tempo variar inversamente com a velocidade do vento, a equação diferencial torna-se não-linear, dificultando a obtenção de resultados. Um exemplo simples dessa dinâmica pode ser observado na Figura 7, onde a velocidade do vento é representada por uma onda retangular (Pereira Filho, 2003).

Figura 7 - Entrada simples de velocidade do vento (representada pela linha sólida) e a resposta de um anemômetro de copo (representada pela linha tracejada).



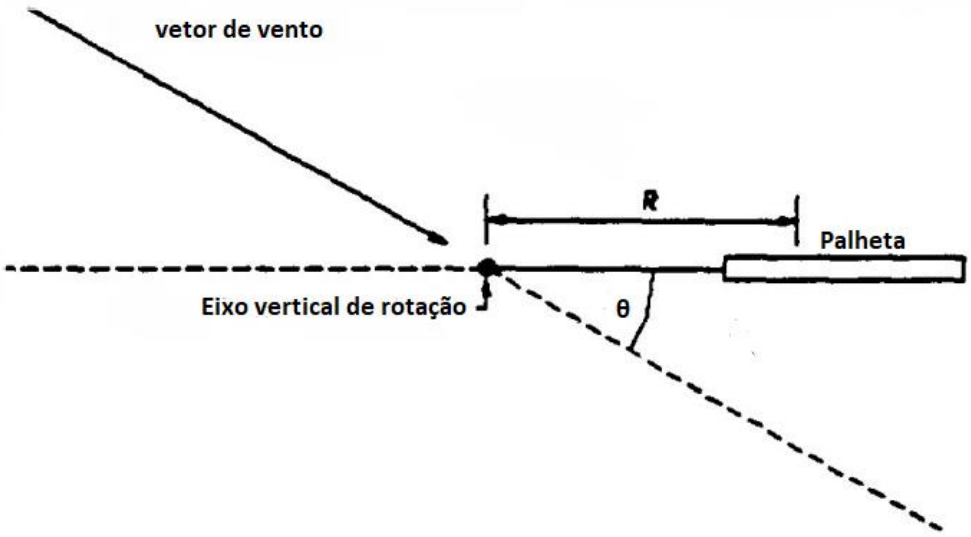
Fonte: Adaptado Pereira Filho (2003).

Como a constante de tempo é inversamente proporcional à velocidade do vento, ela tende a ser alta quando a velocidade do vento é baixa, e baixa quando a velocidade do vento é alta. Isso significa que, em condições de vento fraco, o anemômetro responde mais lentamente às variações de velocidade, enquanto, em condições de vento forte, a resposta é mais rápida. Esse comportamento é importante para entender o desempenho do equipamento em diferentes condições de vento e para ajustar adequadamente os cálculos de medição

2.2.1.3. Anemoscópio

Conforme descrito por Pereira Filho (2003), um *a*nemoscópio é uma lâmina plana ou aerofólio capaz de girar em torno de um eixo vertical. Em equilíbrio estático ele se orienta na direção do vetor do vento, como mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Esquema ilustrativo de anemoscópio.



Fonte: Adaptado Pereira Filho (2003).

O anemoscópio mais utilizado é um potenciômetro simples, instalado de forma concêntrica com a lâmina vertical, sendo responsável por transformar o ângulo azimutal (que varia de 0° a 360°) em uma tensão proporcional a esse ângulo. Esse tipo de potenciômetro geralmente apresenta uma área morta de 3° a 5°, normalmente voltada para o Norte (Pereira Filho, 2003).

2.2.2. Característica do Vento

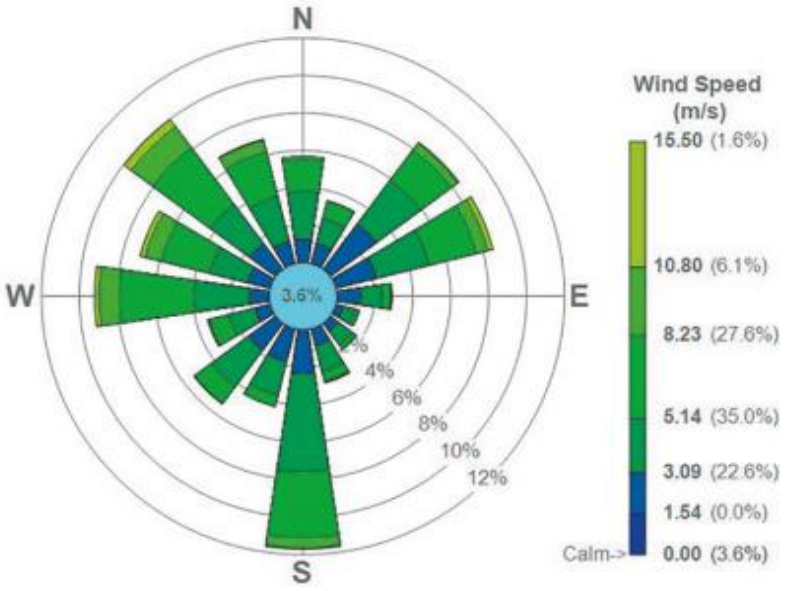
2.2.2.1. Direção e velocidade do vento

O vento, embora seja uma fonte de energia limpa, sem emissões de gases de efeito estufa e sem custo, apresenta desafios significativos. Trata-se de um recurso não controlável, ao contrário da água em represas de hidrelétricas, que pode ser armazenada e controlada. Além dessa impossibilidade de controle, a velocidade e a direção do vento possuem características aleatórias, determinadas por fatores geográficos, climáticos e pela altitude em relação ao solo.

De acordo com Vian et al. (2021), na representação da rosa dos ventos, o tamanho de cada barra indica a frequência com que o vento sopra em determinada direção, o que ajuda a identificar as direções predominantes. No entanto, essa informação isolada não é suficiente para avaliar o potencial energético de cada

direção, pois a produção de energia das turbinas depende principalmente da velocidade do vento. Por exemplo, ventos fracos podem ocorrer em uma direção 90% do tempo, enquanto ventos mais fortes podem ocorrer em outra direção apenas 10% do tempo. Nesse caso, embora a direção com ventos mais fortes seja menos frequente, ela pode gerar mais energia. Para uma análise mais precisa, a rosa dos ventos é subdividida em cores, que indicam tanto a velocidade do vento (pela cor) quanto sua frequência (pelo tamanho da barra) (Vian et al., 2021), como ilustrado no Figura 9.

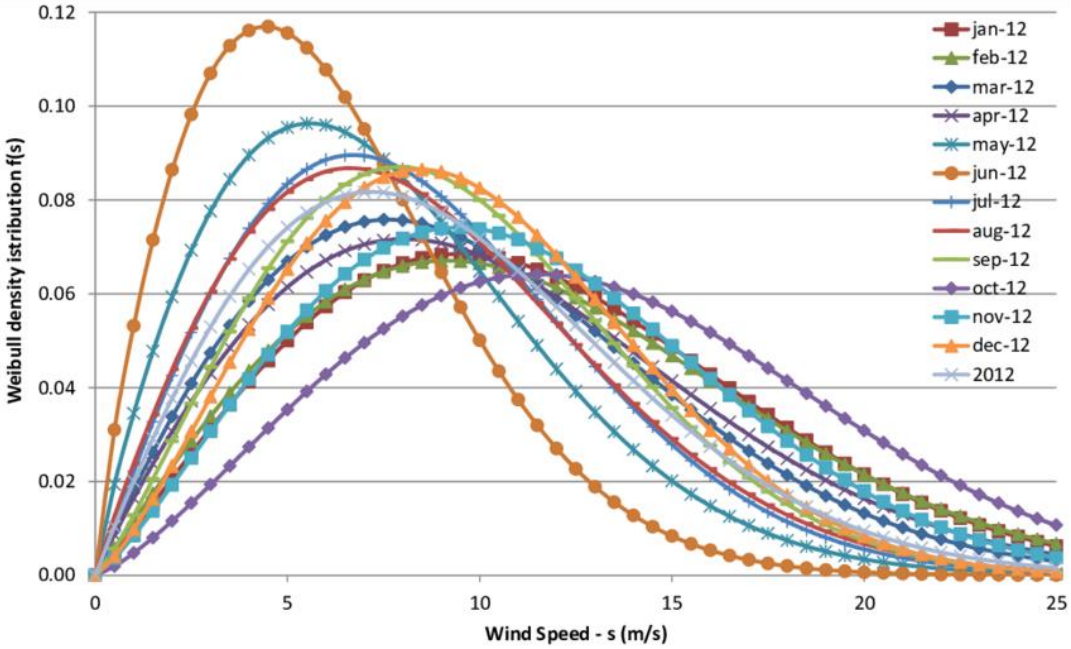
Figura 9 - Rosa dos ventos variações de direção e velocidade do vento



Fonte: Vian et al., 2021.

A análise detalhada das ocorrências e intensidades da velocidade do vento em diferentes direções geralmente revela que sua variação segue um padrão típico de uma distribuição de probabilidades de Weibull, como ilustrado na Figura 10 (VIAN et al., 2021). Na figura, também é possível observar as diferenças na distribuição para meses distintos. Isso ocorre porque o vento é influenciado pelas condições climáticas locais. Embora a distribuição de Weibull mantenha sua característica geral, seus parâmetros de forma e escala variam ao longo dos diferentes períodos do ano.

Figura 10 - Distribuição de Weibull



Fonte: Adaptado Vian et al., 2021.

2.2.2.2. Intensidade do vento

Segundo Tester et al. (2005), em uma superfície plana idealizada e lisa, a velocidade do vento aumenta com a elevação aproximadamente pela potência de 1/7, de acordo com a Equação 1:

$$\frac{v2}{v1} = \left(\frac{h2}{h1}\right)^{n} \qquad (1)$$

Onde $v1$ e $v2$ são as velocidades do vento nas alturas h1 e h2, respectivamente, e n é o coeficiente da lei de potência, que varia conforme a estabilidade da atmosfera. Para terrenos planos, n é aproximadamente 1/7 ou 0,143.

Em termos de geração de energia, torres de maior altura oferecem melhor estabilidade na velocidade do vento e menor turbulência. No entanto, para que as torres sejam mais altas, é necessário que as partes construtivas suportem um peso maior e esforços mecânicos mais intensos (Vian et al., 2021).

Para avaliar a viabilidade de um projeto de usina eólica é essencial realizar

um levantamento preciso da rosa dos ventos e da distribuição da velocidade do vento (Vian et al., 2021). Esse levantamento de dados de vento do local é um pré-requisito para a implantação de uma turbina eólica (Tester et al., 2005).

2.2.3. Potencial Eólico

A energia presente no vento é classificada como energia cinética, resultante do movimento das massas de ar, conforme descrito na Equação 2. Ressalta-se que as equações utilizadas foram extraídas de Dutra (2021)

$$E = \frac{m\,v^2}{2} \tag{2}$$

Sendo:

E = energia cinética [j];

M = massa de uma partícula de ar [kg]

V = velocidade da massa de ar em movimento [m/s].

Onde energia por unidade de tempo, também conhecida como potência, é expressa pela Equação (3)

$$P = \frac{E}{\Delta t} \tag{3}$$

Sendo:

P= potência [W]

T = tempo [s]

E = Emergia [J]

Substituindo a (2) em (1) temos a seguinte equação:

$$P = \frac{mv^2}{2\,\Delta t} \tag{4}$$

Considerando uma massa de ar m em movimento com uma velocidade v, onde a taxa de fluxo de massa é dada por $m/\Delta t$, essa relação pode ser calculada da seguinte forma:

$$\frac{m}{\Delta t} = p\ v\ A \tag{5}$$

Sendo:

p = massa específica de ar [Kg/m³]

A = área [m²]

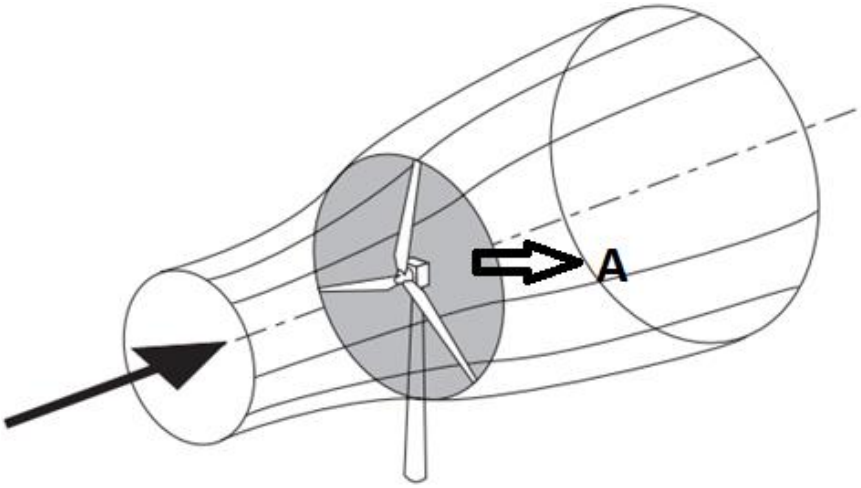
Por meio da combinação das equações mencionadas anteriormente, é possível derivar a expressão que representa o potencial energético do vento que atravessa a seção A, como ilustrada na Figura 11.

$$P = \frac{1}{2}\ p\ A\ v^3 \tag{6}$$

Onde:

P = potência [J/s =W]

Figura 11 – Fluxo de ar através de uma área transversal A



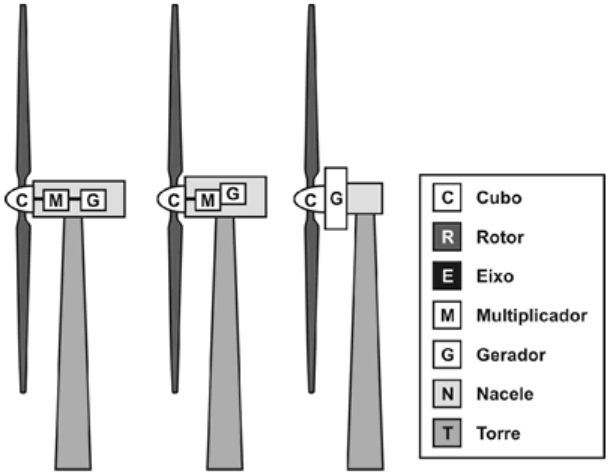
Fonte: Adaptado Burton (2008)

2.3. Funcionamento de um Aerogerador e seus componentes

Os aerogeradores de eixo horizontal são os modelos mais comuns para a geração de energia eólica, eles são diferenciados pelo formato da nacele, a presença

ou não de uma caixa multiplicadora (*gearbox*) e o tipo de gerador utilizado, que pode ser convencional ou multipolos. A seguir na Figura 12 são apresentados os principais componentes e o processo operacional simplificado dos aerogeradores (DUTRA, 2021)

Figura 12 - Configuração de um aerogerador de eixo horizontal

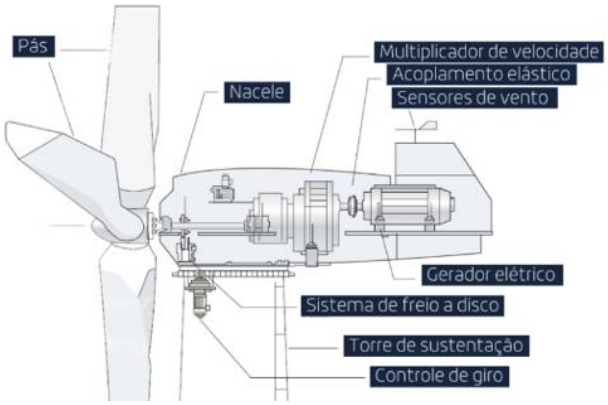


Fonte: Dutra, Ricardo. Energia eólica: princípios e tecnologias, 2021.

2.3.1. Nacele

A *nacele* é a carcaça localizada no topo da torre de um aerogerador, abriga diversos componentes essenciais para o funcionamento da turbina eólica. Entre os principais componentes que ficam na *nacele*, destacam-se o gerador, a caixa de engrenagens (*gearbox*), sistema de controle, sensores de medição do vento e os motores do sistema de rotação e posicionamento da nacelle (DUTRA, 2021), como apresentado no Figura 13.

Figura 13 - Detalhe das funções dos componentes dos aerogeradores



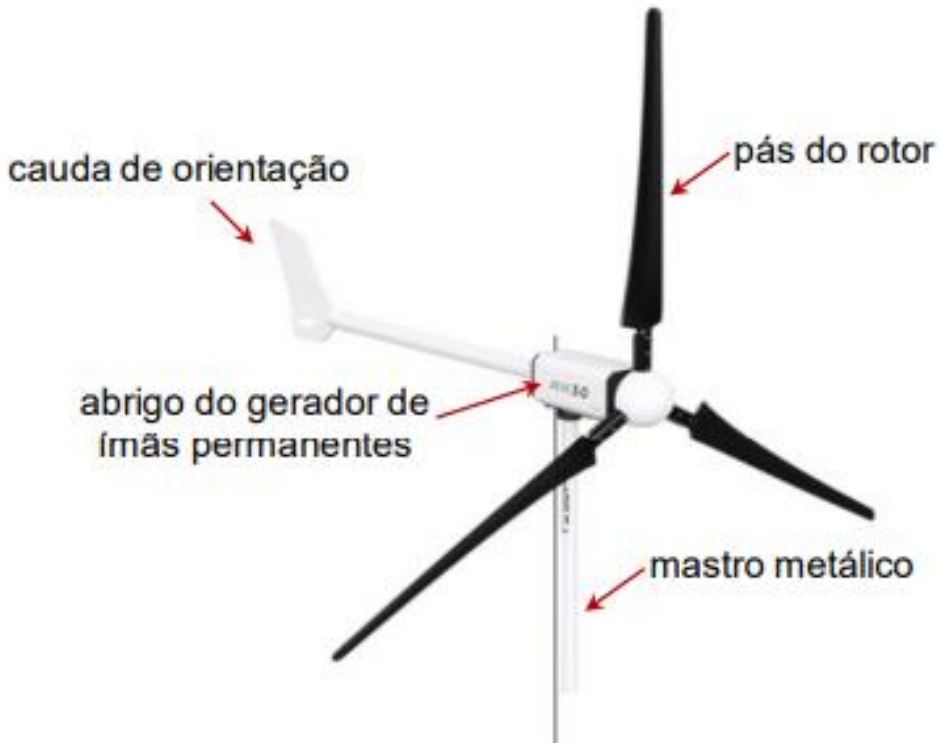
Fonte: Adaptada de COTESA (2024).

2.4. Aerogeradores de pequeno porte

Os aerogeradores de pequeno porte são classificados em microgeradores e minigeradores. Para microgeradores a potência instalada é inferior ou igual a 75 kW, enquanto para minigeradores a potência é superior a 75 kW e inferior a 5 MW, para fontes renováveis de energia elétrica conectadas à rede elétrica (ANEEL, 2018).

De acordo com Tibola (2009), o modelo usualmente utilizado para geração de energia eólica de pequeno porte, principalmente em sistemas isolados, é baseado em um gerador síncrono a imã permanente de fluxo axial, conectado a um banco de baterias através de um retificador. O sistema de excitação a imã permanente é aquele onde a excitatriz auxiliar é um imã permanente, que induz uma tensão nos enrolamentos de armadura ao girar, com a utilização dos imãs permanentes não se faz necessário as escovas. Na figura 14 podemos ver os principais componentes de um aerogerador de pequeno porte.

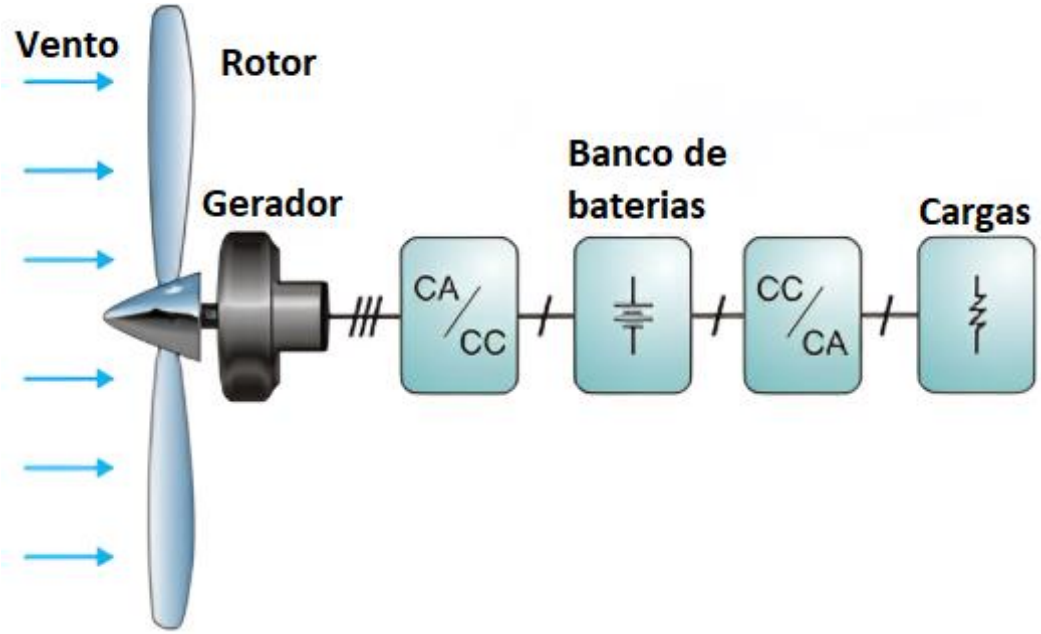
Figura 14 – Principais componentes construtivos microturbina eólica.



Fonte: Lima & Lemos (2022)

De acordo com Tibola (2009), para interligar a geração de energia eólica para o banco de baterias em série é necessário o conversor CA-CC não controlado. Este sistema pode ser visto por meio de blocos na Figura 15, permitindo assim ligar as baterias às cargas CC, ou como ilustrado a um inversor CC-CA e posteriormente as cargas CA. Tal sistema não possui um controle para ajuste de energia produzida pela turbina senso assim a potência entregue à bateria é ditada apenas pela velocidade do vento.

Figura 15 – Diagrama de blocos do sistema de geração.



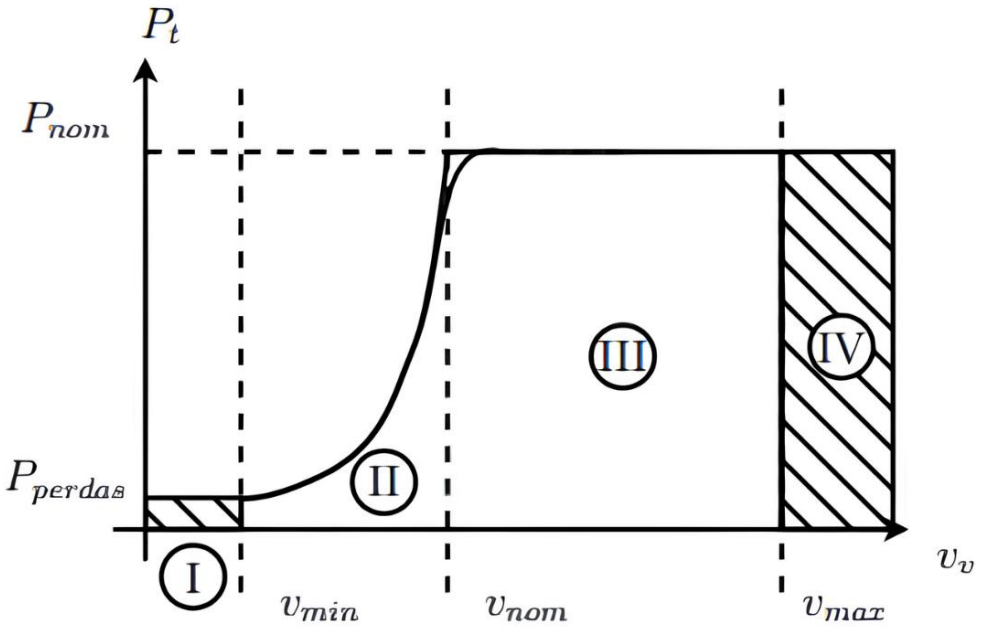
Fonte: Adaptado Tibola (2009)

2.4.1. Curva de Potência

A Figura 16 ilustra o comportamento típico de uma curva de potência, também conhecida como (Curva S) de um aerogerador. Conforme PABOCAR (2025), a curva de potência de um aerogerador é uma ferramenta gráfica crucial para avaliar o desempenho da geração em função da velocidade do vento, permitindo verificar a produção de energia para diferentes condições de operação. A curva de potência é amplamente utilizada na indústria de energias renováveis para diversas aplicações, sendo uma das principais a avaliação do potencial de geração de energia de um parque eólico. Com base na curva de potência das turbinas que serão instaladas, é

possível estimar a quantidade de energia que o Aero será capaz de gerar em diferentes condições de vento.

Figura 16 - Curva de potência de um aerogerador.



Fonte: DOBBIN (2014)

A descrição das regiões de operação de um aerogerador é amplamente abordada na literatura, como apresentado por Carvalho (2020), que detalha os diferentes estágios de operação em função das velocidades do vento

Região I: Velocidade inferior ao vento de partida (Cut-in): Nesta região, a velocidade do vento é inferior à velocidade mínima de partida do aerogerador, também conhecida como vento de Cut-in (Vmin). Nessa condição, o aerogerador permanece estacionário, sem gerar energia.

Região II: Velocidade entre o vento de Cut-in e o vento nominal: A partir do vento de Cut-in até o vento nominal (Vnom), o sistema de controle atua para maximizar a produção de energia. Isso é feito variando a velocidade do gerador, buscando sempre o ponto de máxima potência (CPmax) à medida que a velocidade do vento varia. Esse processo é gerenciado pelo conversor eletrônico, que ajusta o torque elétrico do gerador. Durante essa região, o controle de passo (pitch control) está

praticamente inativo, garantindo apenas que as pás do rotor permaneçam posicionadas para alcançar a máxima eficiência aerodinâmica.

Região III: Velocidade entre o vento nominal e o vento de corte (Cut-out): Nesta faixa, que vai do vento nominal (Vnom) até o vento de corte (Cut-out), o sistema de controle de passo (pitch control) entra em ação para limitar a potência extraída do vento. Esse controle garante que a potência de saída do aerogerador permaneça igual à potência nominal, mesmo que a velocidade do vento continue a aumentar.

Região IV: Velocidade superior ao vento de corte (Cut-out): Quando a velocidade do vento ultrapassa o limite de corte (Cut-out), o controle de passo, em conjunto com os freios mecânicos, é acionado para parar o giro do rotor. As pás do aerogerador são colocadas em um ângulo de ataque de 90° em relação à direção do vento (posição de bandeira), garantindo a segurança do equipamento e evitando danos mecânicos às pás.

2.4.2. Mini e Microgeração por meio de sistema off-grid

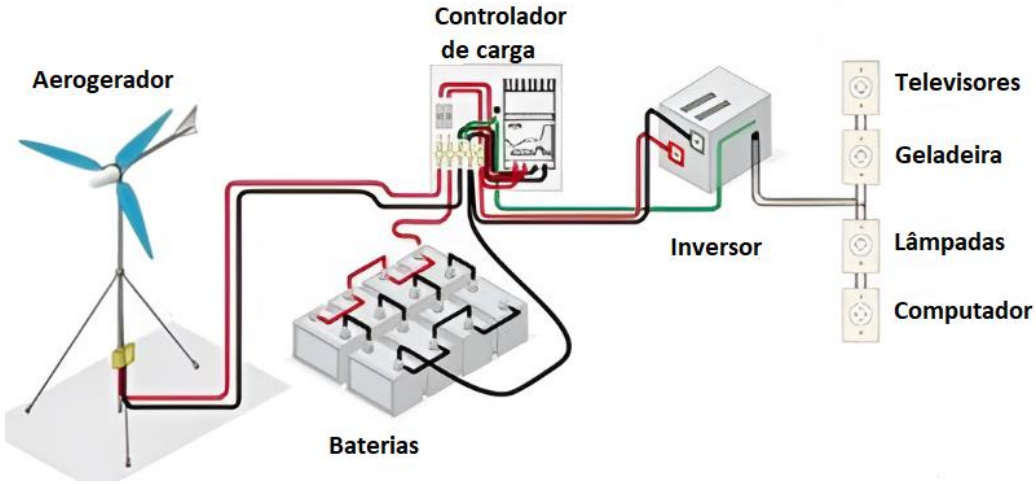
A característica dos sistemas isolados é que eles possuem um gerador que não é conectado à rede elétrica, assim sendo o único fornecedor de energia elétrica. Tal sistema é utilizado com mais frequência em geradores de pequeno porte onde eles têm capacidade máxima de geração de até 80 KW (Figueredo, 2023).

Para estes sistemas se fazem necessário a utilização de baterias como forma de armazenar a energia em momentos em que a potência gerada é maior que a consumida, e posteriormente consumida a energia armazenada nas baterias quando a geração for menor que a potência consumida.

A geração de energia é um tanto irregular e sendo assim se faz necessário a utilização de baterias com um ciclo profundo onde são capazes de suprir a demanda de energia por períodos mais longos e consequentemente suportando vários ciclos de carga e descarga sem que sofram danos ou encurtem a vida útil. Para que o sistema funcione de forma correta é necessário um controlador de carga e descarga das baterias para que evite uma sobrecarga e descarga completa delas. Também é

necessário o inversor, que é responsável por converter a corrente contínua das baterias em corrente alternada (Figueiredo, 2023)

Figura 17 – Diagrama sistema off grid



Fonte: Adaptado Figueiredo (2023)

2.5. Viabilidade Econômica de Projetos de Investimento

A viabilidade econômica é a capacidade de um projeto ou investimento gerar lucro e retornos financeiros positivos. Nada mais é do que avaliar se um projeto é viável do ponto de vista financeiro e se vale a pena ser feito. Tal análise envolve a considerar alguns aspectos financeiros, que são os custos iniciais, receitas esperadas e o tempo necessário para recuperar o capital investido *payback* (Vexpenses, 2024).

Por meio desse cálculo é possível analisar o tempo em meses ou anos necessário para que o valor do lucro seja igual ao valor investido inicialmente (Conta Azul, 2024)

3. MATERIAL E MÉTODOS

O presente capítulo tem como objetivo abordar o desenvolvimento e a avaliação do estudo de geração de energia eólica off-grid para suprir o consumo de energia de uma residência na cidade Garanhuns-PE, com consumo estimado de 250 KWh/mês, valor superior à média nacional de 154 KWh/mês conforme *Balanço Energético Nacional* (EPE,2023). Segundo classificações técnicas adotadas por distribuidoras de energia e estudos da EPE, esse consumo situa-se na faixa de alto consumo residencial, definida por intervalos superiores a 220 kWh/mês. Ao adotar esse perfil como base para o estudo, busca-se representar um segmento relevante da população que apresenta potencial real de adoção de sistemas de geração própria de energia, como o proposto sistema eólico off-grid. Sendo assim, a pesquisa consistiu em coletar os dados de vento dessa localidade. Os dados de vento para os cálculos de velocidade e direção foram obtidos por meio de um Arduino, utilizando um anemômetro de copo (sensor de velocidade do vento) e anemoscópio (sensor de direção do vento), seguidos por análises estatísticas sobre o regime de vento em análise. Com esses dados, foi possível realizar o dimensionamento do sistema de geração de energia elétrica por meio de aerogeradores de pequeno porte, incluindo a seleção do aerogerador mais conveniente para aquela situação de vento, além de baterias e inversores adequados. Além disso, o processo foi validado através de gráficos com a geração e comparações na própria curva de potência do gerador, bem como uma análise econômica que abrange o cálculo do custo inicial e *payback*.

3.1. Coleta de dados

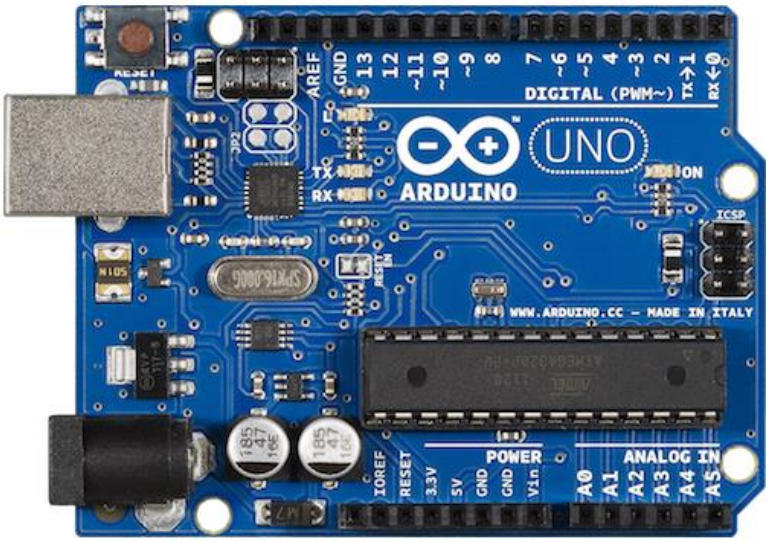
Uma das etapas mais importantes foi a coleta de dados de vento, pois é ela que determinará como dimensionar corretamente o sistema de geração eólica. Para garantir a precisão e a representatividade dos dados, foi utilizado um sistema de monitoramento com equipamentos de precisão e desempenho.

3.1.1. Equipamentos utilizados

3.1.1.1. Arduino Uno

O microcontrolador *Arduino* ilustrado na Figura 18 foi utilizado para gerenciar os sensores de vento (velocidade e direção) e armazenando os dados coletados.

Figura 18 – Arduino Uno



Fonte: Autoria própria

3.1.1.2. Sensor de Velocidade do vento NRG 40C (Figura 12):

O sensor ilustrado na Figura 19 é utilizado para a medição da velocidade do vento. Onde ele é do modelo NRG 40C, o que foi utilizado neste trabalho tem o número de série 179500215520. Ele mede a velocidade de 0 até 76 m/s com uma precisão de ±1,1 m/s. Seu certificado de calibração está disponível no Anexo A, onde ele é submetido a algumas análises para verificar se está apto para realizar as leituras.

Figura 19 – Sensor de Velocidade do vento NRG 40C

Fonte: Autoria própria

3.1.1.3. Sensor de direção do vento NRG 40C (Figura 13*)*

O sensor ilustrado na Figura 20 é utilizado para o rastreamento da direção do vento. O modelo é o NRG 200M, o que foi utilizado neste trabalho tem o número de série 10070 00011177. Ele mede a direção de 0º até 360º com precisão de ±1,6°. Seu certificado de calibração está disponível no Anexo A, onde ele é submetido a algumas análises para verificar se está apto para realizar as leituras

Figura 20 – Sensor de direção de Vento NRG Systems 200M

Fonte: Autoria própria

3.1.1.4. Cartão SD:

Utilizado para o armazenamento dos dados coletados, permitindo registrar as medições em formato CSV para posterior análise.

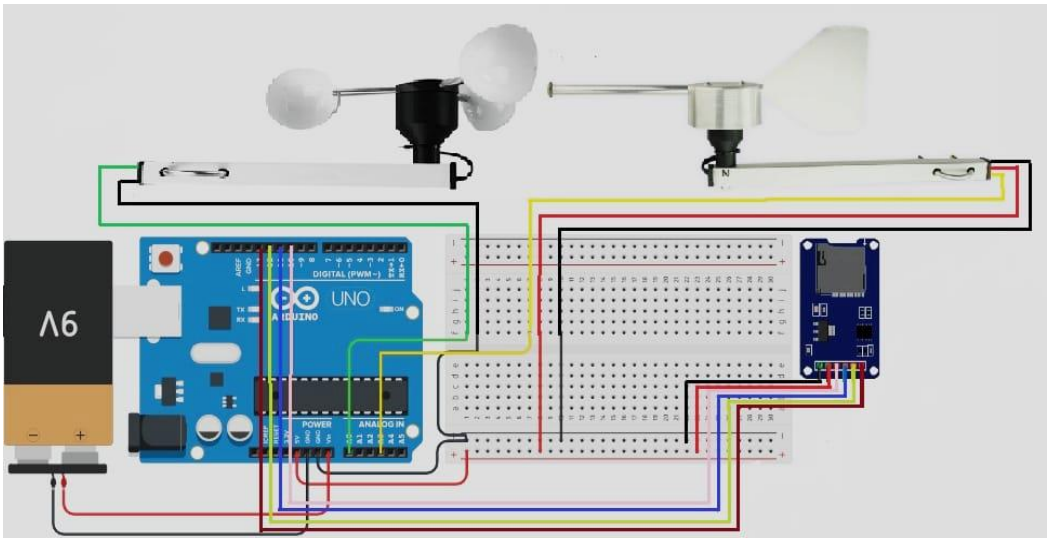
3.1.1.5. Bateria de Alimentação*:*

Garantiu que o datalogger funcionasse continuamente durante o período de monitoramento.

3.2. Leitura dos sensores e Armazenamento dos Dados

O circuito do sistema de monitoramento de vento foi projetado para integrar os sensores de direção e velocidade do vento com o microcontrolador Arduino. Esse circuito inclui componentes que garantem a alimentação adequada dos sensores, a leitura dos sinais gerados e o registro e gravação em um cartão SD, os dados são armazenados em formato CSV. A Figura 21 ilustra o circuito utilizado o software *tinkercad.*

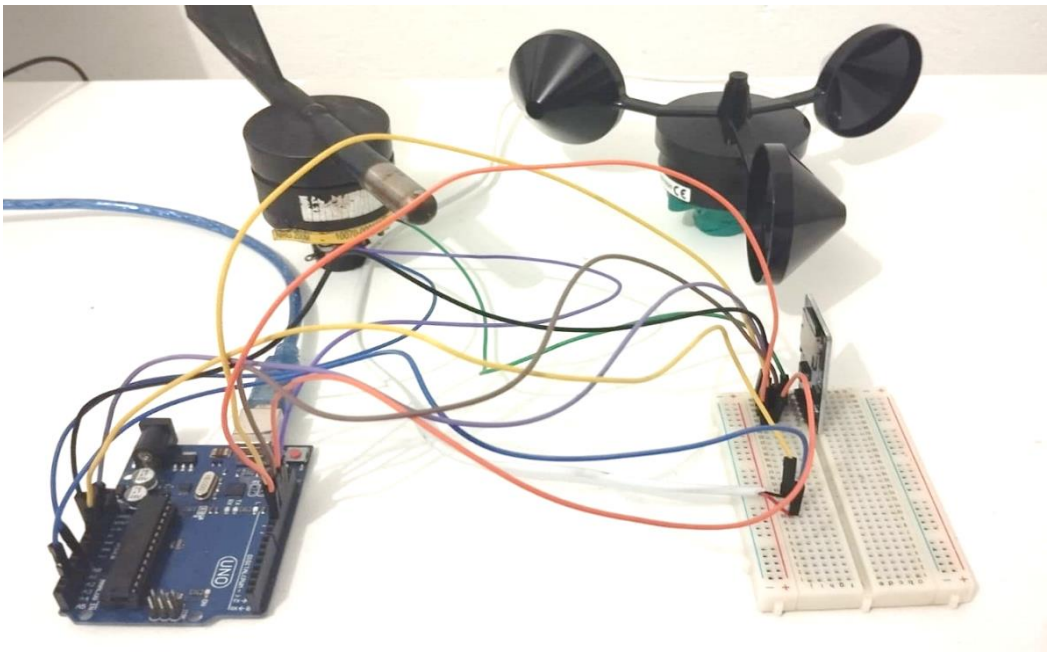
Figura 21 - Circuito empregado para realização das medições



Fonte: Autoria própria

Logo após a simulação do sistema foi realizada a montagem física dos circuitos, conforme mostrado na Figura 22. A montagem envolveu a utilização dos componentes citados anteriormente.

Figura 22 – Circuito físico empregado para realização das medições



Fonte: Autoria própria

A seguir, é explicado de forma sucinta o objetivo de cada parte do código utilizado:

3.2.1. Leitura da direção do vento

Para análise e leitura do vento foi utilizado um sensor de direção que funciona como um potenciômetro onde seu sinal de saída é analógico proporcional ao ângulo da direção do vento. Tal processo pode ser descrito a seguir:

3.2.1.1. Leitura de tensão

- O sensor é alimentado pelo pino de 5V do *Arduino,* e sua saída é conectada a um pino analógico do *Arduino,* onde a saída varia de 0 Volts a 5 Volts.

3.2.1.2. Conversão para Ângulo

- A leitura de tensão é convertida em um valor de ângulo (em graus) utilizando a seguinte função de mapeamento.

$$\hat{A}ngulo\ (°) = Mapear(Tensão, 0.007, 2.5, 0, 360) \qquad (7)$$

Onde:

0.007 V é o valor da tensão mínima do sensor assim correspondendo ao ângulo 0°.

2.5 V é o valor da tensão máximo do sensor correspondendo ao ângulo de 360°.

3.2.2. Leitura de Velocidade do Vento

A leitura da velocidade do vento é realizada com um sensor anemômetro onde sua saída utiliza pulsos para medir a frequência. Essa frequência é proporcional de forma linear à velocidade do vento. A seguir é descrito como foi feito a leitura a contagem dos pulsos e consequentemente a conversão para m/s.

3.2.2.1. Captura dos Pulsos

O anemômetro foi conectado a um pino digital onde ele realiza a contagem dos pulsos.

A cada segundo, os pulsos são lidos, contados e armazenados em uma variável, o que representa a frequência em Hertz (Hz).

3.2.2.2. Conversão de Frequência para Velocidade

A frequência medida (pulsos por segundo) é convertida em velocidade do vento por meio de um fator de conversão conhecido como *slope*, fornecido pelo fabricante. No Anexo B, está disponível o certificado de calibração do equipamento utilizado neste projeto, cujo número de série é 179500215520.

$$Velocidade\ do\ Vento\left(\frac{m}{s}\right) = Frequência\ (Hz) x\ Fator\ de\ econversão \qquad (8)$$

No caso do sensor utilizado, o fator de conversão *sloop* é de 0.762, o que significa que cada Hz equivale a 0.762 m/s.

3.3. Local de medição

O circuito de medição e monitoramento foi instalado em um telhado a seis metros de altura em relação ao solo, assim permitindo a coleta de dados sobre a velocidade e a direção do vento nesta altura. Tal altura foi escolhida por ser o local adequado para a futura instalação de um pequeno aerogerador, assim assegurar que os dados coletados sejam representativos e o mais fiel possível. Os sensores foram posicionados próximos ao laboratório de Informática do IFPE - *Campus* Garanhuns, em uma área com interferência mínima de barreiras, árvores ou edifícios nas proximidades. Dessa forma, esse local pode ser utilizado como referência para o estudo do potencial eólico na região de Garanhuns, uma vez que apresenta condições similares a áreas afastadas dos centros urbanos, onde a instalação de aerogeradores pode ser uma solução viável para a geração de energia renovável.

Na Figura 23, é possível observar que o local onde os sensores anemométricos foram instalados não apresentam bloqueios de prédios ou construções que podem afetar a incidência de vento.

Figura 23 - Localização do estudo sobre o vento

Fonte: Google Earth Pro (GOOGLE, 2024)

Na Figura 23, é apresentado o local onde os sensores de monitoramento foram instalados, destacando a ausência de barreiras físicas que podem interferir nas medições. Já na Figura 24 está a representação estrutural do local, ilustrando o local de instalação dos equipamentos de medição. Essa imagem fornece uma visão clara da localização dos sensores e da configuração adotada para a coleta de dados.

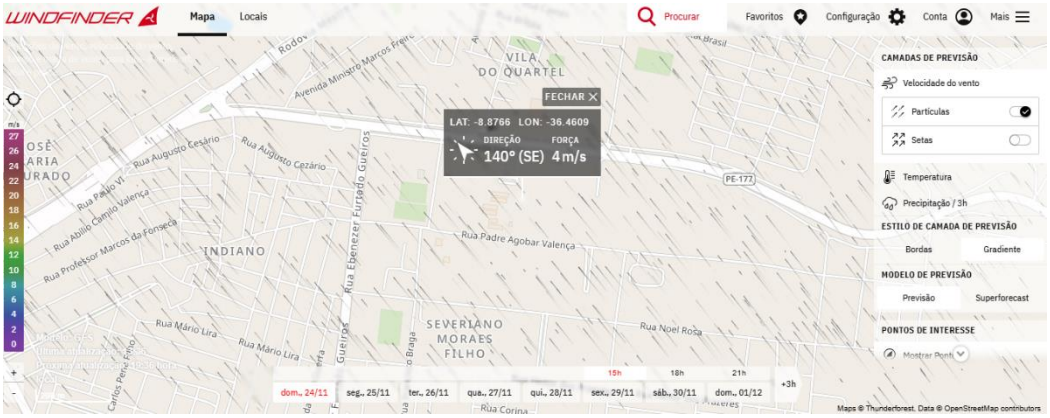
Figura 24 - Local de instalação da estação de coleta de dados.

Fonte: Google Earth Pro (GOOGLE, 2024)

3.3.1. Histórico de vento do local

Na Figura 25, é possível observar a velocidade do vento registrada no dia 24/11/2024, com o auxílio do mapa de vento disponível no site da Windfinder, mostrando assim as condições de vento no local em estudo. Essa imagem mostra a direção predominante e a velocidade do vento registrada naquele momento.

Figura 25 - Localização do estudo sobre o vento

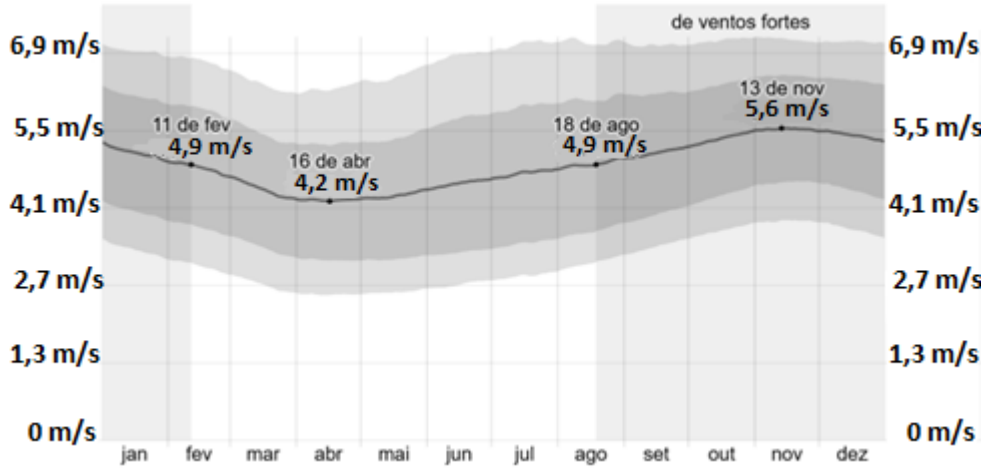


Fonte: *WINDFINDER* (*WINDFINDER*, 2024)

Na Figura 26 podemos ver o histórico mensal de vento da cidade de Garanhuns. Tais medições foram realizadas a uma altura de 10 metros em relação ao solo e são disponibilizadas pelo site WEATHERSPARK. Na imagem, é possível observar a média mensal da velocidade do vento.

Em Garanhuns, a velocidade média horária do vento apresenta pequenas variações sazonais ao decorrer do ano. Onde cerca de 5,8 meses do ano com velocidade acima de 4,9 m/s, e em novembro apresentando uma média de ventos mais fortes, cerca de 5,5 m/s. E para o restante do ano, cerca de 6,2 meses, temos ventos mais calmos com velocidade média de 4,3 m/s.

Figura 26 – Média de vento mensal da cidade de Garanhuns – PE



Fonte: Adaptado WEATHERSPARK (2024)

Os dados registrados no gráfico da Figura 26 foram compilados para a Tabela 1. Para termos a noção do histórico e analisarmos o perfil de distribuição dos ventos, a fim de escolher uma região para análise e monitoramento que pode ter um viés de geração. Foi utilizada a Distribuição de Weibull ilustrado na Figura 27, que é amplamente utilizada no estudo das velocidades de vento.

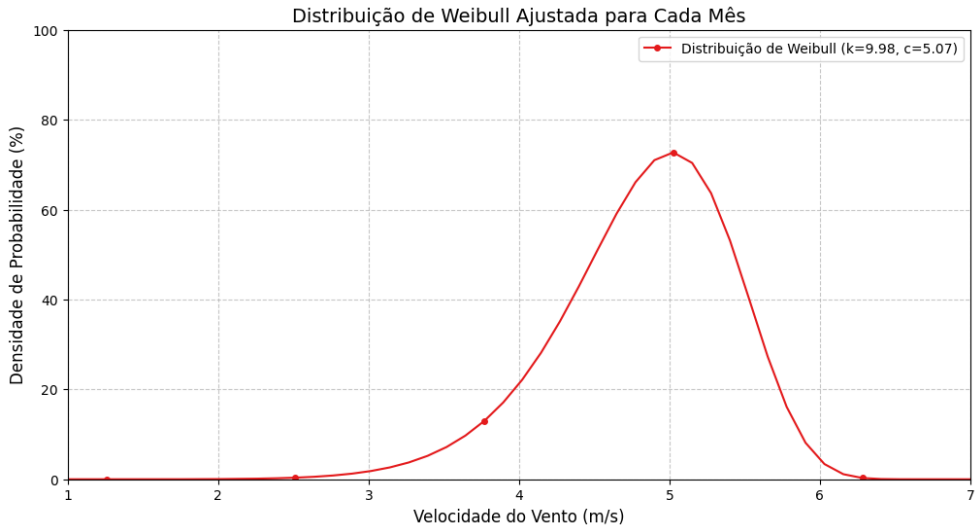
Tabela 1 – Média dos ventos da cidade de Garanhuns- PE

Mês	Média Mensal do vento (m/s)
Janeiro	5,1
Fevereiro	4,8
Março	4,5
Abril	4,3
Maio	4,3
Junho	4,6
Julho	4,7
Agosto	4,9
Setembro	5,1
Outubro	5,4

Novembro	5,5
Dezembro	5,4

Fonte: Autoria própria

Figura 27 – Distribuição de Weibull



Fonte: Autoria própria

3.4. Análise de Aerogeradores de pequeno porte

Cada aerogerador possui características que variam de acordo com o seu formato, tipo de eixo (horizontal ou vertical), requisitos para instalação, desempenho em diferentes regimes de ventos, capacidade de geração de energia, entre outros aspectos técnicos e econômicos. Essas especificidades desempenham um papel crucial na escolha do aerogerador mais adequado para um determinado projeto, especialmente quando se busca maximizar o retorno financeiro e a eficiência energética.

Diante disso, é fundamental avaliar o desempenho econômico de aerogeradores, considerando fatores como custo de aquisição, manutenção, vida útil, e o potencial de geração de energia em cenários reais. Neste contexto, foram analisados diferentes tipos de aerogeradores.

Esses modelos incluem informações sobre potência nominal, velocidade mínima de operação, eficiência em diferentes regimes de vento, e outras métricas relevantes para análise técnica e econômica.

3.4.1. Curva de potência e dados gerais

Os dados técnicos dos aerogeradores analisados neste estudo estão organizados nas tabelas 2 a 15, apresentando especificações essenciais como potência nominal, velocidade nominal e velocidade de partida. Esses parâmetros são fundamentais para avaliar o desempenho de cada modelo em diferentes condições operacionais.

Além disso, as Figuras 28 a 40 exibem as curvas de potência dos aerogeradores, ilustrando a relação entre a potência gerada e a velocidade do vento, para essa análise foi utilizado métodos de interpolação de dados, para que a curva de potência plotada fosse a mais fiel possível a do aerogerador e tivesse um maior número de pontos, tornando a análise mais precisa. Essa representação gráfica facilita a comparação entre os modelos, permitindo a seleção do aerogerador mais adequado para a aplicação desejada.

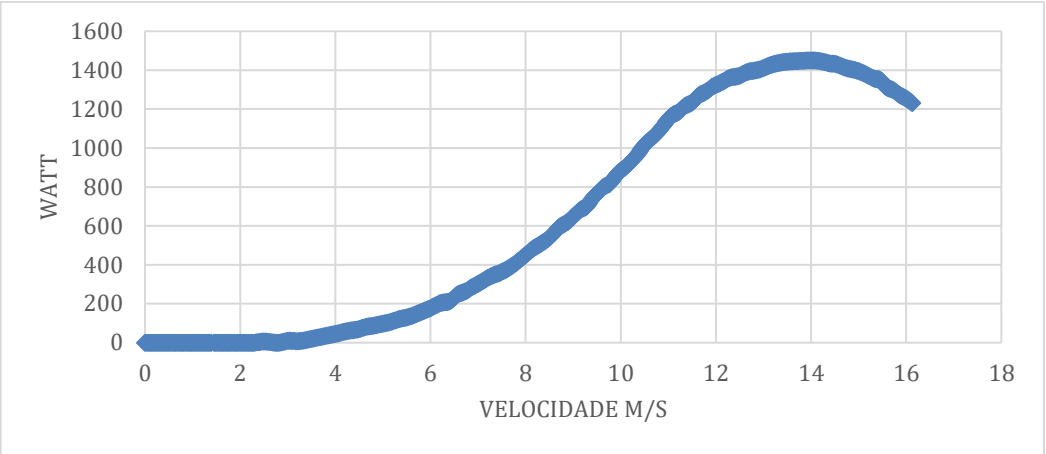
- Aerogerador Razec

Tabela 2 – Dados Gerais aerogerador Razec.

Dados Gerais	
Tipo de Turbina	HAWT
Potência Nominal	1500 W
Velocidade Nominal	12 m/s
Velocidade de Partida	2,5 m/s

Fonte: Manual Razec

Figura 28 - Curva de potência aerogerador Razec.



Fonte: Adaptado Razec

- Aerogerador Notus 138

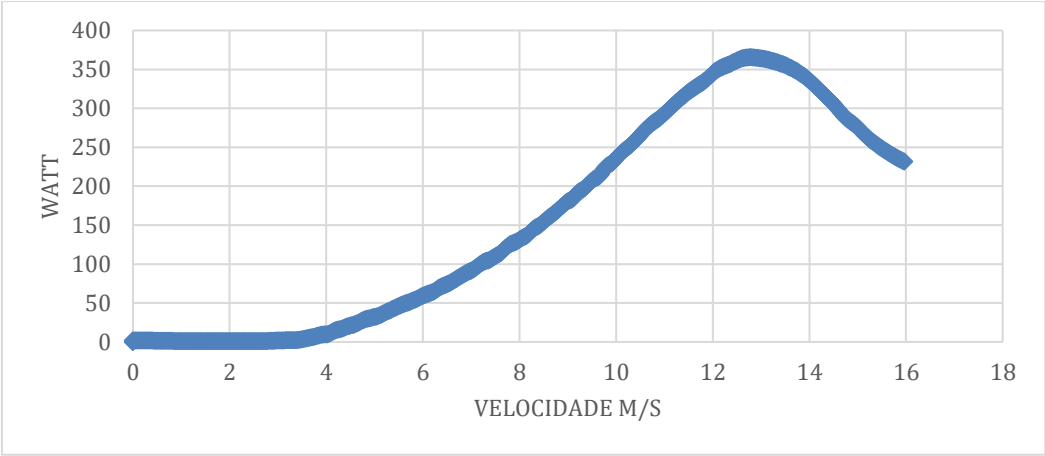
Tabela 3 - Dados Gerais aerogerador Notus 138

Dados Gerais

Tipo de Turbina	HAWT
Potência Nominal	350 W
Velocidade Nominal	12 m/s
Velocidade de Partida	2,5 m/s

Fonte: Manual Notus 138

Figura 29 - Curva de potência aerogerador Notus 138



Fonte: Adaptado Notus 138

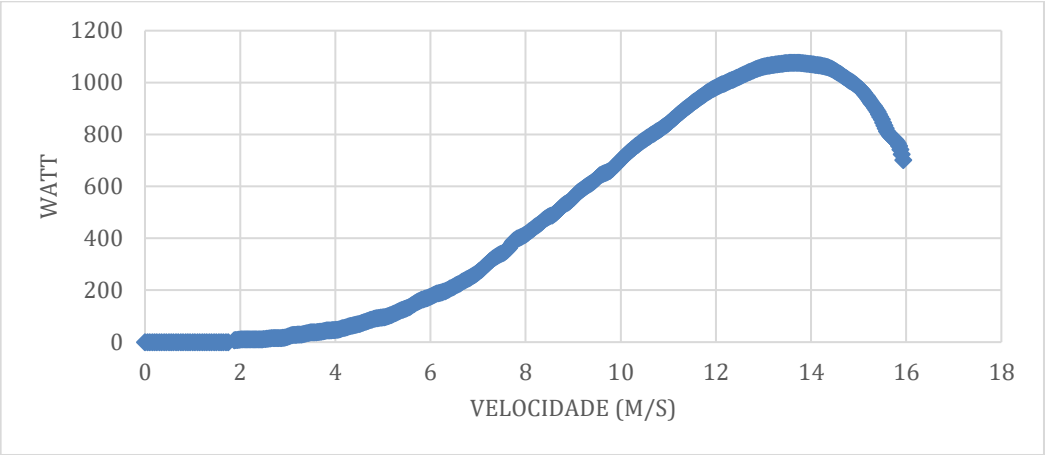
- Aerogerador Gerar 246

Tabela 4 - Dados gerais aerogerador Gerar 246

Dados gerais	
Tipo de Turbina	*HAWT*
Potência Nominal	*1000 W*
Velocidade Nominal	*12,5 m/s*
Velocidade de Partida	*2,0 m/s*

Fonte: Manual Gerar 246

Figura 30 - Curva de potência aerogerador Gerar 246



Fonte: Adaptado Gerar 246

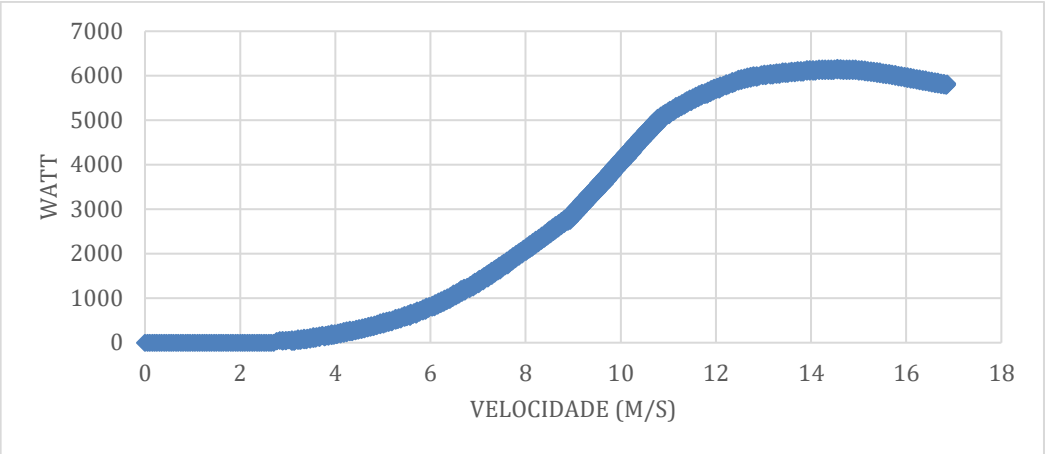
- Aerogerador Verne 555

Tabela 5 - Dados gerais aerogerador Verme 555

Dados gerais	
Tipo de Turbina	HAWT
Potência Nominal	6000 W
Velocidade Nominal	12 m/s
Velocidade de Partida	2,2 m/s

Fonte: Manual Verme 555

Figura 31 – Curva de potência aerogerador Verme 555



Fonte: Adaptado Verme 555

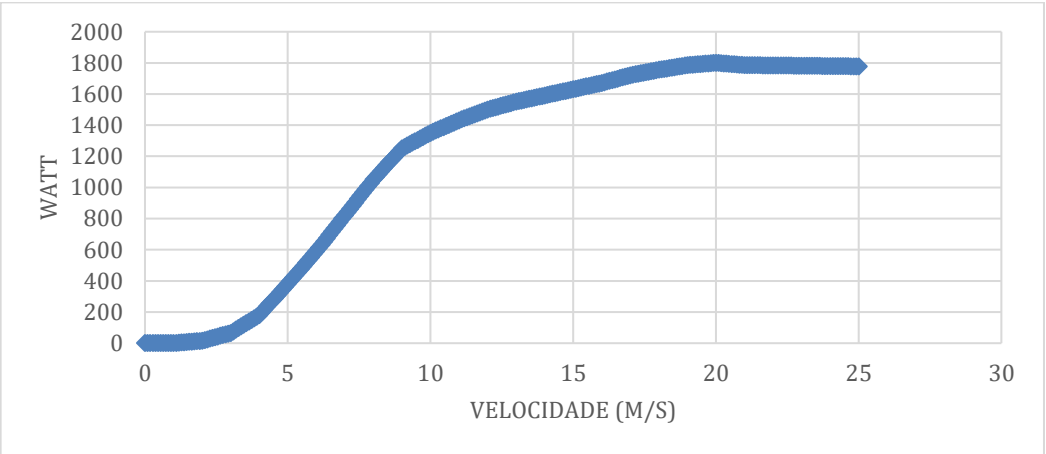
- WINDSPOT 1,5 kw

Tabela 6 - Dados gerais aerogerador WINDSPOT 1,5 KW

Dados gerais	
Tipo de Turbina	HAWT
Potência Nominal	1500 W
Velocidade Nominal	12 m/s
Velocidade de Partida	2,5 m/s

Fonte: Manual WINDSPOT 1,5 KW

Figura 32 - Curva de potência aerogerador WINDSPOT 1,5 KW



Fonte: Adaptado WINDSPOT 1,5 KW

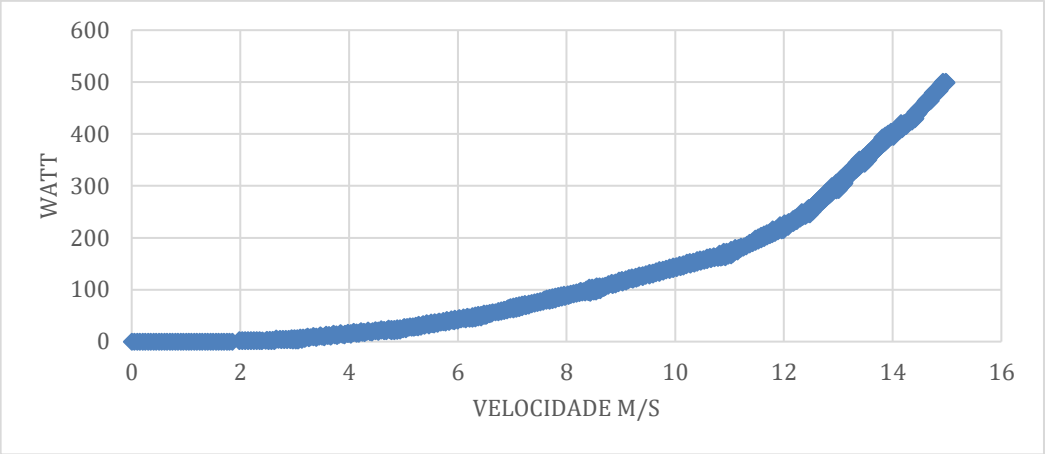
- SilentWind

Tabela 7 - Dados gerais aerogerador SilentWind

Dados gerais	
Tipo de Turbina	HAWT
Potência Nominal	450 W
Velocidade Nominal	14,5 m/s
Velocidade de Partida	2,2 m/s

Fonte: Manual SilentWind

Figura 33 - Curva de potência aerogerador SilentWind



Fonte: Adaptado SilentWind

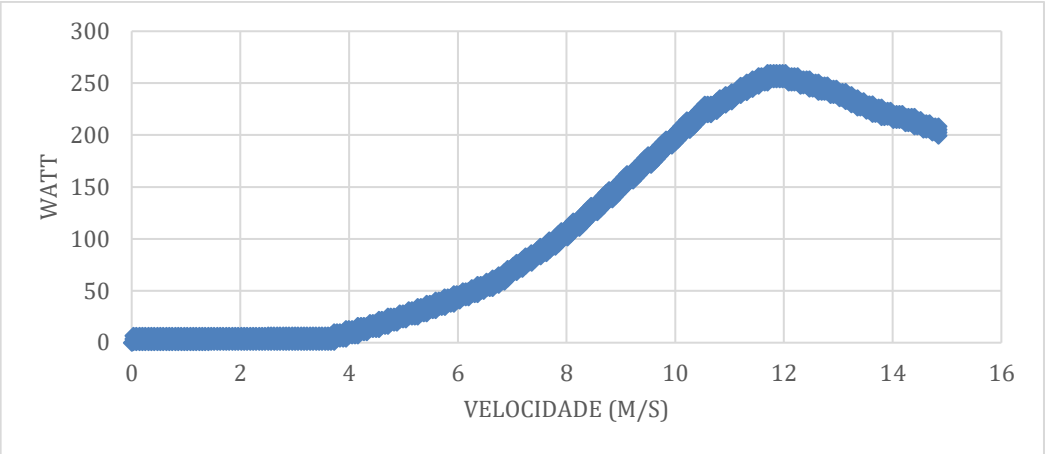
- AR TurbinaBreeze

Tabela 8 - Dados gerais aerogerador AR TurbineBreeze

Dados gerais	
Tipo de Turbina	HAWT
Potência Nominal	450 W
Velocidade Nominal	12 m/s
Velocidade de Partida	3,59 m/s

Fonte: Manual AR TurbineBreeze

Figura 34 - Curva de potência aerogerador AR TurbineBreeze



Fonte: Adaptado AR TurbineBreeze

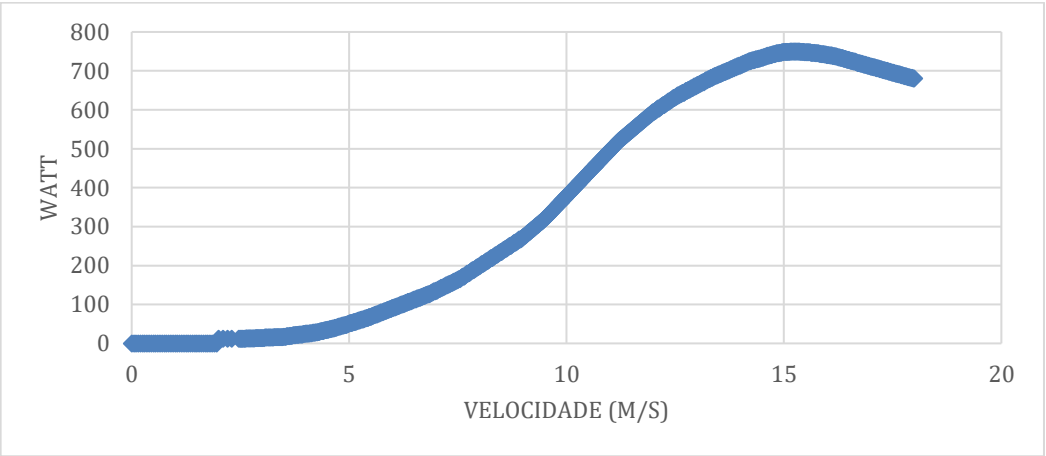
- HY Energy - HY 600 W

Tabela 9 - Dados gerais aerogerador HY Energy – HY 600 W

Dados gerais	
Tipo de Turbina	HAWT
Potência Nominal	600 W
Velocidade Nominal	12,0 m/s
Velocidade de Partida	2,0 m/s

Fonte: Manual HY Energy – HY 600 W

Figura 35 - Curva de potência aerogerador HY Energy – HY 600 W



Fonte: Adaptado HY Energy – HY 600 W

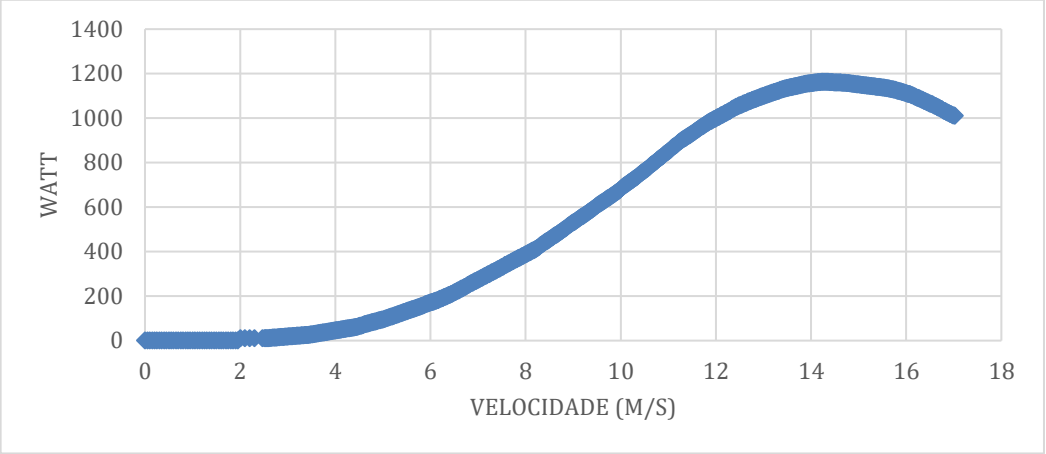
- HY Energy - HY 1000 W

Tabela 10 - Dados gerais aerogerador HY Energy – HY 1000 W

Dados gerais	
Tipo de Turbina	HAWT
Potência Nominal	1000 W
Velocidade Nominal	12,0 m/s
Velocidade de Partida	2,5 m/s

Fonte: Manual HY Energy – HY 1000 W

Figura 36 - Curva de potência aerogerador HY Energy – HY 1000 W



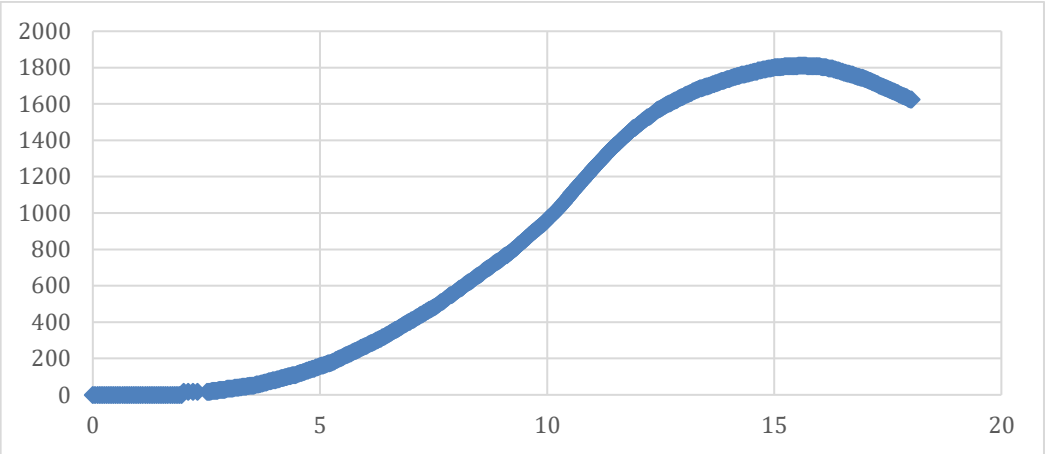
- HY Energy - HY 1500 W

Tabela 11 - Dados gerais aerogerador HY Energy – HY 1500 W

Dados gerais	
Tipo de Turbina	HAWT
Potência Nominal	1500 W
Velocidade Nominal	12,0 m/s
Velocidade de Partida	2,0 m/s

Fonte: Manual HY Energy – HY 1500 W

Figura 37 - Curva de potência aerogerador HY Enerrgy – HY 1500 W



Fonte: Adaptado HY Enerrgy – HY 1500 W

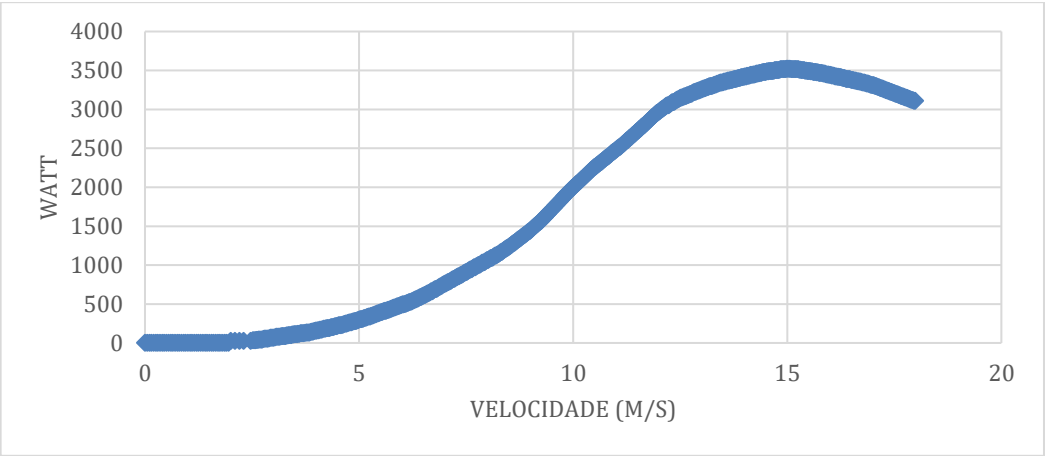
- HY Energy - HY 3000W

Tabela 12 - Dados gerais aerogerador HY Energy – HY 3000 W

Dados gerais	
Tipo de Turbina	HAWT
Potência Nominal	3000 W
Velocidade Nominal	12,0 m/s
Velocidade de Partida	2,5 m/s

Fonte: Manual HY Energy – HY 3000 W

Figura 38 - Curva de potência aerogerador HY Enerrgy – HY 3000 W



Fonte: Adaptado HY Enerrgy – HY 3000 W

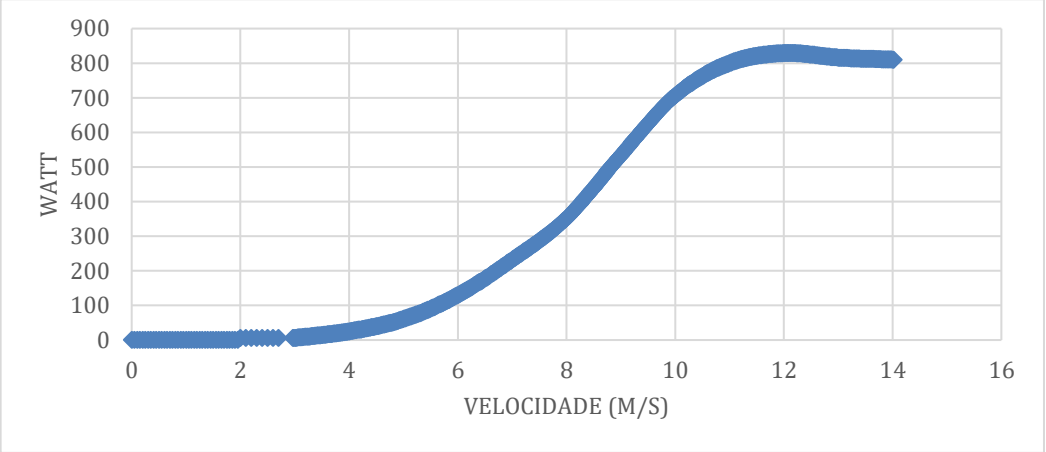
- Inverter 800 W

Tabela 13 - Dados gerais aerogerador Inverter 800 W

Dados gerais	
Tipo de Turbina	HAWT
Potência Nominal	800 W
Velocidade Nominal	11,5 m/s
Velocidade de Partida	2,5 m/s

Fonte: Manual Inverter 800 W

Figura 39 - Curva de potência aerogerador Inverter 800 W



Fonte: Adaptado Inverter 800 W

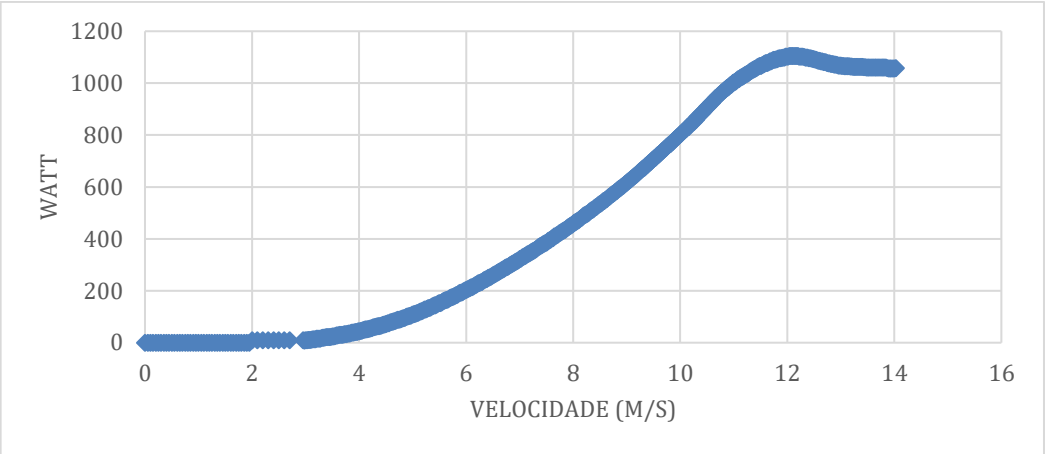
- Inverter 1000 W

Tabela 14 - Dados gerais aerogerador Inverter 1000 W

Dados gerais	
Tipo de Turbina	HAWT
Potência Nominal	1000 W
Velocidade Nominal	12,5 m/s
Velocidade de Partida	2,5 m/s

Fonte: Manual Inverter 1000 W

Figura 40 - Curva de potência aerogerador Inverter 1000 W



Fonte: Adaptado Inverter 1000 W

Tais gráficos apresentados evidenciam a relação entre velocidade do vento e a potência gerada por cada modelo de aerogerador, destacando alguns pontos como potência nominal, velocidade de partida, que influenciam diretamente sua eficiência e aplicação.

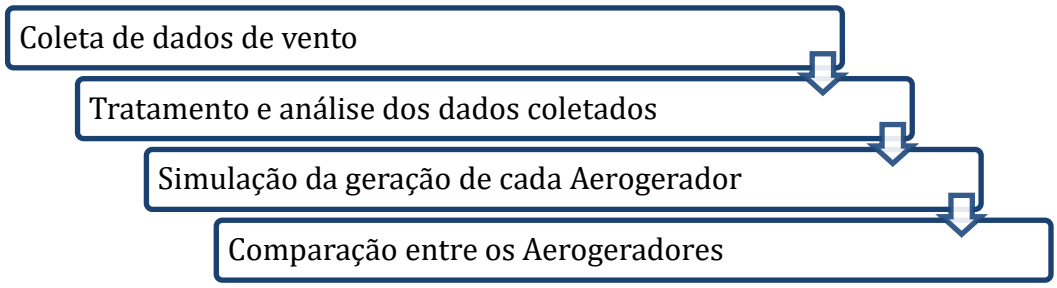
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o estudo da viabilidade técnica e econômica, foram levadas em conta tais considerações:

- Viabilidade técnica: análise do desempenho de cada aerogeradores com base em suas especificações técnicas, curvas de potência e adaptação às condições de vento do local em estudo.
- Viabilidade econômica: avaliação dos custos de implantação além do retorno financeiro esperado ao longo da vida útil do sistema.

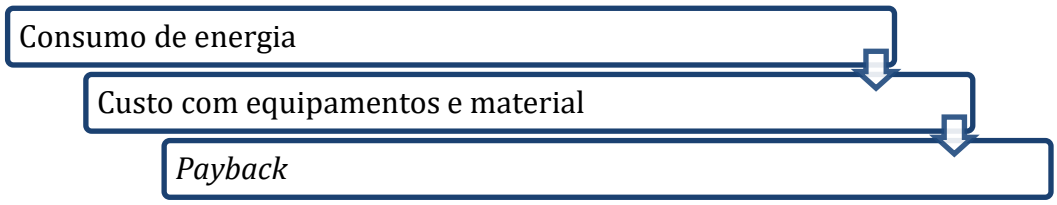
Os fluxogramas apresentados na Figura 41 que apresenta a viabilidade técnica e Figura 42 que apresenta a viabilidade econômica, aplicados neste estudo. Esses esquemas estruturam os critérios adotados para garantir uma avaliação do sistema.

Figura 41 – Fluxograma da viabilidade técnica



Fonte: Autoria própria

Figura 42 – Fluxograma da viabilidade econômica



Fonte: Autoria própria

4.1. Levantamento de informações eólicas

4.1.1. Análise dos dados coletados

Para poder realizar uma análise sobre os ventos disponíveis, foram feitos as medições e monitoramento no IFPE - *Campus* Garanhuns.

O monitoramento de dados foi realizado ao longo de três meses, de 01/10/2024 a 31/12/2024, analisando tanto períodos de vento forte quanto calmos. A coleta de dados durante esse período permitiu uma análise das variações sazonais e diárias do vento sendo essenciais para o dimensionamento adequado do aerogerador, na Figura 43 podemos ver a operação durante o monitoramento.

Figura 43 - Datalogger em operação durante o monitoramento

Fonte: Autoria própria

4.1.1. Densidade de probabilidade de Weibull

Com base nos dados coletados foi feita a distribuição de Weibull para os três meses de análise de vento, utilizando a seguinte equação da função de probabilidade.

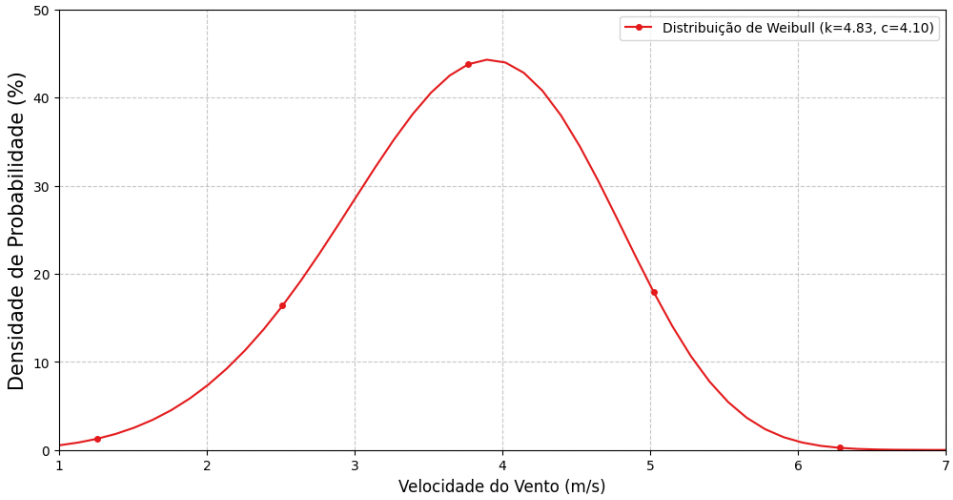
$$f(x) = \frac{k}{c}\left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} e^{-1\left(\frac{x}{c}\right)^{k}} \quad (9)$$

O parâmetro k define o perfil da distribuição, enquanto o parâmetro c influencia a dispersão dos valores da velocidade do vento.

Assim foi obtido as curvas de Weibull para cada mês analisado, bem como o compilado dos três meses, assim refletindo as variações sazonais na intensidade do vento. A Figura 44 evidencia a distribuição para todos os meses, enquanto a Figura 45 mostra que os meses apresentam perfis distintos.

A curva também indica que a velocidade do vento segue um comportamento estatístico esperado, com uma maior concentração de ocorrências em torno de um valor médio e uma queda gradual na probabilidade para velocidades mais altas.

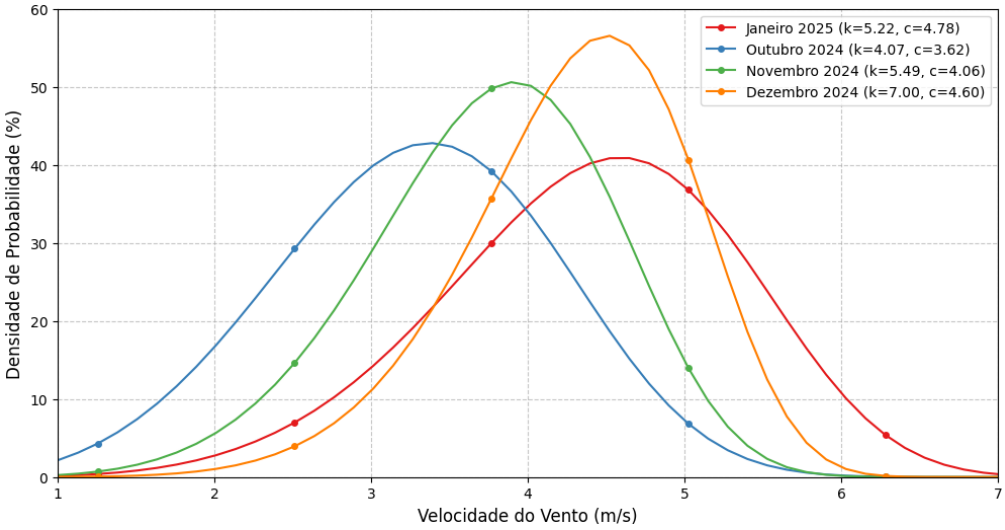
Figura 44 - Distribuição de Weibull para os meses analisados



Fonte: Autoria própria

Observa-se que a maior probabilidade de ocorrências de vento é de aproximadamente 4 m/s.

Figura 45 - Distribuição de Weibull Ajustada para Cada Mês



Fonte: Autoria própria

4.1.2. Velocidade média do vento

Na Tabela 15 apresenta-se os dados de velocidade do vento coletados ao longo dos meses de outubro, novembro e dezembro, destacando os valores mínimos, máximos e a média mensal registrada.

Tabela 15 – Dados de Vento

Mês	Velocidade mínima	Velocidade máxima	Velocidade média
OUTUBRO	0,7 m/s	9,24 m/s	4,20 m/s
NOVEMBRO	0,2 m/s	8,00 m/s	4,52 m/s
DEZEMBRO	0,8 m/s	8,52 m/s	4,59 m/s

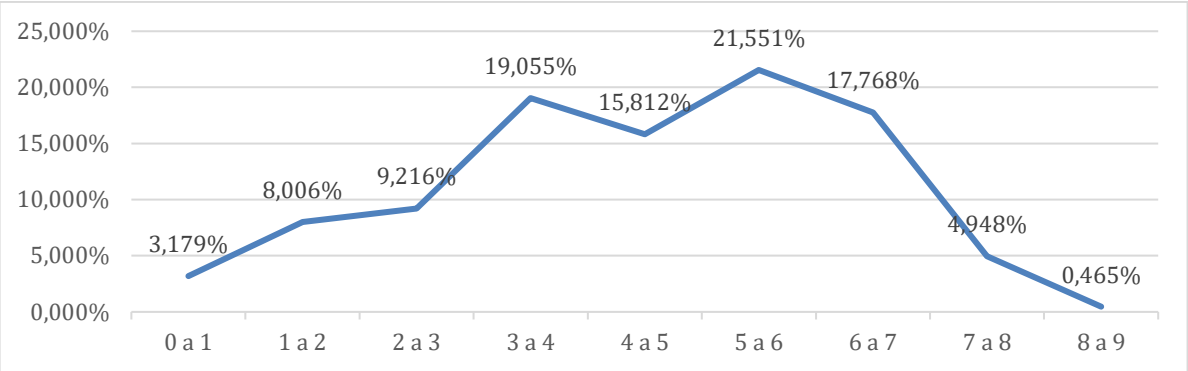
Fonte: Autoria própria

Observa-se que a velocidade média do vento nos três meses analisados variou entre 4,20 m/s e 4,59 m/s, com valores máximos chegando a 9,24 m/s em outubro. Já valores de velocidades mínima demonstram os momentos de baixa intensidade de vento, o que influencia diretamente no desempenho aerogerdor.

4.1.3. Distribuição da velocidade do vento ao longo do tempo

Apenas a velocidade média do vento não é um parâmetro suficiente para avaliar o potencial eólico, pois o comportamento do vento pode variar consideravelmente ao longo do dia. Algumas rajadas podem apresentar velocidades muito altas para a região, enquanto outras podem ser tão baixas que não conseguem acionar a turbina. Além disso, existe a possibilidade de os ventos ultrapassarem a velocidade de corte, momento em que o aerogerador precisa ser desligado para evitar danos estruturais. Para uma análise mais precisa da potência gerada, foi considerada a média da velocidade do vento a cada minuto. O gráfico seguinte ilustrado na Figura 46 mostra a distribuição de frequência das classes de vento.

Figura 46 – Distribuiçõ das clases de vento



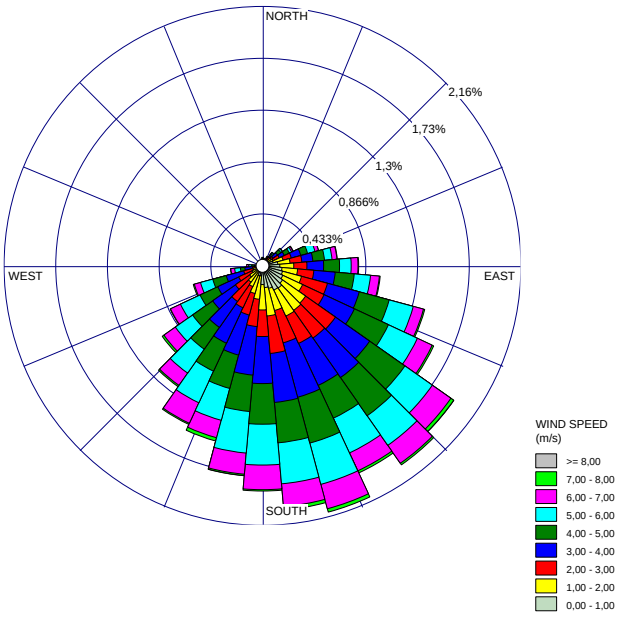
Fonte: Autoria própria

Está análise de frequência da ocorrência de classes de vento permite uma compressão mais detalhada do regime de ventos na região estudada. Por meio desta análise, é possível identificar com que frequência determinadas faixas de velocidade ocorreram ao longo do período análisado.

4.1.4. Rosa dos ventos

Com a finalidade de saber a direção dos ventos foi plotado a Rosa do Ventos, assim podendo determinar a melhor direção para as turbinas. A figura 47 mostra a Rosa dos Ventos para o local estudado.

Figura 47 – Rosa dos Ventos para local de estudo



Fonte: Autoria própria

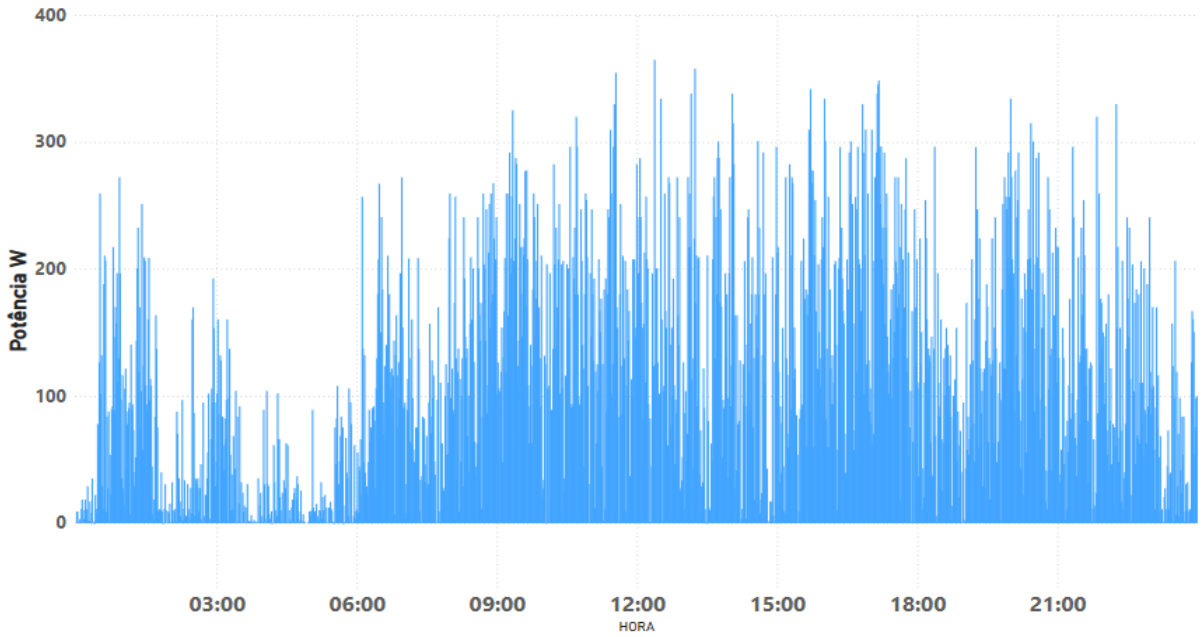
A melhor posição para a implantação das turbinas é onde a velocidade do vento é mais intensa, onde a mesma se concentra na direção entre Sul e Leste. No entanto, as turbinas analisadas possuem capacidade de rotação de 360º assim permitindo que se ajustem automaticamente para captar os ventos de maior intensidade.

4.2. Comparação entre os Aerogeradores

A partir das curvas de potência dos aerogeradores, foi simulado com auxílio do Excel as potências instantâneas de cada um no período de medição, considerando a velocidade do vento correspondente em cada instante.

Essa abordagem possibilita a identificação os momentos em que os aerogeradores operavam em plena capacidade, com baixa geração ou até mesmo inativos devido às variações na velocidade do vento. Com base nesses dados, foi possível determinar a potência total gerada no período analisado, somando as contribuições individuais dos aerogeradores minuto a minuto. Na Figura 48 apresenta a geração instantânea do aerogerador Razec para o dia 16/11/2024.

Figura 48 – Geração instantânea aerogerador Razec



Fonte: Autoria própria

Este método fornece uma avaliação mais precisa do desempenho do sistema, além de permitir a identificação de padrões na geração de energia, auxiliando na otimização da operação dos aerogeradores.

Os resultados foram organizados na Tabela 16 assim permitindo visualizar a geração de cada aerogerador no período monitorado.

Tabela 16 – Geração mensal para cada modelo

Aerogerador	Geração Outubro (kWh)	Geração Novembro (kWh)	Geração Dezembro (kWh)	Total (kWh)
Razec	45,076	54,705	55,223	155,005
Notus 138	13,994	17,320	18,054	49,369
Gerar 246	63,33	74,20	75,73	213,27
Verne 555	266,7	320,02	319,99	907,04
WINDSPOT 1.5 kW	205,36	246,43	260,18	711,98
SilentWind	11,722	13,937	20,868	39,992
AR TurbinaBreeze	9,392	11,509	20,868	32.895
HY Energy-HY 600 W	24,745	29,296	29,409	83,451
HY Energy- HY 1000 W	45,104	54,071	54,742	153,864
HY Energy–HY 1500 W	72,989	87,447	89,095	249,532
HY Energy - HY 3000 W	137,968	163,657	167,774	469,399
Inverter 800 W	32,249	38,304	36,771	107,324
Inverter 1000 W	60,61	72,22	73,73	206,53

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 17 evidencia a geração média dos aerogeradores analisados ao longo dos meses de outubro, novembro e dezembro de 2024. Esses valores correspondem à produção média de cada modelo analisado, permitindo assim avaliar sua eficiência e desempenho ao longo do período.

Tabela 17 – Média da geração para cada modelo

Aerogerador	Média (KWh)
Razec -	45,076
Notus 138	13,994
Gerar 246	71,09
Verne 555	302,34
WINDSPOT 1.5kw	237,32
SilentWind	11,722

AR TurbinaBreeze	9,392
HY Energy-HY - 600W	24,745
HY Energy- HY - 1000 W	45,104
HY Energy–HY 1500 W	72,989
HY Energy - HY 3000W	137,968
Inverter 800W	32,249
Inverter 1000W	68,85

Fonte: Autoria própria

4.2.1.1. Fator de Capacidade (FC)

O fator de capacidade (FC) é fundamental para análise de desempenho de um aerogerador, onde indica a relação entre energia efetivamente gerada e a energia máxima que poderia ser produzida caso o equipamento operasse em todo o tempo em potência nominal. A equação seguinte foi utilizada para o cálculo:

$$FC = \frac{Energia\ Gerada\ (KWh)}{Potência\ Nominal\ (KW)\ X\ Horas\ Totais\ do\ Período}\ X\ 100 \qquad (10)$$

Neste estudo, foram analisados os dados de geração elétrica nos meses de outubro, novembro e dezembro de 2024, conforme mencionado anteriormente, totalizando 2160 horas (considerando três meses completos).

A Tabela 18 apresenta os valores do fator de capacidade para cada aerogerador.

Tabela 18 - Fator de capacidade

Aerogerador	*Potência Nominal (KW)*	*Fator de Capacidade (%) (KWh)*
Razec	1,5	4,78%
Notus 138	0,35	6,53%
Gerar 246	1,0	9,85%
Verne 555	6,0	6,93%
WINDSPOT 1.5kw	1,5	21,95%
SilentWind	0,45	4,11%
AR TurbinaBreeze	0,25	6,09%
HY Energy-HY 600W	0,6	6,44%
HY Energy- HY 1000 W	1,0	7,12%

HY Energy–HY 1500 W	1,5	7,70%
HY Energy - HY 3000W	3,0	7,24%
Inverter 800W	0,8	6,21%
Inverter 1000W	1,0	9,56%

Fonte: Autoria própria

Os fatores de capacidade variaram entre 4,11% e 21,95%, conforme observado na Tabela 18. O melhor desempenho foi registrado no aerogerador WINDSPOT 1,5 kW, que apresentou um fator de capacidade de 21,95%, indicando um maior aproveitamento da sua potência nominal ao longo do período analisado.

Por outro lado, os aerogeradores SilentWind e Razec apresentaram um desempenho relativamente menor. Um ponto de destaque é o aerogerador Verne 555, que possui uma potência nominal de 6,0 kW, porém apresentou um fator de capacidade de 6,93%. Esse valor pode indicar um subaproveitamento da sua capacidade nominal, possivelmente relacionado a ventos abaixo da velocidade de partida, bem como a dificuldades para operar em potência máxima.

4.2.2. Custo para implantação do sistema

Com os dados de geração e a quantidade de aerogeradores necessários para atender à demanda energética da residência em análise (250 kWh/mês), é possível calcular o custo total de implantação do sistema. Esse cálculo envolve a soma dos investimentos em equipamentos.

4.2.2.1. Custo dos aerogeradores

A Tabela 19 indica o custo dos aerogeradores, a quantidade necessária para atender à demanda energética da residência e o custo total, incluindo as taxas de importação quando aplicáveis.

Tabela 19 – Custo total dos aerogeradores

Aerogerador	Custo unitário (R$)	Taxa Importação (%)	Quantidade	Custo total (R$)
Razec	18.398,00	0%	5	91.990,00

Notus 138	3.212,00	0%	15	48.180,00
Gerar 246	8.748,00	0%	4	34.992,00
Verne 555	37.900,00	0%	1	37.900,00
WINDSPOT 1.5kw	28.748,98	60,00%	1	45.998,30
SilentWind	10.515,24	60,00%	19	319.663,00
AR TurbinaBreeze	8.035,80	60,00%	23	295.717,40
HY Energy-HY 600W	6.888,68	60,00%	9	99.169,99
HY Energy- HY 1000 W	12.056,68	60,00%	5	96.453,44
HY Energy–HY 1500 W	15.390,49	60,00%	3	73.874,35
HY Energy - HY 3000W	23.623,45	60,00%	2	75.595,04
Inverter 800W	5.190,15	60,00%	7	58129,74
Inverter 1000W	6.090,14	60,00%	4	38.976,90

Fonte: Autoria própria

´ Na tabela anterior é possível observar a variação no custo dos aerogreadores, tanto no que diz ao custo unitário quanto à quantidade necessária para suprir a demanda energética da residência. A tabela também leva em consideração a taxa de importação, para alguns modelos que são adquiridos fora do Brasil. Tais valores são essenciais para a análise econômica do projeto, proporcionando uma visão clara do investimento.

4.2.2.2. Determinação dos números de baterias

Nos períodos em que houver excesso de geração, a energia excedente será utilizada para carregar o banco de baterias. Dessa forma, o sistema de armazenamento por meio de baterias garantirá o fornecimento de energia.

Para assegurar o funcionamento independente do sistema por um dia, considerando um consumo diário de 8,33 kwh. Para atender essa demanda, foi necessário calcular a capacidade total de armazenamento levando em consideração o fator de descarga (DoD) de 80% e a eficiência de 90%. A fórmula utilizada para calcular a capacidade do banco de baterias, levando em consideração os dados mencionados anteriormente.

$$Ebanco = \frac{Econsumida}{DoD * Eficiência\ inversor} \quad (11)$$

Substituindo os valores conhecidos temos:

$$Ebanco = \frac{8{,}33\ Kwh}{0{,}8 * 0{,}9} = 11{,}58\ Kwh$$

A partir desse cálculo, determinou-se que o banco de baterias deve ter uma capacidade de 11,58 Kwh.

Sabendo que cada bateria possui uma capacidade de 2,4 Kwh, sendo que cada unidade tem uma tensão de 12 V e uma capacidade de 200 Ah. A capacidade de cada bateria pode ser calculada conforme a fórmula:

$$Ebateria = 12\ V * 200\ Ah = 2{,}4\ Kwh$$

Assim determinado o número de baterias necessárias para fornecer a capacidade total de 11,58 Kwh, temos a seguinte formula:

$$N = \frac{Ebanco}{0Ebateria} \quad (12)$$

Substituindo os valores conhecidos temos:

$$N = \frac{11{,}58\ Kwh}{2{,}4\ Kwh/bateria} = 4{,}82$$

O banco de baterias necessário para garantir o fornecimento de energia para o sistema por um dia inteiro, considerando um consumo diário de 8,33 Khw deve ser composto 5 baterias de 12 V e 200 Ah cada.

4.2.2.3. Custo do sistema

Nesta análise, foram considerados os três aerogeradores que apresentaram o menor custo de implementação, Verne 555, Gerar 246 e Inverter 1000W. Os aerogeradores Verne 555 e Gerar 246 necessitam de um retificador, uma vez que ambos são geradores de energia em corrente alternada, de modo que se faz necessário a conversão da corrente alternada para a corrente contínua para a alimentar o banco de baterias. Em contrapartida, o Inverter 1000W gera em corrente

contínua e, portanto, não será necessária a utilização de um retificador. Contudo, independentemente do aerogerador, o sistema deverá possuir um inversor.

Assim levantando o custo total do sistema para análise de viabilidade e o tempo do retorno do investimento, as tabelas 20 a 22 apresentam o custo de implantação dos três aerogeradores considerando também os valores dos equipamentos adicionais.

Tabela 20 – Custo de implantação do aerogerador Verne 555

Equipamento	*Valor*	*Quantidade*	*Valor total*
Verne 555	*37.900,00*	*1*	*37.900,00*
Retificador ABB	*3.000,00*	*1*	*3.000,00*
Interface Eólico			
Inversor	*3.041,00*	*1*	*3.041,00*
Baterias	*1.263,00*	*5*	*6.315,00*
Custo total	-	-	*48.993,00*

Fonte: Autoria própria

Tabela 21– Custo de implantação do aerogerador Gerar 246

Equipamento	*Valor*	*Quantidade*	*Valor total*
Gerar *246*	*8.748,00*	*4*	*34.992,00*
Retificador ABB	*3.000,00*	*1*	*3.000,00*
Interface Eólico			
Inversor	*3.041,00*	*1*	*3.041,00*
Baterias	*1.263,00*	*5*	*6.315,00*
Custo total	-	-	*47.348,00*

Fonte: Autoria própria

Tabela 22– Custo de implantação do aerogerador Inverter 1000 W

Equipamento	*Valor*	*Quantidade*	*Valor total*
Inverter 100 W	*9.744,22*	*4*	*38.976,88*
Inversor	*3.041,00*	*1*	*3.041,00*
Baterias	*1.263,00*	*5*	*6.315,00*
Custo total	-	-	*48.332,88*

Fonte: Autoria própria

A partir da análise das tabelas apresentadas, valida-se que o aerogerador Gerar 246 possui menor custo de implantação, totalizando R$ 47.248,00, seguindo

pelo Verne 555 com R$ 48.993,00, e pelo Inverter 1000 W, que apresenta o custo de R$ 48.332,88. Essa comparação é crucial para avaliação da viabilidade do sistema, assim permitindo calcular o tempo de retorno do investimento.

4.3. Viabilidade financeira

Para avaliar a viabilidade financeira da implantação, o tempo de retorno será calculado, ou seja, o período que a economia anual gerada pelo sistema supera o valor investido. Considerando a residência com um consumo mensal de 250 Kwh, o consumo anual será de 3.000 Kwh. Atualmente, a tarifa da energia elétrica é de R$ 0,74432 por Kwh, assim o custo anual é de R$2.232,96. Também foi considerado o ajuste tarifário médio anual da Neoenergia Pernambuco, que tem a média de 7,04% ao ano, com base em dados históricos da Tabela 23. Esse aumento é estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) por meio do

Procedimento de Regulação Tarifária (PRORET), assim tendo impacto no tempo de retorno do investimento, a economia gerada pelo sistema de geração também cresce ao longo dos anos.

Tabela 23 – Reajuste tarifário

Revisão tarifários Neoenergia

Data da revisão	*2018*	*2019*	*2020*	*2021*	*2022*	*2023*	*2024*	*Média*
Reajuste tarifário	*8,89%*	*5,04%*	*5,16%*	*8,99%*	*14,91%*	*9,02%*	*-2,69%*	*7.04%*

Fonte: Autoria própria

Com base no valor médio de reajuste das tarifas de energia elétrica em Pernambuco e considerando o valor atual da tarifa de energia de R$ 0,74432 para o ano de 2024, é possível calcular a economia por ano do aerogerador Gerar 246, onde obteve-se os dados apresentados na Tabela 24.

.

Tabela 24 – Economia acumulada ao longo dos anos

Ano	*Economia total*
Economia total em 1 ano	*R$ 2.232,96*
Economia total em 2 ano	*R$ 4.623,12*
Economia total em 3 ano	*R$ 7.181,55*

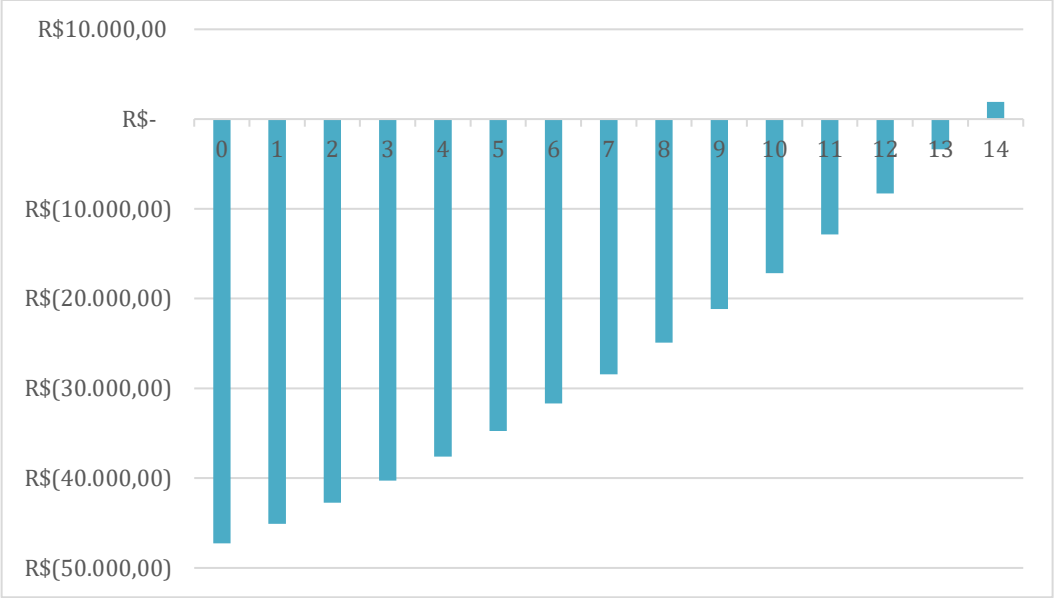
Economia total em 4 ano	*R$ 9.920,09*
Economia total em 5 ano	*R$ 12.851,42*
Economia total em 6 ano	*R$ 15.989,12*
Economia total em 7 ano	*R$ 19.347,72*
Economia total em 8 ano	*R$ 22.942,76*
Economia total em 9 ano	*R$ 26.790,89*
Economia total em 10 ano	*R$ 30.909,93*
Economia total em 11 ano	*R$ 35.318,94*
Economia total em 12 ano	*R$ 40.038,36*
Economia total em 13 ano	*R$ 45.090,02*
Economia total em 14 ano	*R$ 50.497,32*

Fonte: Autoria própria

O aerogerador Gerar 246 possui uma vida útil de 20 anos, o que significa que após o período de *payback* o equipamento continuará gerando economia, garantindo um retorno financeiro significativo ao longo dos anos em sua operação.

Na figura 49, o gráfico ilustra a economia acumulada ao longo dos anos, destacando o ponto em que o investimento é recuperado e quando começa a gerar lucro.

Figura 49 – Payback para o sistema em estudo



Fonte: Autoria própria

Sendo assim o aerogerador possui condições favoráveis para sua implantação, sendo economicamente viável, uma vez que seu *payback* corresponde a 70% de sua vida útil.

CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de vento, bem como as devidas análises de viabilidade técnica e economia para a implantação do sistema de geração eólica residencial. Com os dados obtidos, foi possível demonstrar que o sistema é viável tecnicamente para o atendimento as demandas energéticas de uma residência do tipo B1, localizado na cidade de Garanhuns. As simulações realizadas por meio do Excel indicam que a potência média gerada pelos aerogeradores atende o cenário em estudo.

Pelas análises das curvas de potências dos aerogeradores com as velocidades de vento coletadas foi possível evidenciar que as turbinas em estudos conseguiram suprir a demanda da residência, ainda que para isso fosse necessário utilizar mais de uma de uma turbina. Pela análise técnica e financeira verificou-se que o aerogerador Gerar 246 nos três meses em estudo o mesmo foi capaz de gerar 71,09 Kwh/mês, sendo assim necessário 4 turbinas para suprir a demanda da residência.

Após realizar a análise econômica revelou um alto preço dos aerogeradores, pelo fato de se tratar de uma tecnologia que todavia não foi amplamente difundida para geração residencial, contudo foi economicamente viável com um *Payback* de aproximadamente 14 anos. Além das vantagens na redução na conta de energia, esse empreendimento proporciona benefícios ambientais, uma vez que não será necessário geração de fontes poluentes para atender a demanda da residência

REFERÊNCIAS

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

CARNEIRO, Joaquim**.** *Energia eólica*: fundamentos e aplicação. 2013. Disponível em:https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/22408/1/Energia%20E%C3%B3lica.pdf. Acesso em: 09 nov. 2024.

CARVALHO, Aloísio Chaves de. *Avaliação da disponibilidade e desempenho de um parque eólico após 10 anos de operação.* 2020. Trabalho de conclusão de curso (Especialização em Fontes Renováveis: Geração, Operação e Integração) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2020.

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

COTESA. *As funções dos componentes dos aerogeradores.* 3 abr. 2023. Disponível em: https://cotesa.com.br/2023/04/03/as-funcoes-dos-componentes-dos-aerogeradores/. Acesso em: 10 nov. 2024

DOBBIN, T. *Modelagem e Controle de um Aerogerador duplamente alimentado com turbina de velocidade variável para estudos de estabilidade eletromecânica.* Dissertação de Mestrado. COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, 2014.

DUTRA, Ricardo (Org.). *Energia eólica*: princípios e tecnologias. Rio de Janeiro: CEPEL, 2021.

ENGEAR Consultoria. *Análise da rosa dos ventos.* Disponível em: https://www.engearconsultoria.com.br/blog/analise-da-rosa-dos-ventos. Acesso em: 17 nov. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Fontes de Energia.* (n.d.). Recuperado em 24 nov. 2024, de https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanço Energético Nacional 2023*: ano base 2022. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-BEN. Acesso em: 21 abr. 2025.

FABRÍCIO, Eng. Mec. *História da energia eólica e suas aplicações.* Blog do Fabricio Eng. Mec., 2017. Disponível em: https://fabricioengmec.blogspot.com/2017/07/historia-da-energia-eolica-e-suas.html. Acesso em: 25 nov. 2024.

FIGUEIREDO, A. C. V. S. *Avaliação de Viabilidade de Aplicação de Aerogerador de Pequeno Porte em uma Pousada em Arraial do Cabo.* Trabalho de Conclusão de Curso, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2023.

GOOGLE. *Google Earth Pro.* Disponível em: https://www.google.com/earth/. Acesso em: 12 nov. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *Instalação de estações anemométricas*: boas práticas. 1. ed. Rio de Janeiro: INMET, 2015.

INSTRUFIBER. *Anemômetro sensor conjugado de velocidade e direção do vento compacto - Modelo MeteoWind C - Marca Barani.* Disponível em: https://www.instrufiber.com.br/anemometro-sensor-conjugado-de-velocidade-e-direcao-do-vento-compacto-modelo-meteowind-c-marca-barani-instrufiber. Acesso em: 09 nov. 2024.

LIMA, Pedro Henrique Dules de; LEMOS, Herick Talles Queiros. *Análise da viabilidade técnica e econômica da instalação de uma microusina eólica residencial no município de Pesqueira-PE.* 2018.

PABOCAR. *O que é curva de potência?* Pabocar, 2025. Disponível em: https://pabocar.com.br/glossario/o-que-e-curva-de-potencia/. Acesso em: 12 jan. 2025.

PEREIRA FILHO, Augusto José (org.). *Sistemas de Medição em Hidrometeorologia:* apostila*.* São Paulo: Universidade de São Paulo, Departamento de Ciências Atmosféricas, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, 2003.

SIGMA SENSORS. *Sensor de direção e velocidade do vento Plug and Play S-WSET-B.* Disponível em: https://sigmasensors.com.br/produtos/sensor-de-direcao-e-velocidade-do-vento-plug-and-play-S-WSET-B. Acesso em: 12 nov. 2024.

SMARTKITS. *Arduino Uno.* Disponível em: https://blog.smartkits.com.br/arduino-uno/. Acesso em: 12 nov. 2024.

TEIXEIRA, Ricardo; SILVA, Diego da; MELLO JUNIOR, Harold de; FORERO, Leonardo; LIMA, Antonio; FIGUEIREDO, Karla. *Previsão de séries temporais de velocidade do vento utilizando Redes Neurais Artificiais e Métodos Estatísticos na região de Arraial do Cabo - RJ.* Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), 2021.

TESTER, J. W.; INSEL, D.; BIBER, E.; FOGEL, D.; SAGE, P. *Sustainable Energy: Choosing Among Options.* MIT Press, 2005.

TIBOLA, Gabriel. *Sistema eólico de pequeno porte para geração de energia elétrica com rastreamento de máxima potência.* 2009. Trabalho de conclusão de curso (Pós-graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

TOLMASQUIM, M. T. (Coord.). *Energia Renovável:* Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. EPE: Rio de Janeiro, 2016.

VIAN, Â.; TAHAN, C. M. V.; AGUILAR, G. J. R.; GOUVEA, M. R.; GEMIGNANI, M. M. F. *Energia Eólica*: Fundamentos, Tecnologia e Aplicações. São Paulo: Editora Blucher, 2021.

WEATHERSPARK. *Clima característico em Garanhuns, Pernambuco, Brasil durante o ano.* WeatherSpark, 2024. Disponível em: https://pt.weatherspark.com/y/31268/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Garanhuns-Pernambuco-Brasil-durante-o-ano#Figures-WindSpeed. Acesso em: 24 nov. 2024.

ANEXO A – Certificado de calibração anemômetro

Svend Ole Hansen ApS
SCT. JØRGENS ALLÉ 7 · DK-1615 KØBENHAVN V · DENMARK
TEL: (+45) 33 25 38 38 · FAX: (+45) 33 25 38 39 · WWW.SOHANSEN.DK

WIND ENGINEERING FLUID DYNAMICS

CERTIFICATE FOR CALIBRATION OF CUP ANEMOMETER

Certificate number: 13.02.02233 **Date of issue:** March 25, 2013

Type: NRG #40 **Serial number:** 179500215520

Manufacturer: NRG Systems, Inc., 110 Riggs Road, Hinesburg, VT 05461, USA

Client: NRG Systems, Inc., 110 Riggs Road, Hinesburg, VT 05461, USA

Anemometer received: March 14, 2013 **Anemometer calibrated:** March 19, 2013

Calibrated by: jjj **Calibration procedure:** IEC 61400-12-1, MEASNET

Certificate prepared by: cea **Approved by:** Calibration engineer, kbk

Calibration equation obtained: v [m/s] = 0.76150 · f [Hz] + 0.35981

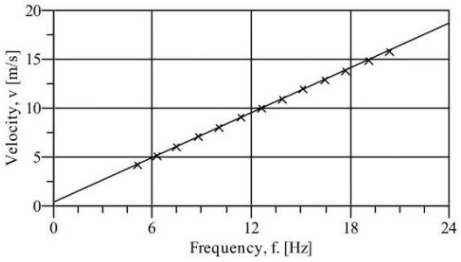
Standard uncertainty, slope: 0.00169 **Standard uncertainty, offset:** 0.04826

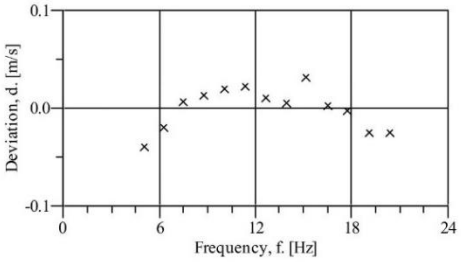
Covariance: -0.0000208 (m/s)²/Hz **Coefficient of correlation:** $\rho = 0.999984$

Absolute maximum deviation: -0.039 m/s at 4.173 m/s

Barometric pressure: 1002.6 hPa **Relative humidity:** 13.8%

Succession	Velocity pressure, q. [Pa]	Temperature in wind tunnel [°C]	Temperature in control room [°C]	Wind velocity, v. [m/s]	Frequency, f. [Hz]	Deviation, d. [m/s]	Uncertainty u_c (k=2) [m/s]
2	10.07	28.4	21.2	4.173	5.0591	-0.039	0.022
4	15.27	28.4	21.2	5.140	6.3046	-0.020	0.025
6	21.24	28.3	21.2	6.062	7.4790	0.006	0.029
8	28.95	28.2	21.2	7.076	8.8022	0.013	0.033
10	37.46	28.1	21.2	8.047	10.0694	0.019	0.038
12	47.35	28.1	21.2	9.047	11.3785	0.022	0.042
13-last	57.65	28.0	21.2	9.982	12.6223	0.010	0.046
11	69.39	28.1	21.2	10.952	13.9020	0.006	0.051
9	82.25	28.2	21.2	11.925	15.1453	0.032	0.055
7	96.56	28.2	21.2	12.922	16.4937	0.002	0.060
5	111.29	28.3	21.2	13.874	17.7495	-0.002	0.064
3	128.21	28.4	21.2	14.893	19.1169	-0.025	0.069
1-first	144.92	28.4	21.2	15.836	20.3547	-0.024	0.073





ilac-MRA DANAK CAL Reg.nr. 452 measnet

EQUIPMENT USED

Serial number	Description
-	Boundary layer wind tunnel.
1256	Control cup anemometer.
-	Mounting tube, D = 25 mm
t1	PT100 temperature sensor, wind tunnel.
t2	PT100 temperature sensor, control room.
9904031	PPC500 Furness pressure manometer
X4650038	HMW71U Humidity transmitter
X4350042	PTB100AVaisala analogue barometer.
P11	Pitot tube
HB2835279	Computer Board. 16 bit A/D data acquisition board.
-	PC dedicated to data acquisition.

Traceable calibrations of the equipment are carried out by external accredited institutions: Furness (PPC500) and Exova Metech. A real-time analysis module within the data acquisition software detects pulse frequency.

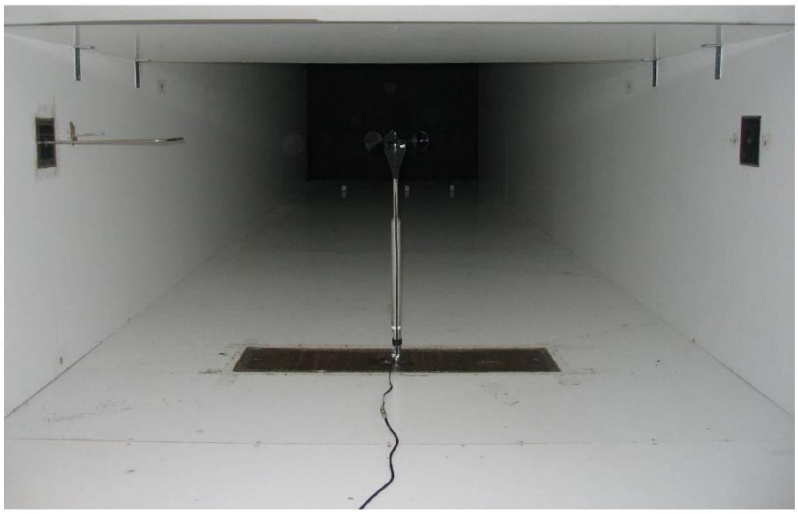


Photo of the wind tunnel setup (hxb = 0.85x1.75 m). The shown anemometer is of the same type as the calibrated one.

UNCERTAINTIES

The documented uncertainty is the total combined uncertainty at 95% confidence level (k=2) in accordance with EA-4/02. The uncertainty at 10 m/s comply with the requirements in the MEASNET procedure that prescribes an absolute uncertainty less than 0.1 m/s at a mean wind velocity of 10 m/s, that is 1%. See Document 97.00.004 “MEASNET - Test report on the calibration campaign” for further details.

Certificate number: 13.02.02233

This certificate must not be reproduced, except in full, without the approval of S. O. Hansen ApS

ANEXO B – Certificado de calibração anemômetro

Factory Calibration

NRG Systems 200M Wind Direction Vane

Serial No. 10070 00011177

Product Description:

Manufacturer	Description	Cal. Date
NRG Systems	200M Wind Direction Vane	3/31/2021

NRG Systems, hereby certifies that the above instrumentation has been calibrated and tested to **meet or exceed** the published specifications. This calibration and testing was performed using instrumentation and standards that are traceable to the **National Institute for Standards and Technology (NIST).**

Standard Uncertainty of Degree Measurement = ±0.31°

The output (in Deg.) for this 200M sensor is defined by: $\Theta = V * Scale\ Factor + Offset$

Criteria	Value	Units
200M Scale Factor	147.9529	Deg./Volt
200M Offset	-1.3731	Deg.

Linearity Results (R^2): 1.00000

Slope (Scale Factor) and Offset Conversion Chart for NRG Systems' Data Loggers.

To Scale to...	SymphoniePLUS3 and Older *[Symphonie Data Retriever (SDR) software]*		SymphoniePRO Data Logger *[SymphoniePRO Desktop Application]*	
	enter Scale Factor	and enter Offset	enter Scale Factor	and enter Offset
°	0.368	-5.3	147.9529	-1.3731

Procedure: WI-ELE-489

Calibration performed by: z2b **Date:** 3/31/2021

NRG Systems' management system has been certified to ISO 9001: 2015.