

CENTRO PAULA SOUZA
Etec PHILADELPHO GOUVÊA NETTO
Técnico em Eletrotécnica

Marco Antônio Moreira Pinhas
Alessandro Martins
Caio Samuel do Espírito Santo Montes
Célio Alexandre da Silva
Chrystian Brolezzi Urias Gomes

ANÁLISE TÉCNICA DE AEROGERADORES

São José do Rio Preto

2023

Marco Antônio Moreira Pinhas
Alessandro Martins
Caio Samuel do Espírito Santo Montes
Célio Alexandre da Silva
Chrystian Brolezzi Urias Gomes

ANÁLISE TÉCNICA DE AEROGERADORES

Trabalho de Conclusão de Curso
Apresentado ao Curso Técnico em
Eletrotécnica da Etec Philadelpho
Gouvêa Netto, orientado pelo Prof.
Mario Kenji Tamura, como requisito
parcial para obtenção do título de
técnico em eletrotécnica.

São José do Rio Preto

2023

Dedicamos este trabalho aos
nossos familiares que sempre
nos apoiaram até este grande
e importante momento.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise técnica de aerogeradores, visando apresentar uma forma de geração de energia elétrica sustentável e eficiente, ainda pouco discutida. Para isso, serão abordados conceitos teóricos e práticos relacionados ao funcionamento de aerogeradores em geral, além de serem analisados os principais componentes desses equipamentos; tais como pás/ hélices, gerador, torre, sistemas de controle de frenagem, engrenagens multiplicadoras, dentre outros.

Serão também abordados aspectos relacionados à manutenção e operação desses equipamentos, bem como os principais desafios enfrentados na utilização de aerogeradores, como a variabilidade da velocidade do vento e a necessidade de integração com outras fontes de energia elétrica.

Ao final do trabalho, espera-se contribuir para o desenvolvimento de soluções energéticas sustentáveis e eficientes, além de estimular a adoção de aerogeradores como fonte de energia elétrica, principalmente em regiões com potencial de ventos favoráveis.

ABSTRACT

This paper aims to perform a technical analysis of wind turbines, with the aim of presenting a sustainable and efficient form of electrical energy generation that is still little discussed. To achieve this, theoretical and practical concepts related to the functioning of wind turbines in general will be addressed, as well as the main components of these devices, such as blades/propellers, generator, tower, braking control systems, gearboxes, among others, will be analyzed.

Aspects related to the maintenance and operation of these devices will also be addressed, as well as the main challenges faced in the use of wind turbines, such as the variability of wind speed and the need for integration with other sources of electrical energy.

At the end of the paper, it is expected to contribute to the development of sustainable and efficient energy solutions, as well as to stimulate the adoption of wind turbines as a source of electrical energy, especially in regions with potential for favorable winds.

LISTA DE FIGURAS

DESCRITIVO

- Figura 1 - Aerogerador comercial, de eixo horizontal. Um exemplar de parques eólicos de grande porte.
- Figura 2 - Aerogerador, de pequeno porte, de eixo vertical. Modelo Darrieus.
- Figura 3 - Aerogerador, de pequeno porte, de eixo vertical. Modelo Savonius.
- Figura 4 - Aerogerador, de pequeno porte, de eixo vertical. Modelo Darrieus-Savonius.
- Figura 5 - Aerogerador, de pequeno porte, de eixo vertical. Modelo Giromill.
- Figura 6 - Modelo de uma instalação Off-Shore de aerogeradores de eixo horizontal.
- Figura 7 - Representação ilustrativa do potencial eólico On-Shore em relação às dimensões de algumas turbinas.
- Figura 8 - Protótipo do aerogerador sem pás, desenvolvido e fabricado pela Vortex Bladeless TM.
- Figura 9 - Esquemático simples do funcionamento de um aerogerador comercial de eixo horizontal.
- Figura 10 - Representação gráfica da diferença entre *Upwind* e *Dowind*.
- Figura 11 - Distribuição de frequência da velocidade média dos ventos durante um ano.
- Figura 12 - Equação da Distribuição de Weibull, em escala adimensional.
- Figura 13 - Equação da Distribuição de Weibull, na escala metros por segundo.
- Figura 14 - Distribuição de Rayleigh.
- Figura 15 - Esquemático da mudança na velocidade do vento após a passagem pelo aerogerador.
- Figura 16 - Gráfico da capacidade eólica teórica do projeto.
- Figura 17 - Curva de Potência de um Aerogerador E82 da Wobben.
- Figura 18 - Potência disponível no vento X Potência utilizável do vento X Potência gerada pelo aerogerador E82 da Wobben.
- Figura 19 - Tabela exemplificando o rendimento médio do conjunto.
- Figura 20 - Gráfico, em acordo com a figura 16, mostra o rendimento médio teórico do projeto.
- Figura 21 - Atlas dos ventos brasileiros.
- Figura 22 – Definição das classes de energia.

SUMÁRIO

Introdução	pág. 07
Uma breve história da eólica	pág. 08
Tipos de Aerogeradores	pág. 09
Principais Componentes	pág. 14
Análise Geral do Desempenho	pág. 17
Análise Geral de Confiabilidade	pág. 18
Análise Geral de Falhas	pág. 19
Matriz Energética e Matriz Elétrica	pág. 20
Matriz Eólica Brasileira	pág. 21
Análise Estatística das Características do Vento	pág. 22
Distribuição de Frequência	pág. 22
Distribuição de Weibull	pág. 23
Distribuição de Rayleigh	pág. 23
Densidade de Massa Atmosférica	pág. 24
Atlas dos Ventos Brasileiros	pág. 25
Projeto	pág. 26
Diagrama Unifilar. Png.....	pág. 27
Potência Eólica Útil	pág. 28
Curva de Potência de um Aerogerador	pág. 29
Conclusão	pág. 31
Bibliografia	pág. 32
Dados Pertinentes Para Estudo	pág. 32

Introdução

A energia eólica é uma forma de energia renovável que é gerada a partir da força do vento. Fonte de energia limpa que não emite poluentes, o que a torna uma das formas de geração de energia mais sustentáveis disponíveis atualmente.

É gerada a partir de turbinas eólicas que transformam a energia cinética do vento em energia elétrica. As turbinas eólicas são compostas, geralmente, por hélices, um gerador e uma torre. Quando a massa de ar traciona as pás das hélices, o gerador converte a energia mecânica em corrente elétrica, que pode ser armazenada ou enviada para a rede elétrica.

A energia eólica é uma das fontes de energia renovável que mais crescem no mundo, com uma capacidade de geração de energia elétrica cada vez maior. Os parques eólicos podem ser encontrados em todo o mundo, desde pequenas instalações em áreas rurais até grandes usinas offshore em águas profundas. Os parques eólicos podem ser projetados e construídos rapidamente, permitindo uma implantação ágil de novas fontes de energia em regiões que necessitam de uma capacidade energética adicional. Além disso, os parques eólicos podem ser construídos em áreas rurais ou remotas, oferecendo novas oportunidades de emprego e desenvolvimento para essas regiões.

Apesar destas e outras vantagens, a energia eólica também apresenta alguns desafios, como o impacto visual e *sonoro** dos parques eólicos em áreas residenciais, bem como a necessidade de infraestrutura de transmissão de eletricidade para distribuir a energia gerada pelos parques eólicos para os centros de consumo. No entanto, com as tecnologias e estratégias adequadas, a energia eólica pode ser uma solução de energia limpa e sustentável para o futuro.

* De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), o limite de ruído recomendado para áreas residenciais durante a noite é de 40 decibéis (dB), e para áreas diurnas é de 55 dB. Algumas regulamentações locais podem ter limites de ruído mais restritivos para turbinas eólicas.

Em média, as turbinas eólicas modernas produzem entre 45 e 50 dB de ruído a uma distância de 300 metros, o que é comparável ao ruído de um ar-condicionado ou um conversor de energia elétrica. No entanto, o ruído pode variar dependendo das condições atmosféricas e da proximidade da turbina com áreas residenciais ou outras fontes de ruído.

Uma breve história da Eólica

Os primeiros estudos sobre a energia eólica remontam à Antiguidade. Quando seres humanos utilizavam a força do vento para impulsionar os barcos à vela e mover moinhos de vento para moer grãos. Foi só no final do século XIX e início do século XX que a energia eólica começou a ser explorada de forma mais sistemática para a geração de eletricidade.

Em 1887 o engenheiro escocês, *James Blyth* (1839 – 1906) construiu o primeiro gerador eólico, para suprir sua demanda na iluminação de casa. Já em 1888, o físico e inventor americano *Charles F. Brush* (1849 – 1929) construiu sua versão do mesmo gerador eólico para produzir eletricidade na cidade de Cleveland, Ohio. Mas em maiores dimensões. O equipamento consistia em uma torre de 18 metros de altura com quatro pás de madeira. A hélice, com 17 metros de diâmetro, era capaz de impulsionar um gerador rudimentar e produzir até 12 kW de potência.

Em 1919, o físico alemão *Albert Betz* (1885 – 1968), estudando a eficiência na conversão de energia eólica em energia rotacional mecânica, concluiu que nenhuma turbina eólica pode converter mais do que **59.3%** da energia cinética do vento, o que é conhecido como **limite de Betz**. Este limite nada tem a ver com ineficiências no gerador, mas na própria natureza das turbinas eólicas. E a tecnologia de 3 pás montadas em eixo horizontal é a que atualmente consegue ter a melhor eficiência de conversão em condições ideais de vento.

Outro pesquisador notável é o engenheiro alemão *Johannes Jull* (1887 – 1969), que desenvolveu a primeira turbina eólica de eixo vertical.

Tipos de aerogeradores



Aerogeradores de eixo horizontal: são os mais comuns e consistem em pás do rotor que giram em torno de um eixo horizontal. Eles são adequados para locais com ventos fortes e constantes.

Em geral, os rotores de eixo vertical têm a vantagem de não necessitarem de mecanismos de acompanhamento para variações da direção do vento, o que reduz a complexidade do projeto e os esforços devido às forças de Coriolis*

Figura 1 - Fonte: <http://xxicenturynewcountry.blogspot.com/2011/05/energias-utilizar-parte-ii.html>

* A força de Coriolis é uma força fictícia que ocorre em movimentos rotacionais quando existem movimentos relativos ao referencial inercial. Pode ser entendida, ainda, como uma componente suplementar à força centrífuga. Seu nome se deve ao engenheiro Gustave-Gaspard Coriolis, que descreveu matematicamente essa força

Aerogeradores de eixo vertical: têm pás do rotor que giram em torno de um eixo vertical. Eles são adequados para locais com ventos turbulentos e mudanças de direção frequentes.

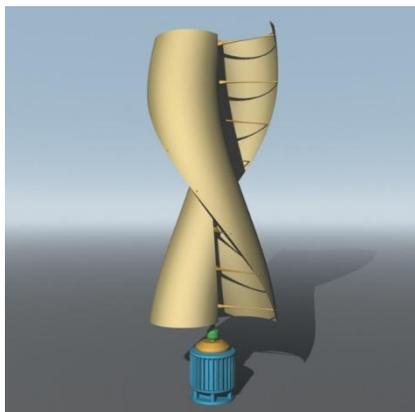
Não existe um padrão ou formato definido de turbinas eólicas verticais, basicamente o que possuem em comum são as pás girando no mesmo plano que o chão. A razão de ter tantos modelos com diferentes e variadas geometrias se dá porque existe menos informação e pesquisa nessa área, o que motiva os fabricantes e empreendedores a inovar

Principais aerogeradores de eixo vertical:



Darrieus: São turbinas com perfil aerodinâmico desenhado de forma semelhante às asas dos aviões, criando sustentação para se movimentarem e gerar energia. Os aerogeradores Darrieus são mais eficientes que as turbinas do tipo Savonius.

Figura 2 - Fonte: <https://windbox.com.br/blog/componentes-dos-aerogeradores/>



Savonius: A força predominante neste tipo de geradores é a força de arrasto, ou seja, as turbinas giram predominantemente pela pressão do ar sobre as pás. As turbinas Savonius são geralmente mais baratas e começam a girar a uma velocidade mais baixa em relação a outros tipos de turbinas eólicas, porém é o tipo de turbina eólica menos eficiente tomando em consideração a área de captação de energia e a produção anual da mesma.

Figura 3 Fonte: <https://free3d.com/pt/3d-model/helical-savonius-wind-turbine-vawt-432.html>



Darrieus-Savonius: Turbina eólica híbrida com os sistemas Darrieus e Savonius acoplados ao mesmo eixo, os quais segundo os fabricantes usam as vantagens de cada um dos tipos de turbina.

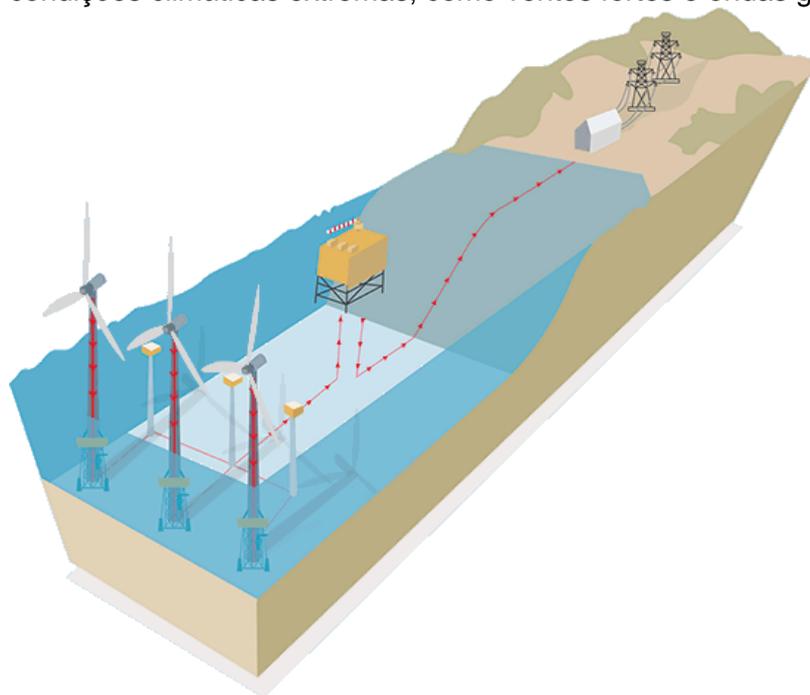
Figura 4 - Fonte: <https://typesdenergie.weebly.com/georges-jean-marie-darrieus.html>



Giromill: É um subtipo de turbina Darrieus, onde as pás, originalmente curvas, são substituídas por lâminas retas verticais à torre. A principal vantagem deste projeto é que o torque gerado permanece quase constante ao longo de um amplo intervalo. Durante este intervalo, o torque é perto do máximo possível.

Figura 5 - Fonte: <https://www.google.com/imgres?imgurl=https://encrypted-tbn1.gstatic.com/images?q%3DtbN:ANd9GcT5g7AJbe1Wr02swOf2fTLCIZojIE7vSHof-hXhEfR-6L8Axa6&tbnid=pQyLLPnL6ZoQcM&vet=1&imgrefurl=https://www.amazon.com.br/Gerador-turbina-e%C3%B3lica-vertical->

Aerogeradores offshore: são instalados no mar e são projetados para suportar condições climáticas extremas, como ventos fortes e ondas grandes.



O vento que sopra no mar é mais intenso que em terra firme, chegando inclusive a dobrar a produção caso se compare com um parque onshore médio. Além disso, o impacto visual e acústico é baixo e, graças a isso, sua capacidade instalada é superior no mar, chegando a centenas de megawatts. Por outro lado, a facilidade proporcionada pelo transporte marítimo permite atingir potências unitárias e tamanhos muito maiores do que em terra.

Figura 6 - Fonte: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/como-funcionam-os-parques-eolicos-offshore>



Figura 7 - Fonte: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/como-funcionam-os-parques-eolicos-offshore>

Aerogeradores sem pás: usam tecnologias de turbina sem pás, como o modelo de vento de eixo sem pás, que utiliza um sistema de rotação magnética para gerar eletricidade.

O princípio do aerogerador vertical baseia-se em aproveitar as oscilações provocadas numa estrutura absorvendo a energia mecânica desse movimento, produzindo em consequência energia elétrica. Este novo sistema produz menos ruído e representa um risco muito inferior para o ecossistema das aves e o meio ambiente envolvente.



Figura 8 - Fonte: <https://vortexbladeless.com/>

<https://youtu.be/Mf-gps4r2L0>

(assista ao vídeo seguindo o link acima – uma apresentação da BladeLess™, empresa que desenvolveu o projeto)

Como funciona um aerogerador:

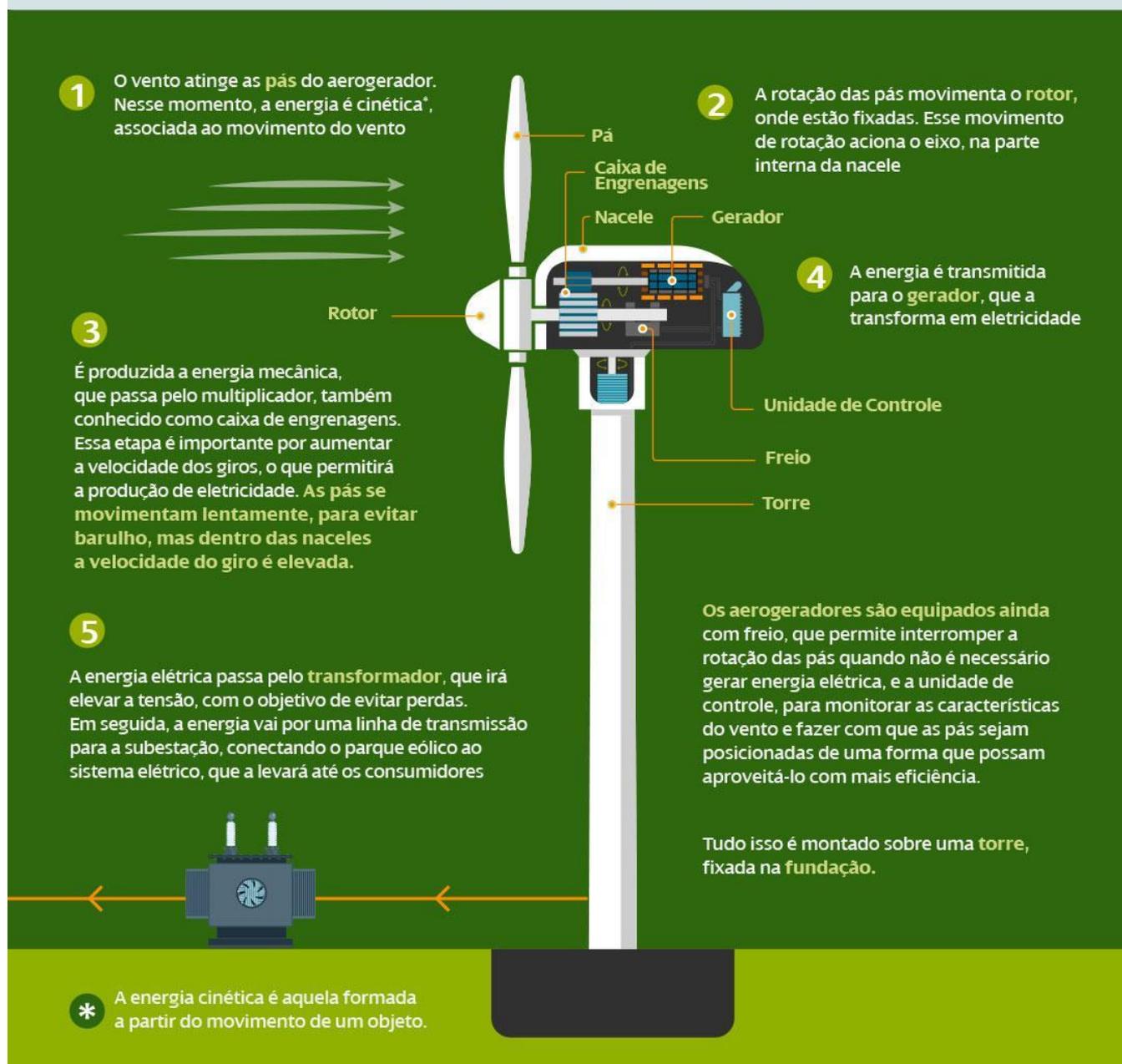


Figura 9 - Fonte: https://www.neoenergia.com/pt-br/te-interessa/meio-ambiente/PublishingImages/aerogerador/Info_Aerogerador_Neo_.pdf

Os principais componentes de aerogeradores: hardware e software

Pás: as pás são responsáveis por capturar a energia do vento e convertê-la em energia mecânica.

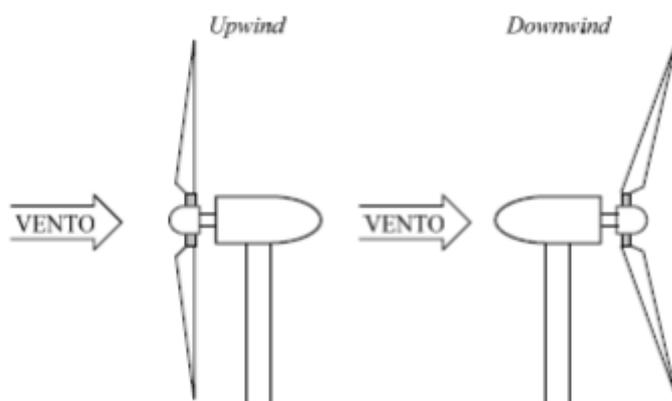


Figura 10 – Fonte: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/19308/19308_3.PDF

causada no vento pela torre, levando a maiores cargas de fadiga, comparada às turbinas downwind.

Há duas maneiras, na prática, em que as pás são dispostas no corpo da nacela do aerogerador. Sendo elas *Upwind* e *Downwind*.

Nas turbinas downwind, o vento incide na área de varredura do rotor por trás da turbina eólica. Assim, o vento passa pela torre antes de encontrar as pás do rotor. A principal vantagem das turbinas downwind é a sua construção com componentes mais leves, tornando o conjunto mais flexível e barato. No entanto, para esta configuração ocorre a turbulência

Rotor: o rotor é composto pelas pás e pelo cubo que as une. Ele é responsável por girar o eixo do gerador.

Eixo: o eixo é a estrutura que liga o rotor ao gerador. Ele transfere a energia mecânica gerada pelo rotor para o gerador.

Gerador: o gerador é responsável por converter a energia mecânica em energia elétrica.

2 modelos de geradores são os mais comuns:

geradores ***síncronos de ímã permanente*** e os geradores ***assíncronos de dupla alimentação***.

* O gerador *síncrono de ímã permanente* usa um rotor com um conjunto de ímãs permanentes que gera um campo magnético. À medida que as pás do gerador eólico giram, o rotor gira em conjunto e o campo magnético move-se através das bobinas do estator, gerando uma corrente elétrica. Utilizados em turbinas de pequeno e médio porte.

* Já o gerador *assíncrono de dupla alimentação* possui um rotor com bobinas alimentadas por um sistema eletrônico de controle de velocidade. Eles são mais adequados para turbinas eólicas de velocidade variável, onde é necessário um controle preciso da velocidade de rotação do rotor para otimizar a produção de energia.

Nacela: a nacela é a estrutura que abriga o gerador e outros componentes, como a caixa de engrenagens e o sistema de controle.

Torre: a torre é a estrutura que sustenta o rotor, o eixo e a nacela. Ela pode ter diferentes alturas, dependendo do tamanho do aerogerador e das condições do local.

Sistema de controle: o sistema de controle monitora o funcionamento do aerogerador e ajusta a direção das pás para maximizar a captura de energia do vento.

Sistema de transmissão: o sistema de transmissão é responsável por transferir a energia elétrica gerada pelo gerador para a rede elétrica.

Caixa de engrenagens: a caixa de engrenagens é um componente mecânico que aumenta a velocidade de rotação do rotor, permitindo que o gerador produza energia elétrica de maneira mais eficiente.

Sistema de freios: o sistema de freios é responsável por parar o rotor em situações de emergência ou manutenção.

Sistema de resfriamento: o sistema de resfriamento é responsável por manter a temperatura dos componentes eletrônicos em níveis seguros, garantindo a durabilidade do aerogerador.

Sistema de lubrificação: o sistema de lubrificação é responsável por garantir que as peças mecânicas do aerogerador, como o eixo e a caixa de engrenagens, funcionem adequadamente, reduzindo o desgaste e prolongando a vida útil do equipamento.

Sistema de monitoramento: o sistema de monitoramento é responsável por coletar informações sobre o funcionamento do aerogerador, como velocidade do vento, temperatura e produção de energia, permitindo que os operadores monitorem e controlem o equipamento de forma remota.

Sistema de proteção contra raios: o sistema de proteção contra raios é responsável por evitar danos aos componentes eletrônicos do aerogerador em caso de descargas atmosféricas.
Transformador: o transformador é responsável por aumentar a tensão da energia elétrica produzida pelo gerador, tornando-a adequada para ser transmitida na rede elétrica.

Sistema de conexão à rede: o sistema de conexão à rede é responsável por conectar o aerogerador à rede elétrica, permitindo a distribuição da energia elétrica produzida para os consumidores.

Controlador de carga: em aerogeradores que são utilizados em sistemas isolados da rede elétrica, o controlador de carga é responsável por gerenciar a carga de baterias ou outros sistemas de armazenamento de energia.

Sistema de iluminação: o sistema de iluminação é utilizado em alguns aerogeradores para indicar o seu funcionamento, como luzes de sinalização e avisos de alerta.

Sistema de aquecimento: em regiões frias, o sistema de aquecimento é utilizado para evitar que os componentes do aerogerador sejam danificados por temperaturas muito baixas.

Sistema de limpeza: o sistema de limpeza é utilizado para remover sujeira e detritos que possam se acumular nas pás do rotor, afetando o seu desempenho e a produção de energia elétrica

Sistema de controle de vibração: o sistema de controle de vibração é responsável por monitorar e reduzir as vibrações no aerogerador, evitando danos aos componentes mecânicos e melhorando a eficiência do equipamento.

Sistema de iluminação interna: o sistema de iluminação interna é utilizado em algumas nacelles para permitir a realização de manutenção e reparos internos com segurança.

Sistema de monitoramento ambiental: o sistema de monitoramento ambiental é utilizado para coletar dados sobre o impacto do aerogerador no meio ambiente, como o ruído e a interferência com a migração de pássaros.

Sistema de proteção contra gelo: em regiões com baixas temperaturas, o sistema de proteção contra gelo é utilizado para evitar que as pás do rotor sejam danificadas por acúmulo de gelo.

Sistema de travamento: o sistema de travamento é utilizado para imobilizar o rotor durante a realização de manutenção ou reparos, garantindo a segurança dos trabalhadores.

Sistema de extinção de incêndios: o sistema de extinção de incêndios é utilizado para prevenir e combater incêndios no aerogerador, evitando danos ao equipamento e riscos à segurança.

Sistema de proteção contra ventos fortes: o sistema de proteção contra ventos fortes é utilizado para proteger o aerogerador de ventos acima da sua capacidade de suportar, evitando danos ao equipamento e riscos à segurança.

Sistema de controle de pitch: o sistema de controle de pitch é responsável por controlar o ângulo de inclinação das pás do rotor, permitindo que o aerogerador opere com eficiência em diferentes velocidades de vento.

Sistema de monitoramento de temperatura das pás: o sistema de monitoramento de temperatura das pás é utilizado para monitorar a temperatura das pás do rotor, evitando danos causados por temperaturas muito altas ou muito baixas.

Sistema de monitoramento de fadiga: o sistema de monitoramento de fadiga é utilizado para monitorar a fadiga dos componentes mecânicos do aerogerador, permitindo que sejam realizadas manutenções preventivas e reduzindo o risco de falhas.

Sistema de controle de torque: o sistema de controle de torque é responsável por controlar a velocidade de rotação do gerador, permitindo que o aerogerador opere com eficiência em diferentes condições de vento.

Sistema de proteção contra sobretensão: o sistema de proteção contra sobretensão é utilizado para proteger o aerogerador de picos de tensão na rede elétrica, evitando danos ao equipamento.

Sistema de aterramento: o sistema de aterramento é utilizado para garantir que o aerogerador esteja eletricamente conectado ao solo, protegendo os operadores e o equipamento contra descargas elétricas.

Sistema de proteção contra intrusão: o sistema de proteção contra intrusão é utilizado para evitar que pessoas ou animais entrem na área de operação do aerogerador, evitando acidentes e danos ao equipamento.

Componentes da Análise Geral do Desempenho de Aerogeradores

A análise do desempenho de aerogeradores, de maneira geral, envolve a avaliação de uma série de métricas para determinar a eficiência da geração de energia elétrica a partir do vento. Algumas das principais métricas incluem:

Capacidade nominal: A capacidade nominal de um aerogerador é a quantidade máxima de energia elétrica que ele pode gerar. É determinada pela velocidade do vento na qual o aerogerador atinge sua potência máxima.

Fator de capacidade: O fator de capacidade é a relação entre a energia elétrica efetivamente gerada pelo aerogerador e a sua capacidade nominal. Por exemplo, se um aerogerador tem uma capacidade nominal de 1 MW e gera 800 MWh de energia em um ano, o fator de capacidade é de 80%.

Curva de potência: A curva de potência mostra como a potência do aerogerador varia com a velocidade do vento. Ela é importante para determinar em que velocidade do vento o aerogerador atinge sua potência máxima e para avaliar a eficiência da sua operação em diferentes condições de vento.

Rendimento: O rendimento é a relação entre a energia elétrica gerada pelo aerogerador e a energia cinética do vento que passa por ele. O rendimento depende da eficiência das pás do rotor em capturar a energia do vento e da eficiência do sistema de transmissão em converter essa energia em eletricidade.

Velocidade de partida: A velocidade de partida é a velocidade mínima do vento necessária para que o aerogerador comece a gerar energia elétrica. Ela é importante para determinar a viabilidade de instalação de um aerogerador em determinada localidade.

Fator de carga: O fator de carga é a relação entre a energia elétrica gerada pelo aerogerador e a sua capacidade nominal, considerando o tempo em que ele está operando. Ele leva em conta não apenas a capacidade nominal do aerogerador, mas também o tempo em que ele está disponível para gerar energia elétrica.

Tempo de disponibilidade: O tempo de disponibilidade é a porcentagem do tempo em que o aerogerador está operacional e disponível para gerar energia elétrica. Esse dado é importante para avaliar a confiabilidade do sistema e identificar possíveis falhas ou problemas de manutenção.

Frequência e magnitude de paradas não programadas: As paradas não programadas podem ocorrer devido a falhas técnicas, mau tempo, problemas na rede elétrica, entre outros fatores. É importante avaliar a frequência e magnitude dessas paradas para identificar possíveis problemas e planejar a manutenção preventiva.

Nível de ruído: O ruído gerado pelos aerogeradores pode ser uma preocupação para as comunidades próximas. É importante avaliar o nível de ruído gerado pelos aerogeradores e garantir que esteja dentro dos limites permitidos pelas normas ambientais e de saúde.

Integração com a rede elétrica: A integração dos aerogeradores com a rede elétrica pode afetar o desempenho do sistema como um todo. É importante avaliar a estabilidade e a qualidade da energia elétrica gerada pelos aerogeradores e garantir que esteja de acordo com os padrões de segurança e qualidade da rede elétrica.

Componentes da Análise Geral de Confiabilidade de Aerogeradores

A análise de confiabilidade de aerogeradores é uma avaliação importante para garantir a operação segura e eficiente desses equipamentos. A confiabilidade refere-se à probabilidade de que um aerogerador funcione sem falhas durante um determinado período de tempo.

Existem várias técnicas que podem ser utilizadas para avaliar a confiabilidade de aerogeradores, entre elas:

Análise de histórico de falhas: essa técnica envolve a coleta e análise de dados sobre as falhas ocorridas em aerogeradores semelhantes em condições similares de operação. Com base nesses dados, é possível identificar padrões de falhas e estimar a probabilidade de falha para um determinado período de tempo.

Análise de modo e efeito de falhas (FMEA): essa técnica envolve a identificação de todos os modos de falha possíveis em um aerogerador e a avaliação dos efeitos dessas falhas na operação do equipamento. Com base nessa análise, é possível identificar os modos de falha mais críticos e estabelecer medidas para minimizar a probabilidade de ocorrência dessas falhas.

Análise de árvore de falhas (FTA): essa técnica envolve a identificação de todos os eventos que podem levar a uma falha no aerogerador e a avaliação da probabilidade de ocorrência desses eventos. Com base nessa análise, é possível identificar os eventos mais críticos e estabelecer medidas para minimizar a probabilidade de ocorrência desses eventos.

Análise de confiabilidade Monte Carlo: essa técnica envolve a simulação de eventos aleatórios em um modelo de aerogerador para estimar a probabilidade de falha em um determinado período de tempo. Com base nessa análise, é possível identificar os componentes mais críticos do aerogerador e estabelecer medidas para melhorar a confiabilidade desses componentes.

A análise de confiabilidade de aerogeradores é uma ferramenta importante para garantir a operação segura e eficiente desses equipamentos, reduzindo os custos de manutenção e aumentando a vida útil do equipamento.

Componentes da Análise Geral de Falhas de Aero geradores

A análise de falhas de aerogeradores é uma importante tarefa na manutenção preventiva desses equipamentos, pois permite identificar e corrigir problemas antes que causem danos graves ou interrupções no funcionamento do sistema.

Aqui estão algumas das principais causas de falhas em aerogeradores:

Desgaste mecânico: O desgaste mecânico é um problema comum em componentes como rolamentos, engrenagens e correntes. A falta de lubrificação adequada, a contaminação por partículas de sujeira e o uso excessivo podem levar ao desgaste excessivo e eventual falha desses componentes.

Problemas elétricos: Problemas elétricos podem ocorrer em componentes como geradores, transformadores e cabos de alimentação. A corrosão, a umidade e a sobrecarga elétrica podem danificar esses componentes e levar à falha do sistema.

Problemas com o controlador: O controlador é responsável por monitorar e controlar o funcionamento do aerogerador. Problemas com o controlador podem resultar em falhas no sistema de frenagem, desalinhamento da nacela ou problemas na orientação das pás.

Problemas de manutenção: A manutenção inadequada pode levar a problemas em diversas áreas do aerogerador, como danos causados por vibração, vazamentos de óleo, problemas na instalação ou substituição de peças de baixa qualidade.

Para evitar falhas, é importante realizar uma manutenção preventiva regular, que inclui inspeções periódicas, troca de peças desgastadas, limpeza e lubrificação adequada, além de verificar o funcionamento correto do controlador e do sistema elétrico. A detecção precoce de problemas pode evitar custos mais elevados com reparos e manutenção, bem como garantir a segurança dos trabalhadores e a eficiência do aerogerador.

DIFERENÇA DE MATRIZ ENERGÉTICA E MATRIZ ELÉTRICA

A matriz energética se refere ao conjunto de fontes de energia utilizadas em um país ou região, incluindo não apenas a eletricidade, mas também combustíveis fósseis (como petróleo, gás natural e carvão), energias renováveis (como solar, eólica, hidráulica e biomassa), entre outras. Ou seja, é uma visão mais ampla do conjunto de recursos utilizados para suprir as demandas energéticas de uma determinada área.

Já a matriz elétrica é um subconjunto da matriz energética, que se refere especificamente à forma como a energia elétrica é gerada e distribuída em uma determinada área. A matriz elétrica considera a participação de cada fonte de geração de eletricidade na composição da oferta de energia elétrica, incluindo a geração centralizada em usinas de energia, a geração distribuída (como painéis solares em telhados de casas) e as importações e exportações de eletricidade.

MATRIZ EÓLICA BRASILEIRA RECENTE

Em 2020, a geração eólica alcançou uma capacidade instalada de 16.659 MW e produziu 44.590 GWh de energia. Já em 2021, a capacidade instalada aumentou para 19.109 MW e a produção de energia atingiu 52.736 GWh. No primeiro trimestre de 2022, a capacidade instalada de geração eólica atingiu 20.207 MW, com a produção de energia elétrica de 14.427 GWh. Já nos primeiros quatro meses de 2023, a capacidade instalada de geração eólica alcançou 22.359 MW, com uma produção de energia de 16.429 GWh.

Esses dados demonstram um crescimento constante da geração eólica no país, impulsionado pelo aumento da capacidade instalada e pela melhoria da eficiência dos parques eólicos. Além disso, a energia eólica se consolida como uma importante fonte de energia renovável no Brasil, contribuindo para a diversificação da matriz elétrica e para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

A capacidade instalada de geração eólica no Brasil tem crescido constantemente, passando de 15.104 MW em janeiro de 2020 para 22.847 MW em março de 2023. A geração de energia eólica também tem apresentado um aumento contínuo nesse período, alcançando um pico de 11.017 MW médios em agosto de 2021. O fator de capacidade médio mensal tem oscilado ao longo do período analisado, variando de 34,1% em janeiro de 2020 a 50,1% em dezembro de 2020, e ficando em torno de 40% em 2021 e 2022. O Nordeste tem sido a região com maior capacidade instalada e geração de energia eólica no país, seguida pelo Sul e pelo Sudeste. Em março de 2023, o Nordeste tinha uma capacidade instalada de 11.278 MW, enquanto o Sul tinha 6.478 MW e o Sudeste tinha 3.137 MW.

Entre 2020 e 2023, a capacidade instalada de geração eólica no país aumentou de 16,5 GW para 22,5 GW, representando um acréscimo de cerca de 36%. Além disso, a geração de energia eólica no Brasil aumentou de 56,8 TWh em 2020 para 74,2 TWh em 2023, o que representa um aumento de aproximadamente 30%.

Em relação ao fator de capacidade mensal, observamos uma variação sazonal na geração de energia eólica, com os meses de inverno apresentando maiores índices de geração. Em média, o fator de capacidade mensal da geração eólica no Brasil tem se mantido acima de 50% nos últimos anos.

O fator de capacidade mensal médio da geração eólica no Brasil foi de 51% em 2020, 56% em 2021 e 57% em 2022, mostrando um aproveitamento crescente da capacidade instalada dos parques eólicos. A região Nordeste do Brasil é responsável por grande parte da geração eólica do país, com destaque para os estados do Rio Grande do Norte, Bahia e Ceará.

Em 2020, o fator de capacidade médio mensal dos parques eólicos no Brasil foi de 44,8%, com um pico em agosto de 58,3% e um mínimo em dezembro de 31,9%.

Em 2021, até março, a geração de energia eólica foi de 16,6 TWh, representando 9,2% da geração total de energia elétrica no país.

No primeiro trimestre de 2021, o fator de capacidade médio mensal dos parques eólicos foi de 46,5%, com um pico em março de 56,9% e um mínimo em janeiro de 39,8%.

Em março de 2023, a geração de energia eólica foi de 9,9 TWh, representando 8,3% da geração total de energia elétrica no país.

Em março de 2023, o fator de capacidade médio mensal dos parques eólicos foi de 42,3%, com um pico em março de 47,8% e um mínimo em janeiro de 37,4%.

Análise estatística das características do vento

A velocidade do vento, principal parâmetro a ser considerado em um estudo do potencial eólico de uma região, pode apresentar variações bruscas em pequenos intervalos de tempo, causando uma grande oscilação na quantidade de energia gerada. Esse fato, acrescido do alto investimento necessário para a instalação de um parque eólico, ilustram a necessidade de aprofundados estudos preliminares nas regiões onde se planeja a instalação. Uma das ferramentas mais importantes no estudo do potencial eólico de uma região é a coleta de dados para análise das características do vento. Levando-se em consideração a alta taxa de variabilidade e aleatoriedade, estudos das distribuições de probabilidade estatística permitem ter uma melhor noção acerca do comportamento da velocidade do vento.

Existem, no geral, 3 modelos matemáticos usados para descrever a velocidade do vento e sua distribuição

Distribuição de Frequência

É usada para calcular a probabilidade de ocorrência de velocidades do vento em intervalos específicos. Essa distribuição assume que as velocidades do vento são distribuídas uniformemente em um determinado intervalo. Isso significa que, para um intervalo de velocidades do vento específico, a probabilidade de ocorrer uma determinada velocidade do vento é proporcional ao comprimento desse intervalo.

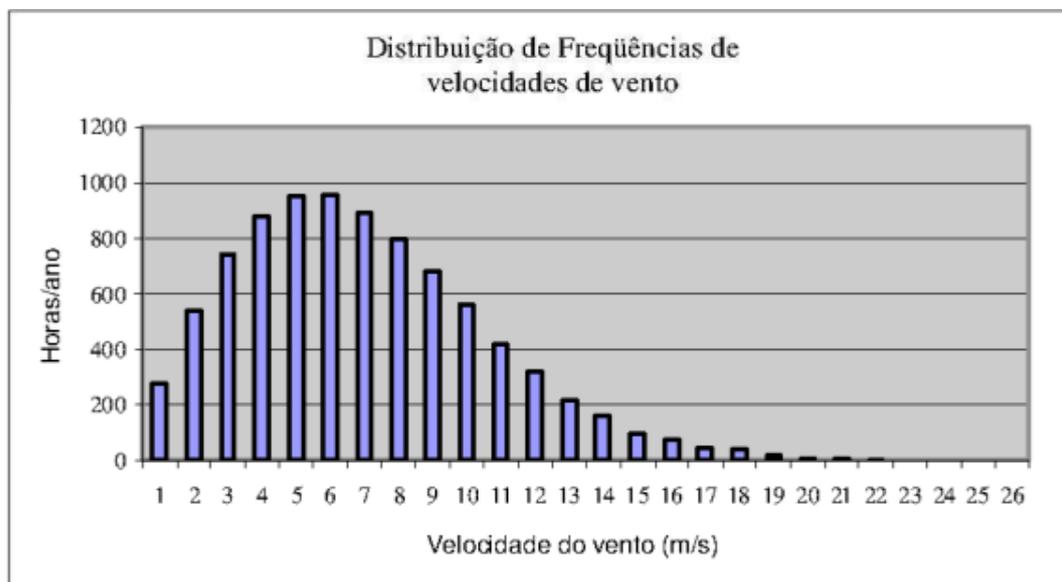


Figura 11 – Distribuição de frequência da velocidade média dos ventos durante um ano - Fonte: http://ead2.ctgas.com.br/a_rquivos/aperefeicoamento/Fundamentos_Geracao_Eolica/Material_de_apoio/Apostila.pdf

Distribuição de Weibull

É uma distribuição mais complexa e é frequentemente usada para modelar a velocidade do vento em locais com variações significativas na velocidade do vento. A distribuição de Weibull é uma função de probabilidade que descreve a probabilidade de ocorrência de velocidades do vento em um determinado intervalo. Essa distribuição é caracterizada por dois parâmetros: o fator de forma (k) e a escala (c). O fator de forma descreve a forma da distribuição de probabilidade, enquanto a escala descreve a magnitude das velocidades do vento.

$$f(u) = \frac{k}{C} \left(\frac{u}{C} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{u}{C} \right)^k}$$

Figura 12 - Escala adimensional (k) - Fonte:

http://ead2.ctgas.com.br/a_rquivos/aperfeicoamento/Fundamentos_Geracao_Eolica/Material_de_apoio/Apostila.pdf

$$f(u) = \frac{2}{C} \left(\frac{u}{C} \right) e^{-\left(\frac{u}{C} \right)^2}$$

Figura 13 - Escala em metros/ segundo (C) - Fonte:

http://ead2.ctgas.com.br/a_rquivos/aperfeicoamento/Fundamentos_Geracao_Eolica/Material_de_apoio/Apostila.pdf

Distribuição de Rayleigh

É uma distribuição que é frequentemente usada para modelar a velocidade do vento em locais com ventos suaves e regulares. Essa distribuição é uma função de probabilidade que descreve a probabilidade de ocorrência de velocidades do vento em um determinado intervalo. A distribuição de Rayleigh é caracterizada por um único parâmetro, a escala (σ). A escala descreve a magnitude das velocidades do vento e é diretamente proporcional à potência eólica útil.

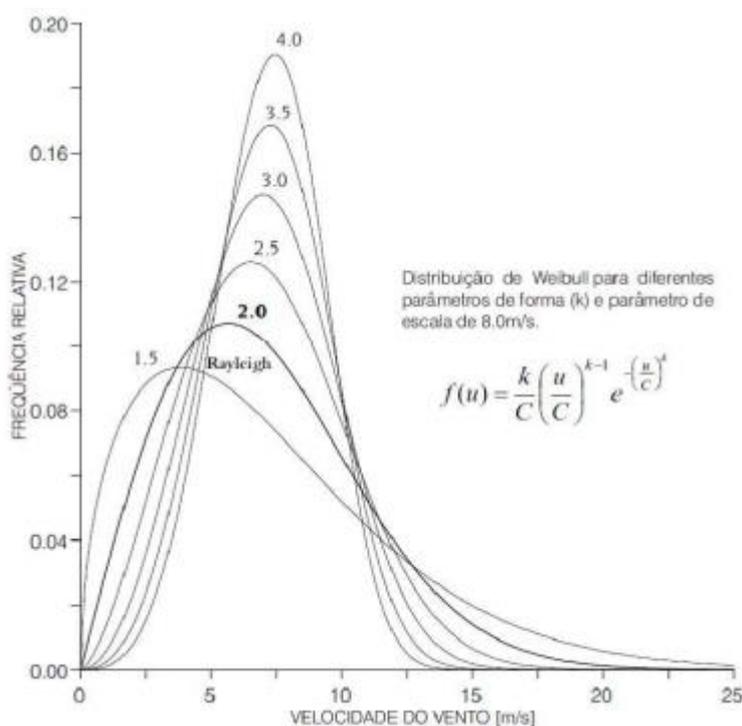


Figura 14 - Distribuições de Weibull Rayleigh - Fonte:

http://ead2.ctgas.com.br/a_rquivos/aperfeicoamento/Fundamentos_Geracao_Eolica/Material_de_apoio/Apostila.pdf

Densidade da massa atmosférica

Diversos fatores influenciam o desempenho dos aerogeradores, como a velocidade e a direção do vento, o tipo e o tamanho das pás, a altura e a localização das torres, entre outros. Um desses fatores é a densidade da massa atmosférica, que representa a quantidade de matéria por unidade de volume do ar.

A densidade do ar varia de acordo com a temperatura, a pressão, a umidade e a altitude. Quanto maior a temperatura, menor a densidade do ar, pois os gases se expandem com o calor. Quanto maior a pressão, maior a densidade do ar, pois os gases se comprimem com a força exercida sobre eles. Quanto maior a umidade, menor a densidade do ar, pois o vapor de água tem uma massa molar menor que o nitrogênio e o oxigênio, que são os principais componentes do ar seco. Quanto maior a altitude, menor a densidade do ar, pois a gravidade diminui com a distância da superfície terrestre.

...

A potência eólica disponível pode ser calculada utilizando a seguinte equação:

$$P = 0,5 * \rho * A * V^3$$

onde:

P = potência gerada (em watts)

ρ = densidade do ar (em kg/m³)

A = área efetiva da superfície das pás do rotor (em m²)

V = velocidade do vento (em m/s)

Essa fórmula mostra que a potência eólica útil é proporcional ao cubo da velocidade do vento, ou seja, uma pequena variação na velocidade do vento pode causar uma grande variação na potência gerada. Por isso, é importante escolher um local com ventos constantes e fortes para aproveitar ao máximo o potencial eólico.

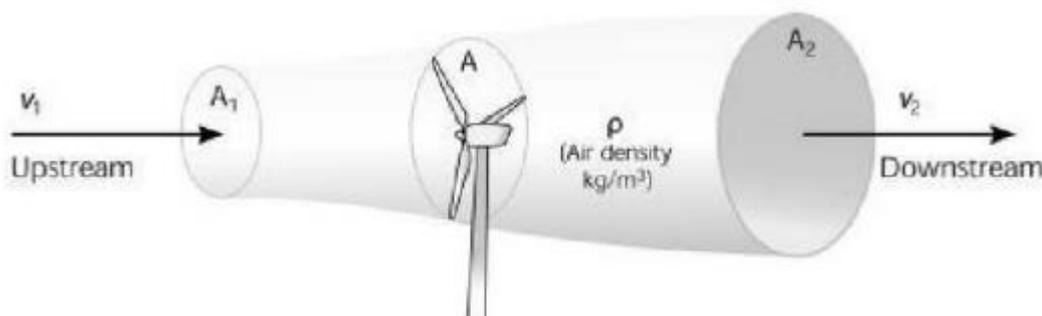


Figura 15 - Mudança na velocidade do vento após a passagem pelo aerogerador - fonte:

http://ead2.ctgas.com.br/a_rquivos/aperfeicoamento/Fundamentos_Geracao_Eolica/Material_de_apoio/Apostila.pdf

ATLAS DOS VENTOS BRASILEIROS

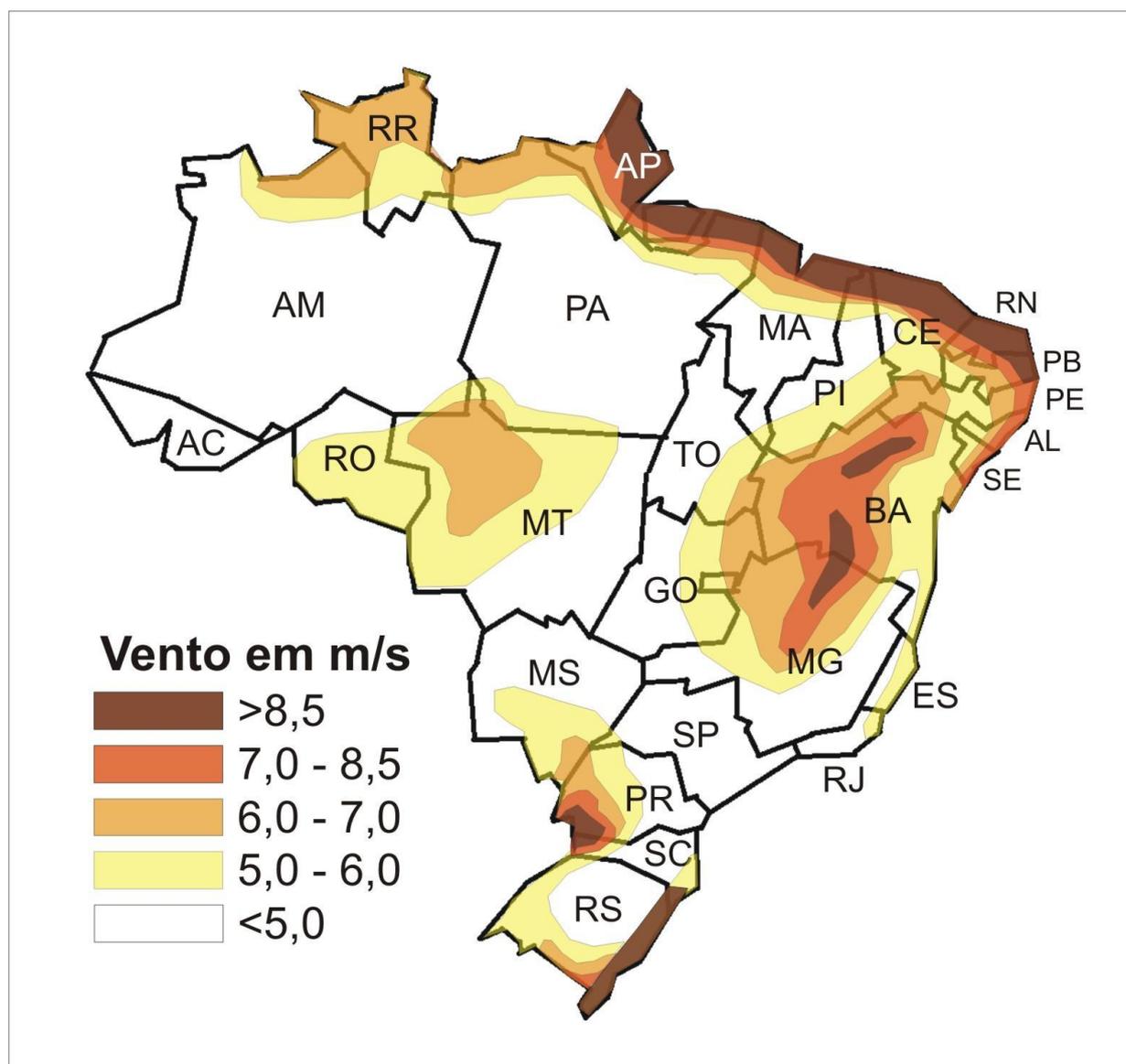


Figura 21 – Fonte <https://www.ufrgs.br/sieolica/mapaeolico1a.html>

Definição das Classes de Energia										
Classe	Mata		Campo Aberto		Zona Costeira		Morros		Montanhas	
	V_m (m/s)	E_m (W/m ²)								
4	> 6	> 200	> 7	> 300	> 8	> 480	> 9	> 700	> 11	> 1250
3	4,5 - 6	80 - 200	6 - 7	200 - 300	6,5 - 8	250 - 480	7,5 - 9	380 - 700	8,5 - 11	650 - 1250
2	3 - 4,5	25 - 80	4,5 - 6	80 - 200	3 - 4,5	100 - 250	6 - 7,5	200 - 380	3 - 4,5	300 - 650
1	<3	<25	<4,5	<80	<3	<100	<6	<200	<7	<300

Figura 22 - Velocidade média anual do vento a 50 m de altura. Fonte: Feitosa et al. (2003)

PROJETO CASEIRO - AEROGERADOR DE EIXO VERTICAL BASEADO NO ROTOR SAVONIUS



Materiais utilizados no projeto

*Motor "Direct Drive" da Lavadora-Secadora Eletrolux – Modelo LSE09;

Cuja potência máxima é de 1350W (127V) e 2100W (220V), sendo sua potência de resistência, 1000W e 2000W, respectivamente. Dados do fabricante.

*2 aros 29, de bicicleta.

*Canos de PVC, medidos, cortados e parafusados nas medidas dos materiais que tínhamos à mão.

*Para as bases estruturais, foram usadas barras de aço cortadas e soldadas para conveniência.

*1 ponte diodo.

*Fiação de cobre, simples, revestidas em PU.

DIAGRAMA UNIFILAR - EÓLICO OFF-GRID

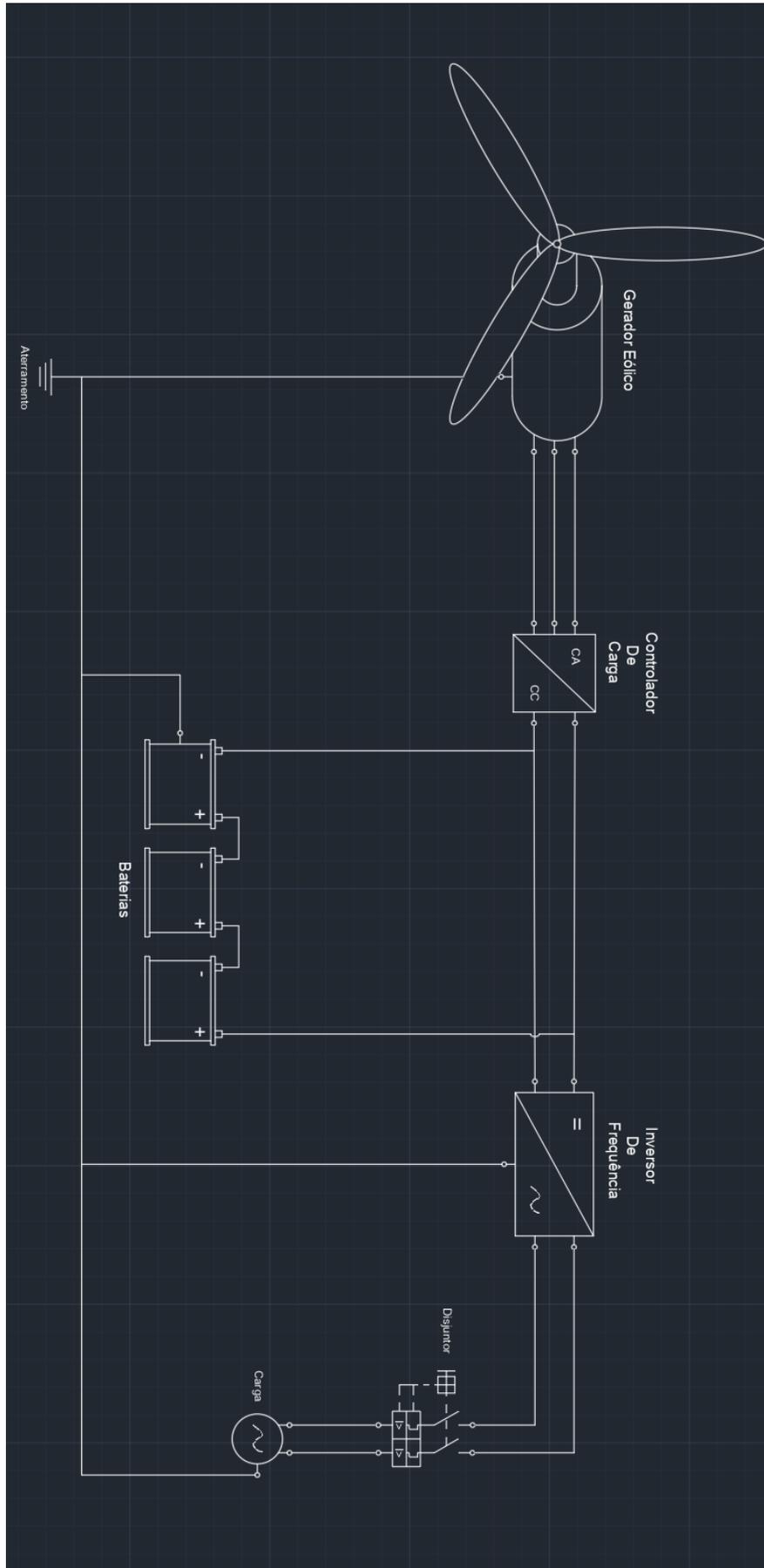


DIAGRAMA UNIFILAR SISTEMA ÉOLICO OFF-GRID

POTÊNCIA EÓLICA ÚTIL

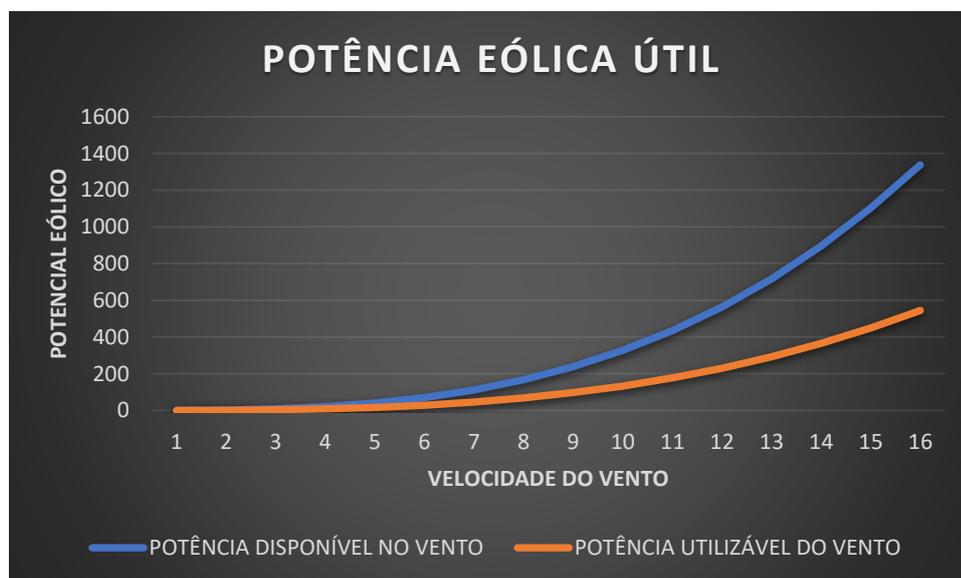
A potência eólica útil depende de vários fatores, incluindo a velocidade do vento, a densidade do ar, o tamanho e a eficiência dos aerogeradores e a localização das turbinas. Quanto maior a velocidade do vento, maior será a potência eólica útil. Além disso, a densidade do ar tem um papel importante, pois a energia cinética do vento é proporcional à densidade do ar. Por isso, os locais de maior altitude, onde a densidade do ar é menor, geralmente têm menor potencial de energia eólica.

No geral, a potência eólica útil é a quantidade de energia que pode ser extraída do vento por meio de turbinas eólicas.

POTENCIAL EÓLICO DISPONÍVEL		
V (m/s)	P disponível (W)	P utilizável (W)
1	0,326585	0,132920095
2	2,61268	1,06336076
3	8,817795	3,588842565
4	20,90144	8,50688608
5	40,823125	16,61501188
6	70,54236	28,71074052
7	112,018655	45,59159259
8	167,21152	68,05508864
9	238,080465	96,89874926
10	326,585	132,920095
11	434,684635	176,9166464
12	564,33888	229,6859242
13	717,507245	292,0254487
14	896,14924	364,7327407
15	1102,224375	448,6053206
16	1337,69216	544,4407091

Tabela produzida via Excel, baseando-se no cálculo do potencial eólico em relação a densidade de ar ($1,225 \text{ kg/m}^3$ a 15° C), um rotor de área ($0,5332 \text{ m}^2$). Potencial utilizável baseado na eficiência eólica proposta por Albert Betz*

*A Lei de Betz, mencionada na Introdução, conclui que nenhuma turbina eólica pode converter mais do que 16/27 (59,3%) da energia cinética do vento em energia mecânica no rotor do gerador.



A tabela e o gráfico ao lado apresentam valores encontrados para um rotor vertical, dimensionado em $0,62 \text{ m} \times 0,86 \text{ m}$, hipoteticamente instalado a 00 m do solo. A uma temperatura de 15° C com diferentes velocidades do vento. Vale ressaltar que as distribuições estatísticas de dispersão do vento não foram levadas em conta.

Figura 16 - Capacidade Eólica apresentada de a cordo com os resultados da tabela Excel acima

Curva de Potência de um Aerogerador

Na figura abaixo, é apresentada a curva de potência para um aerogerador. Observamos três parâmetros importantes na construção:

- VELOCIDADE DE PARTIDA: é a velocidade que o aerogerador começa a gerar potência. (no exemplo, 2m/s)
- VELOCIDADE DE POTÊNCIA NOMINAL: é a velocidade na qual o aerogerador atinge a potência nominal. (no exemplo, 13m/s)
- VELOCIDADE DE PARADA: é a velocidade que o aerogerador deixa de gerar para evitar danos estruturais resultantes das velocidades elevadas do vento. (no exemplo, 25m/s)

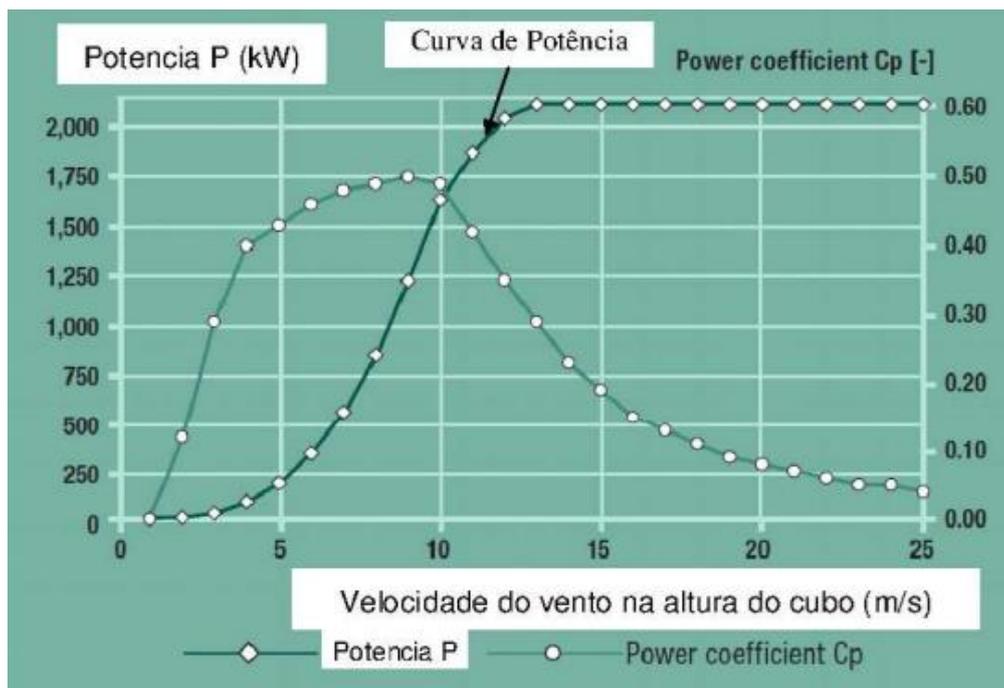


Figura 17 - Curva de Potência de um Aerogerador E82 da Wobben com potência nominal de 2MW - Fonte: http://ead2.ctgas.com.br/a_rquivos/aperfeicoamento/Fundamentos_Geracao_Eolica/Material_de_apoio/Apostila.pdf

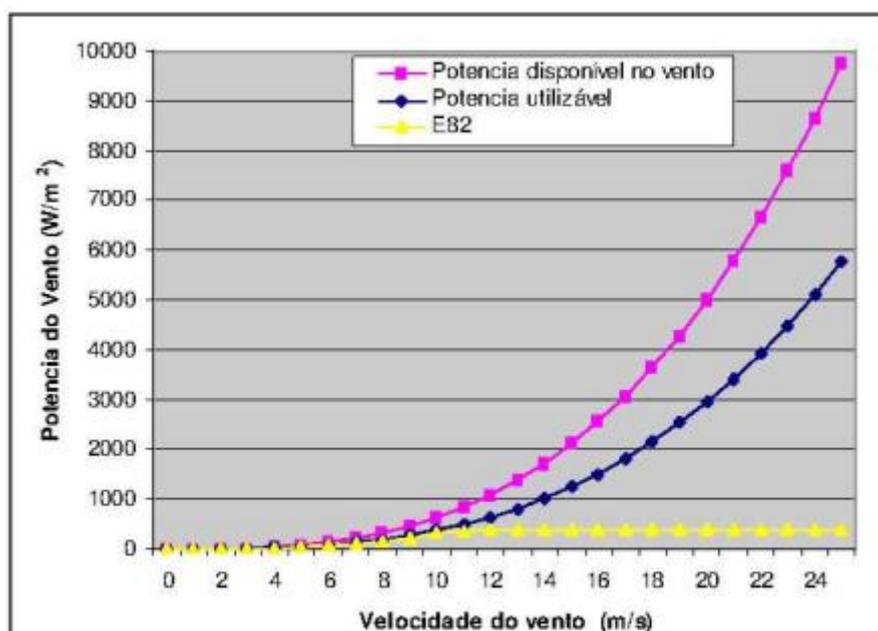


Figura 18 - Potência disponível no vento X Potência utilizável do vento X Potência gerada pelo aerogerador E82 da Wobben em função da velocidade do vento -

http://ead2.ctgas.com.br/a_rquivos/aperfeicoamento/Fundamentos_Geracao_Eolica/Material_de_apoio/Apostila.pdf

Há de se considerar o rendimento médio na eficiência da conversão entre os componentes. O rendimento do sistema de transmissão e do gerador elétrico depende da qualidade dos componentes e das perdas por atrito, calor e resistência elétrica. Ele representa a fração da potência mecânica que é convertida em potência elétrica. Os valores típicos de rendimento variam entre 0,8 e 0,9.

Estágios de conversão	Eficiência
Rotor	40 %
Transmissão	95 %
Gerador	95 %
Rajadas de vento e orientação da turbina	95 %
Média geral	35 %

Figura 19 - Fonte:

http://ead2.ctgas.com.br/a_rquivos/aperefeicoamento/Fundamentos_Geracao_Eolica/Material_de_apoio/Apostila.pdf



Figura 20 - Gráfico teórico, baseado nos dados fornecido pela figura 16, têm-se que a geração elétrica efetiva fica em torno de 14,2% do potencial eólico disponível. NÃO FORAM CONSIDERADAS AS VELOCIDADE DE PARTIDA, NOMINAL E DE PARADA.

Conclusão

A geração de energia eólica é uma das fontes de energia que mais apresenta potencial de crescimento e desenvolvimento. Diversos estudos na área da meteorologia vêm apoiando para a maior previsibilidade do potencial eólico. Assim como os avanços na engenharia de materiais vêm criando melhores pás, melhores conexões para a diminuição de perdas e aumento da eficiência dos rotores, transmissões e geradores cada vez mais tecnológicos. A energia eólica é difundida, de forma ampla, pelo território nacional e tem um futuro promissor com a conscientização pública de suas vantagens como fonte de energia renovável. Na questão ambiental, os parques eólicos tem baixíssimo impacto na fauna e na flora, o que é comprovado por vários projetos já em funcionamento.

Para este estudo de caso, foi construído um projeto simples, replicável e rudimentar. Anexado ao Trabalho desta conclusão, se encontra o diagrama unifilar do Aerogerador de eixo vertical, baseado no Rotor Savonius. Por falta de melhores instrumentos e condições climáticas favoráveis na região da cidade de São José do Rio Preto, noroeste do estado de São Paulo, todas as medições e estudos são teóricos. Não havendo a devida precisão, concluímos que a eficiência energética do projeto, no melhor dos cenários, gira em torno de 14,2%, mencionados na Figura 20. Vale ressaltar que a intenção deste projeto reside na familiarização da técnica de geração elétrica por meio de algo tão abundante, quanto os ventos. Trata-se de uma tentativa de incentivo a tal técnica, desmembrando-a de maneira simples e didática. De fácil entendimento e interpretação.

Dito isto, é notória a baixa eficácia de um sistema isoladamente eólico, para fins residenciais. Para um parque eólico de pequeno a grande porte, é satisfatória uma eficiência na casa de 35% a 40%. O que claramente se torna difícil atingir nas condições geográficas a que estamos pondo a teste. Embora o baixo rendimento de maneira isolada, geradores eólicos são um excelente reforço para um sistema Off Grid Solar. A sazonalidade da planta eólica encontra-se ainda favorável em temporadas de pouca luminosidade solar. Ainda que pouco, o aproveitamento das fortes massas de ar perto do inverno complementa a alta demanda energética.

Vide 'Dados Pertinentes Para Estudo' na página abaixo*. Mais especificamente na seção: "CARGA E GERAÇÃO – CURVA DE CARGA (MW)". Nela, constam dados instantâneos da capacidade energética e elétrica Nacional. Em todas as suas matrizes. Esses dados corroboram no que foi dito acima.

Bibliografia

Fonte: <http://xxicenturynewcountry.blogspot.com/2011/05/energias-utilizar-parte-ii.html>

Fonte: <https://windbox.com.br/blog/componentes-dos-aerogeradores/>

Fonte: <https://free3d.com/pt/3d-model/helical-savonius-wind-turbine-vawt-432.html>

Fonte: <https://typesdenergie.weebly.com/georges-jean-marie-darrieus.html>

Fonte: <https://www.google.com/imgres?imgurl=https://encrypted-tbn1.gstatic.com/images?q%3Dtbid:ANd9GcT5g7AJbe1Wr02swOf2fTLCiZojIIE7vSHof-hXhEfR-6L8Axa6&tbnid=pQyILPnL6ZoQcM&vet=1&imgrefurl=https://www.amazon.com.br/Gerador-turbina-e%C3%B3lica-vertical->

Fonte: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/como-funcionam-os-parques-eolicos-offshore>

Fonte: <https://vortexbladeless.com/>

Fonte: https://www.neoenergia.com/pt-br/te-interessa/meio-ambiente/PublishingImages/aerogerador/Info_Aerogerador_Neo.pdf

Fonte: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/19308/19308_3.PDF

FONTE: <https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/boletim-geracao-eolica.aspx>

Fonte: http://ead2.ctgas.com.br/arquivos/aperfeicoamento/Fundamentos_Geracao_Eolica/Material_de_apoio/Apostila.pdf

Fonte <https://www.ufrgs.br/sieolica/mapaeolico1a.html>

DADOS PERTINENTES PARA ESTUDO

BOLETINS DE OPERAÇÃO – DADOS DA EÓLICA

<https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/boletim-geracao-eolica.aspx>

CARGA E GERAÇÃO – CURVA DE CARGA (MW)

<https://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/carga-e-geracao>

MAPA DOS QUANTITATIVOS DE MARGENS PARA OS LEILÕES DE ENERGIA

<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>