

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL
CAMPUS ARAPIRACA
FÍSICA - LICENCIATURA

MAXIMINE SOARES DA SILVA

A FÍSICA PRESENTE NO PROCESSO DA CONVERSÃO DA ENERGIA EÓLICA
EM ENERGIA ELÉTRICA

ARAPIRACA

2023

Maximine Soares da Silva

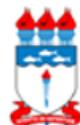
A física presente no processo da conversão da energia eólica em energia elétrica

Trabalho de Conclusão de curso apresentado como requisito parcial com o objetivo de obtenção do grau de Licenciatura em Física pela Universidade Federal de Alagoas – Campus Arapiraca.

Orientador: Prof. Dr. José Henrique Araújo Lopes de Andrade.

Arapiraca

2023



Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Campus Arapiraca
Biblioteca Setorial *Campus* Arapiraca - BSCA

S586f Silva, Maximine Soares da
A física presente no processo da conversão da energia eólica em energia elétrica
[recurso eletrônico] / Maximine Soares da Silva. – Arapiraca, 2023.
45 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. José Henrique Araújo Lopes de Andrade.
Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) - Universidade Federal
de Alagoas, *Campus* Arapiraca, Arapiraca, 2023.
Disponível em: Universidade Digital (UD) – UFAL (*Campus* Arapiraca).
Referências: f. 44-45.

1. Energia eólica. 2. Energia renovável. 3. Energia - Conservação. I. Andrade, José
Henrique Araújo Lopes de. II. Título.

CDU 53

Maximine Soares da Silva

A física presente no processo da conversão da energia eólica em energia elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao corpo docente do Curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), como requisito parcial para obtenção do título de Licenciatura em Física.

Data de aprovação: 16/10/2023.

Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
 JOSE HENRIQUE ARAUJO LOPES DE ANDRADE
Data: 19/10/2023 14:03:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Henrique Araújo Lopes de Andrade
Universidade Federal de Alagoas
Campus Arapiraca
(Orientador)

Documento assinado digitalmente
 JOSE PEREIRA LEAO NETO
Data: 19/10/2023 13:44:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Pereira Leão Neto
Universidade Federal de Alagoas
Campus Arapiraca
(Examinador).

Documento assinado digitalmente
 LIDIANE MARIA OMENA DA SILVA LEAO
Data: 19/10/2023 13:56:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Lidiane Maria Omena da Silva Leão
Universidade Federal de Alagoas
Campus Arapiraca
(Examinador)

AGRADECIMENTOS

Sou grato primeiramente a Deus por todos os momentos que vivi, sempre me fortalecendo para que eu pudesse tomar as melhores escolhas possíveis, e força para não desistir e encarar todas as responsabilidades dessas decisões.

Sou grato aos meus pais Eniel Soares da Silva e Maria Soares dos Santos Silva por me concederem a vida, por sempre me orientaram a seguir o melhor caminho e me sustentar tanto fisicamente quanto psicologicamente para enfrentar os obstáculos da vida, e me dar confiança para tomar as melhores decisões.

Sou grato a minha companheira e esposa Vanessa Apolinário pela paciência com a minha pessoa, por sempre me ajudar no comprometimento de casa para que eu tivesse um tempo para me ajustar e realizar meu curso e as tarefas, por entender também meus momentos ruins causados pelo o dia a dia, para que eu obtivesse o foco e força de vontade para todos os meus objetivos.

Sou grato mais uma vez a Deus e minha esposa por me dar a felicidade de se tornar pai, e ter um filho que se chama Pietro Maximine Apolinário Soares, que me faz muito feliz, uma criança muito inteligente que me motiva cada vez mais a buscar o melhor para toda a minha família.

Sou grato ao meu amigo Rodrigo Cesar Modesto bispo, por confiar em mim e me ajudar na construção de minha residência, meu lar, ele foi uma pessoa de destaque para que eu realizasse meu objetivo pessoal, sem que eu precisasse deixar outros objetivos de lado.

Sou grato a todos os professores que tive, desde o maternal até o ensino superior, por todos os ensinamentos, lições, orientações e aprendizado; mas sou grato especialmente ao meu professor e orientador Jose Henrique Araújo Lopes de Andrade por ter me ajudado com o conteúdo deste trabalho de conclusão de curso.

Sou grato a todos os meus amigos que já tive e colegas que tenho, especialmente os do curso de física da Universidade Federal de Alagoas Campus Arapiraca do semestre 2017.1 pelo convívio, prestígio, consideração, discussões, apoios, debates e trabalhos em equipe ao longo de mais de 4 anos. Foram muitas histórias, muitos projetos e diversos momentos de descontração.

Sou grato a todos os membros que compõem o corpo da Universidade Federal de Alagoas, especialmente à coordenação do curso de física pelas instruções, paciência e esclarecimentos nessa jornada; ao pessoal da biblioteca pela disponibilidade.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desse trabalho.

O Princípio da Conservação da Energia diz que "a energia pode ser transformada ou transferida, mas nunca criada ou destruída".

James Prescott Joule

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre os princípios teóricos básicos de energia mecânica e seus conceitos envolvidos na energia eólica e sua conversão para a geração de energia elétrica. É realizada uma abordagem qualitativa e explicativa sobre a energia eólica de forma a relacionar os conteúdos apresentados com diversos tópicos estudados em física clássica. A energia eólica representa uma área do conhecimento rica em conteúdos que podem ser usados diretamente no ensino de física, dando maior ênfase ao processo de conservação de energia cinética em energia potencial elétrica, assim como demonstrar o processo de conservação de energia eólica em energia elétrica, apresentando assim toda a física envolvida nas empresas de energia eólicas no âmbito mundial e no Brasil. O tema também aborda a história da energia eólica, seu desenvolvimento do processo estrutural, como os componentes de um aerogerador, além de trazer informações sobre o seu crescimento no Brasil, mostrando as áreas que possuem as maiores produções de energia. Em relação a física envolvida em empresas eólicas, inicia-se desde o processo de transformação de energia, que ocorre desde o momento da captação do vento realizada por os aerogeradores, realizado através do processo de extração da energia e potência do vento, conservando a energia cinética e a transformando em energia elétrica, o processo físico da extração de energia captada do vento, foi demonstrado e explicado de forma sucinta, definindo o que é energia eólica, trazendo os conceitos sobre energia cinética, sobre a conservação de energia e o processo de energia e potência extraída do vento, desta forma chegando à conclusão sobre o potencial de energia eólica no país, considerando o cálculo do quanto da energia do vento pode ser transformada em energia elétrica.

Palavras-chave: energia eólica; energia renovável; conservação de energia.

ABSTRACT

This work presents a study on the basic theoretical principles of mechanical energy and its concepts involved in wind energy and its conversion to the generation of electrical energy. A qualitative and explanatory approach to wind energy is carried out in order to relate the content presented with various topics studied in classical physics. Wind energy represents an area of knowledge rich in content that can be used directly in physics teaching, placing greater emphasis on the process of conserving kinetic energy into electrical potential energy, as well as demonstrating the process of conserving wind energy into electrical energy, thus presenting all the physics involved in wind energy companies worldwide and in Brazil. The theme also addresses the history of wind energy, its development of the structural process, such as the components of a wind turbine, in addition to providing information about its growth in Brazil, showing the areas that have the highest energy production. In relation to the physics involved in wind companies, it begins with the energy transformation process, which occurs from the moment the wind is captured by wind turbines, carried out through the process of extracting energy and power from the wind, conserving energy kinetic energy and transforming it into electrical energy, the physical process of extracting energy captured from the wind, was demonstrated and explained succinctly, defining what wind energy is, bringing the concepts about kinetic energy, energy conservation and the process of energy and power extracted from the wind, thus reaching a conclusion about the potential for wind energy in the country, considering the calculation of how much wind energy can be transformed into electrical energy.

Keywords: wind energy; renewable energy; energy conservation.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 -	Seção de uma turbina eólica ou aerogerador. É no interior da nacela que a energia elétrica é gerada	15
Figura 2 -	Partes de um aerogerador eólico	15
Figura 3 -	Diferentes conceitos de pás de aerogeradores	16
Figura 4 -	Fotografia do Rotor demonstrando a parte de acionamento da rotação das pás	16
Figura 5 -	Elementos da nacela de um aerogerador	17
Figura 6 -	Fotografia de uma torre de eixo horizontal	17
Figura 7 -	Fotografia da caixa de engrenagens multiplicadora de alta velocidade	18
Figura 8 -	Gerador conectado a caixa de engrenagens (vista à direita)	18
Figura 9 -	Anemômetro de copos	19
Figura 10 -	Biruta ou sensor de direção do vento incidente	19
Figura 11 -	Turbina eólica de eixo horizontal	20
Figura 12 -	Turbina eólica de eixo vertical	21
Figura 13 -	Considerações sobre o tamanho dos aerogeradores e suas principais aplicações	22
Figura 14 -	Configuração de um sistema eólico isolado	23
Figura 15 -	Configuração de um sistema híbrido solar-eólico-diesel	23
Figura 16 -	Parque eólico conectado à rede – Parque Eólico da Prainha – CE	24
Figura 17 -	Parque eólico instalado no mar do norte	25
Figura 18 -	Caracterização dos recursos eólicos no território brasileiro. Área marrom com velocidade do vento maior que 8,5 m/s, vermelho varia de 7,0 a 8,5m/s, laranja de 6,0 a 7,0 m/s, amarelo de 5,0 a 6,0m/s e azul 5,0 m/s	29
Figura 19 -	Principais cidades com projetos para instalação de usinas eólicas	31
Figura 20 -	Figura 20- Processo da transformação de energia	34
Figura 21 -	Fluxo de ar através de uma área transversal A	37
Figura 22 -	Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás	38
Figura 23 -	Distribuição de C_p em função de $\frac{v_3}{v_1}$	41

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 -	Projetos de geração de energia eólica implementados no Brasil.	29
Tabela 2 -	Principais estados brasileiros em produção de energia eólica no Brasil	30
Tabela 3 -	ranking dos maiores produtores de energia eólica no Brasil.	32
Tabela 4 -	ranking dos maiores parques de energia eólica no Brasil.	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
EPE	Empresa de Pesquisa e Energia
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
ABEEÓLICA	Associação Brasileira de Energia Eólica
CBEE	Centro Brasileiro de Energia Eólica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	FONTE DE ENERGIA EÓLICA	14
2.1	FUNCIONAMENTO DE UMA USINA EÓLICA	14
2.2	O QUE É UM AEROGERADOR?	15
2.2.1	Tipos de Aero geradores?	20
2.3	APLICAÇÕES DOS SISTEMAS EÓLICOS	22
2.4	IMPACTO	25
3	ENERGIA EÓLICA NO BRASIL	27
3.1	CRESCIMENTO EM PARQUES EÓLICOS	28
3.2	ÁREAS DE INVESTIMENTOS	30
4	À FÍSICA DAS INDÚSTRIAS EÓLICAS	34
4.1	CONSERVAÇÃO DE ENERGIA	35
4.2	ENERGIA MECÂNICA	35
4.2.1	Energia Cinética	36
4.3	ENERGIA E POTÊNCIA EXTRAÍDA DO VENTO	36
5	CONCLUSÃO	43
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

A energia eólica provém do vento, que consiste no deslocamento de massas de ar, gerando uma energia potencial, que pode ser utilizada na geração de eletricidade, uma vez que os ventos são gerados pelo aquecimento não uniforme da superfície terrestre através da radiação solar. Tendo em consideração que a energia total disponível dos ventos ao redor do planeta está relacionada a hipótese de aproximadamente que 2% da energia solar absorvida pela Terra é convertida em energia cinética através da conversão eólica realizada por aerogeradores. Tanto os ventos que sopram em escala global quanto, aqueles que se manifestam em pequena proporção, são influenciados por diferentes aspectos, tais como, a altura, a rugosidade, os obstáculos e o relevo. Além de ser uma fonte de energia renovável, também pode ser tratada como uma alternativa para o fornecimento de energia para pequenas populações onde há limitações no acesso de energia direto, sem necessidade de grandes investimentos, sua produção advém da força do vento, que movimentam turbinas eólicas, conhecidas como aerogeradores, gerando uma rotatividade das hélices, que acionam um gerador, que por sua vez converte essas “massas de ar” em energia elétrica e limpa.

O Brasil é um país que tem sua energia elétrica produzida à base da dependência de duas fontes principais: a hidrelétrica, predominante é prioritária, e a termoeletrica. Por esse motivo, tornou-se necessária a expansão da energia eólica no Brasil, que surge a partir da diversificação das fontes energéticas do país. A base da sua produção encontra-se na região Nordeste que tem a maioria dos parques eólicos e a maior produção de energia do país, tornando o país um dos maiores produtores de energia eólica do mundo. O ramo de geração elétrica está se expandindo amplamente nos últimos anos por ser uma energia limpa e abundante e por já apresentar um custo de geração viável a ponto de ser inserido na matriz energética brasileira. A preocupação com questões como os impactos ao meio ambiente e o aquecimento global geraram uma necessidade de mudanças na geração elétrica em vários países do mundo. Um sistema eólico possui três aplicações: sistemas isolados, sistemas híbridos e sistemas interligados à rede. O aproveitamento deste tipo de energia decorre dos avanços tecnológicos do setor.

Este trabalho apresenta um estudo sobre a obtenção de energia elétrica a partir do vento, desde a captação da força do ar, até encontrar o valor da sua eficiência, para isso foi traçado em ordem cronológica a execução do processo, demonstrando os conceitos físicos. O estudo da física que contempla a energia eólica passa por temas como a formação dos ventos, energia mecânica produzida pelo vento, a transmissão dessa energia e a sua transformação em energia elétrica. Assim como um estudo mais aprofundado sobre o fluido em questão, o ar. Os conceitos

abordados neste trabalho estão relacionados com os conteúdos de física clássica, abordando a energia e a potência extraída do vento, e proporcionando uma visão sobre esse tipo fonte de geração de eletricidade, assim como relatar a importância do processo da eficiência de Betz, e do processo na transformação de energia cinética em energia potencial elétrica. Neste trabalho também é realizado uma demonstração a respeito da energia eólica no Brasil, caracterizando suas vantagens e desvantagens, além de serem mostrados os benefícios financeiros e ecológico na instalação de indústrias eólicas, por se tratar de uma energia inesgotável e limpa. A física envolvida nesse tipo de energia contribuiu bastante para a definição deste tema como um trabalho de estudo em fase do término do curso de graduação.

2 FONTE DE ENERGIA EÓLICA

Energia eólica é o nome que se dá à energia elétrica gerada da força dos ventos, considerada um tipo de energia renovável, a energia eólica utiliza sua produção por meio de recursos naturais inesgotável. Ao longo da história, a energia dos ventos tem sido utilizada para a geração de energia cinética, relativa ao movimento. No entanto, os primeiros passos para a produção de eletricidade foram dados com o surgimento dos moinhos no século XII, no Oriente Médio, nos países de Afeganistão e Irã.

Os mecanismos utilizados hoje e responsáveis pela geração de energia elétrica começaram a surgir somente no século XIX. No ano de 1887, teve-se notícia da primeira turbina eólica de pequena escala, com pás feitas de tecido, destinada à produção de eletricidade, cuja criação foi atribuída ao engenheiro escocês James Blyth, considerado por isso o pioneiro da energia eólica. Já em 1888, o engenheiro norte-americano Charles Bush instalou em sua residência uma grande turbina geradora de energia eólica, sendo muitas vezes associado a ele a invenção desse mecanismo.

Desde então também chamada de energia dos ventos, a energia eólica é a energia cinética contida nas massas de ar, vento, que tem condições de ser aproveitada e utilizada na geração de energia elétrica, por meio da indução eletromagnética, e para trabalhos mecânicos como bombeamento de água e trituração de grãos.

2.1 FUNCIONAMENTO DE UMA USINA EÓLICA

A energia eólica é produzida pela força dos ventos através do processo de conversão de energia cinética, proveniente do movimento, e transformado em eletricidade. Isso pode ser realizado por meio de turbinas eólicas ou aerogeradores, que se assemelham aos moinhos de ventos e formam os parques eólicos.

A estrutura da turbina é composta por uma torre, pelo rotor e pelas pás. O vento faz com que as pás girem a uma velocidade que varia de 10 a 25 rotações por minuto (rpm), acionando assim o rotor, a peça na qual as pás estão conectadas. O movimento do rotor é multiplicado no interior da nacele, a estrutura retangular que fica posicionada atrás das pás e na qual está conectada a torre da turbina. No interior da nacele, fica o gerador, responsável pela conversão da energia cinética em energia elétrica.

Figura 1 - Seção de uma turbina eólica ou aerogerador. É no interior da nacelle que a energia elétrica é gerada



Fonte: Guitarrara [202?].

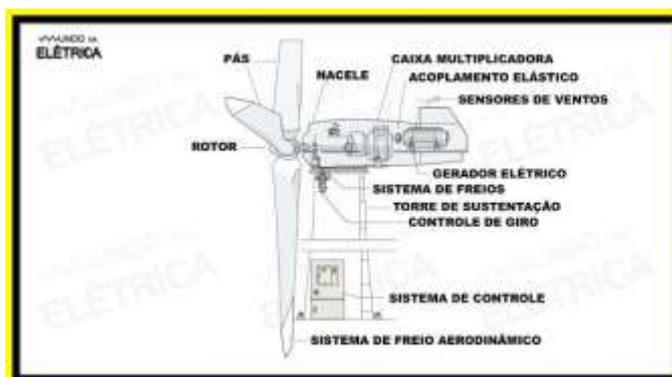
Uma vez produzida, a eletricidade é conduzida por meio dos dutos, localizados no interior da torre, para dois transformadores antes de ser enviada à rede, um está conectado à turbina e o outro concentra toda a energia gerada no parque eólico. Finalmente, a rede de distribuição faz com que a energia eólica seja distribuída para os consumidores finais.

2.2 O QUE É UM AEROGERADOR?

Um aerogerador eólico é um equipamento que tem como função principal converter a energia cinética do vento em energia elétrica. Utilizando um processo de converter a energia eólica em eletricidade, através da energia dos ventos que é transformada em energia mecânica e em seguida em energia elétrica.

Existem diferentes tipos de geradores eólicos, embora utilizem a mesma estrutura básica e os mesmos componentes para funcionar. Na figura abaixo, podemos observar os componentes de um aerogerador eólico.

Figura 2 - Partes de um aerogerador eólico

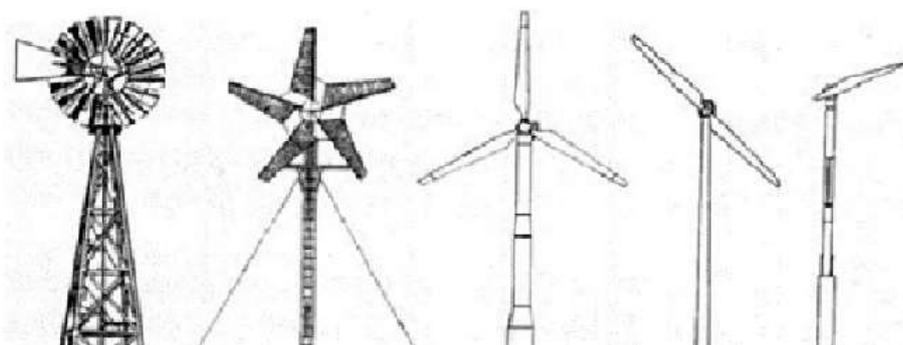


Fonte: Mattede [202?].

- **Pás**

As pás, ou lâminas, dos aerogeradores são as responsáveis por captar a energia cinética dos ventos e transferi-la para o rotor da turbina. Elas utilizam os mesmos perfis aerodinâmicos das asas de aviões, que criam a força de sustentação necessária para realizar o seu movimento. As hélices de uma turbina eólica moderna podem ultrapassar 100 metros de comprimento.

Figura 3 - Diferentes conceitos de pás de aerogeradores



Fonte: Amaral (2011) *apud* Ecotx Energy Data (2023).

- **Rotor**

O rotor, é a parte frontal da turbina no qual são conectadas as pás. Ele é o elemento da turbina eólica que transfere o movimento das pás para o eixo central, que pode ser horizontal ou vertical. Onde seu sistema hidráulico permite o movimento das pás em distintas posições para otimizar a força do vento ou parar a turbina por completo. O rotor de um gerador eólico pode ter de 20 a 170 metros de diâmetro e quanto maior for o rotor e as pás de um aerogerador, mais energia ele será capaz de produzir.

Figura 4 - Fotografia do Rotor demonstrando a parte de acionamento da rotação das pás

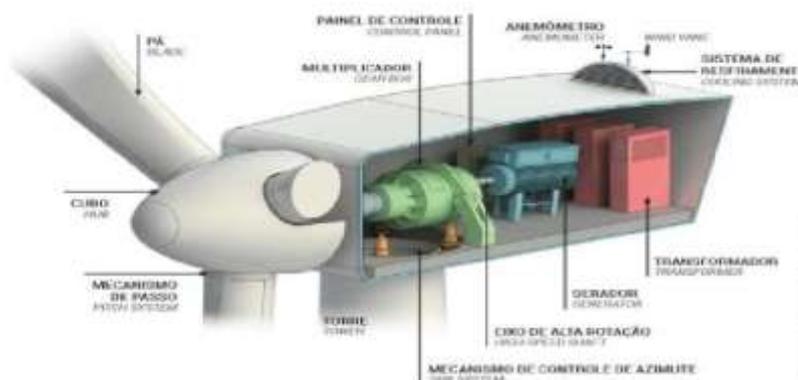


Fonte: Joi (2020).

- **Nacele**

A nacele é a caixa acoplada ao rotor da turbina eólica, na qual estão inseridos vários dos seus principais componentes. Entre os componentes temos a caixa multiplicadora, o gerador, chassis, sistema de yaw, freios, embreagem, mancais, sistema de controle eletrônico e sistema hidráulico.

Figura 5 - Elementos da nacele de um aerogerador



Fonte: Camargo Schubert Engenheiros Associados (2019).

- **Torre**

A torre é a estrutura que sustenta o rotor e a nacele do aerogerador em uma altura ideal para a captação dos ventos. Onde inicialmente, as torres eram fabricadas em metal, como o aço, mas passaram a ser construídas em concreto devido ao aumento do seu tamanho. Hoje, temos torres de geradores eólicos que ultrapassam os 200 metros de altura.

Figura 6 - Fotografia de uma torre de eixo horizontal



Fonte: Joi (2020).

- **Caixa multiplicadora**

A caixa de transmissão, ou gearbox, de um aerogerador é responsável por multiplicar a rotação do eixo primário de entrada e transferi-la ao eixo secundário ligado ao gerador, tendo a função de transformar as rotações do rotor e do eixo, que rotacionam em baixas velocidades, entre 15 e 60 rpm, com elevado torque, em velocidades altas, entre 1000 e 3000rpm, com baixo torque no eixo secundário.

Figura 7 - Fotografia de um dos modelos de multiplicador (caixa de engrenagens)



Fonte: Joi (2020).

- **Gerador**

O gerador é um item essencial em qualquer turbina eólica e é o responsável por converter a força mecânica do eixo em energia elétrica de corrente alternada.

Figura 8 - Gerador conectado a caixa de engrenagens (vista à direita)



Fonte: Joi (2020).

- **Anemômetro**

O anemômetro é um dispositivo instalado no topo da nacela que mede a intensidade e a velocidade dos ventos. Com a função de gerar os gráficos da curva de potência das turbinas e realizar estudos de produção elétrica dos parques eólicos, que garantem o posicionamento mais adequado para a turbina. Existem diferentes tipos de anemômetros, os de copos, moinho de vento, termoelétrico e ultrassônico.

Figura 9 - Anemômetro de copos



Fonte: Joi (2020).

- **Biruta**

A biruta é um sensor que fica acoplado ao anemômetro e serve para medir a direção dos ventos, também chamado de sensor de direção. Através dos dados da biruta, o sistema de controle do aerogerador altera sua posição para que o rotor e as pás estejam em posição ideal para captação dos ventos.

Figura 10 - Biruta ou sensor de direção do vento incidente



Fonte: Joi (2020).

2.2.1 Tipos de Aerogeradores

Os aerogeradores são classificados em relação a função da posição do eixo de rotação da turbina eólica, desta forma classificamos as turbinas como:

- Turbina eólica de eixo horizontal
- Turbina eólica de eixo vertical

Embora tenham a mesma finalidade, os dois tipos de aerogeradores apresentam algumas diferenças, como o custo de produção e a eficiência.

- **Aerogerador de eixo horizontal**

Os aerogeradores com rotor de eixo horizontal são os mais conhecidos e utilizados. Sua construção é baseada nos tradicionais moinhos de vento e cataventos podendo ter as mais variadas formas e empregar os mais variados materiais, geralmente utilizam-se pás rígidas de madeira, alumínio ou fibra de vidro reforçada, mesmo tendo um custo mais elevado, o gerador eólico com rotor de eixo horizontal apresenta maior eficiência que o de eixo vertical, a vantagem desse tipo de turbina, é a capacidade de construir grandes parques eólicos com turbinas posicionadas de uma forma relativamente compacta, sem afetar significativamente o desempenho de cada uma.

Essas turbinas podem possuir rotores multipás, de 2 ou 3 pás. A gama de potências dos aerogeradores estende-se desde os 100 W, para as pás de 1 metro, até cerca de 8 MW, para as pás que superam 80 metros.

Figura 11 - Turbina eólica de eixo horizontal



Fonte: Mattede [202?].

- **Aerogerador de eixo vertical**

Os geradores eólicos com rotor de eixo vertical são mais indicados para pequenos parques eólicos por serem menores e mais próximos ao solo, pois desempenham melhor com ventos mais fracos além de conseguir captar as rajadas de qualquer direção. No entanto são mais seguros e silenciosos, além de apresentarem construção e manutenção mais fáceis, por serem mais baixos, os aerogeradores de eixo vertical são menos eficientes do que os de eixo horizontal e geram menos energia

Os principais tipos de rotores de eixo vertical são Darrieus e Savonius. Os rotores do tipo Darrieus são movidos por forças de sustentação e constituem-se de lâminas curvas (duas ou três) de perfil aerodinâmico. Elas são atadas pelas duas pontas ao eixo vertical. A turbina eólica do tipo Savonius é movida por forças de arrasto e consistem em duas ou três conchas.

Figura 12 - Turbina eólica de eixo vertical



Fonte: Mattede [202?].

Os aerogeradores eólicos podem ser classificados em função de sua potência nominal, e a legislação da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) os enquadram em três faixas, são elas:

- Pequena: potência nominal menor que 500kW
- Média: potência nominal entre 500 e 1.000kW
- Grande: potência nominal maior que 1MW

Além disso, também há a classificação por número de pás:

- Monopá: uma pá.
- Bipás: duas pás.
- Tripás: três pás.

- Multipás: quatro ou mais pás.

2.3 APLICAÇÕES DOS SISTEMAS EÓLICOS

Um sistema eólico pode ter três tipos de aplicações: sistemas isolados, sistemas híbridos e sistemas interligados à rede, além dos parques eólicos também serem divididos em três portes, conforme a figura abaixo. Os sistemas obedecem a uma configuração básica, e necessitam de uma unidade de controle de potência e de uma unidade de armazenamento.

Figura 13 - Considerações sobre o tamanho dos aerogeradores e suas principais aplicações



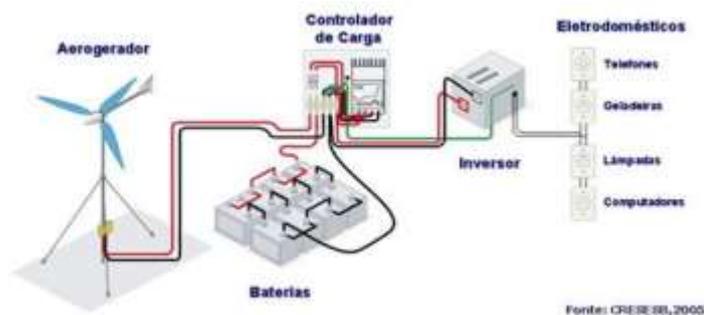
Fonte: Dutra (2008).

● **Sistemas Isolados**

São sistemas que utilizam alguma forma de armazenamento de energia, o armazenamento pode ser feito por baterias, com o objetivo de utilizar aparelhos elétricos, ou na forma de energia gravitacional, com a função de armazenar a água bombeada em reservatórios. Os sistemas que armazenam energia em baterias utilizam um controlador, para controlar a carga e a descarga da bateria.

Já em relação a alimentação de equipamentos que operam com corrente alternada (CA) é necessário à utilização de um inversor, sistema usado quando para utilizar eletrodomésticos convencionais, conforme a figura abaixo:

Figura 14 - Configuração de um sistema eólico isolado



Fonte: Dutra (2008).

- **Sistemas Híbridos**

Os sistemas de energia híbrida são aqueles que geram eletricidade a partir de duas ou mais fontes, geralmente de energia renovável, compartilhando um mesmo ponto de conexão, como por exemplo as turbinas eólicas, geração diesel, módulos fotovoltaicos, entre outras. A utilização de várias formas de geração de energia elétrica aumenta a complexidade do sistema exigindo a otimização do uso de cada uma das fontes, sendo necessário realizar um controle de todas as fontes, gerando a carga de unidade de Controle e o condicionamento de potência.

Os sistemas híbridos são empregados em sistemas de médio a grande porte destinados a atender um número maior de usuários. Justamente por trabalhar com cargas em corrente alternada, o sistema híbrido também necessita de um inversor, conforme a figura abaixo:

Figura 15– Configuração de um sistema híbrido solar-eólico-diesel



Fonte: Dutra (2008).

- **Sistemas Interligados à Rede**

Os sistemas interligados à rede utilizam um grande número de aerogeradores e não necessitam de sistemas de armazenamento de energia, pois toda a geração é entregue diretamente à rede elétrica. Realizando um total de potência instalada no mundo de sistemas eólicos interligados à rede de aproximadamente 120 GW (WWEA, 2009). Confira a figura abaixo:

Figura 16 – Parque eólico conectado à rede – Parque Eólico da Prainha – CE



Fonte: Dutra (2008).

- **Sistemas Off-Shore**

A energia eólica offshore é aquela gerada a partir do vento (energia cinética) em parques localizados dentro do mar, os projetos off-Shore necessitam de estratégias especiais quanto ao tipo de transporte das máquinas, sua instalação e operação. Todo o projeto deve ser coordenado de forma a utilizarem os períodos onde as condições marítimas propiciem um deslocamento e uma instalação com segurança.

Esse tipo de sistema vem crescendo a cada ano, principalmente com o esgotamento de áreas de grande potencial eólico em terra. A indústria eólica tem investido no desenvolvimento tecnológico da adaptação das turbinas eólicas convencionais para uso no mar. Confira a figura abaixo:

Figura 17– Parque eólico instalado no mar do norte



Fonte: Dutra (2008).

2.4 IMPACTOS

Assim o aproveitamento dos ventos para geração de energia eólica, embora seja uma fonte de energia renovável apresenta, como toda tecnologia energética, impactos ambientais favoráveis e desfavoráveis, podemos analisar os pontos de vantagens e desvantagens.

Vantagens da energia eólica

A energia eólica é uma fonte renovável, considerada uma fonte alternativa e limpa de energia, com muitas vantagens relacionadas à diminuição de impactos no meio ambiente. Veja abaixo, os principais pontos de vantagem da energia eólica:

- A ausência de emissão de poluentes atmosféricos.
- Diversificação da matriz energética mundial.
- Custo-benefício, quando comparado às demais fontes de energia, como a hidráulica.
- A geração de emprego e renda nas localidades onde são instalados os aerogeradores das usinas eólicas.
- A possibilidade de mesclagem de fontes de energia em uma mesma usina, como a instalação de aerogeradores e painéis solares em um mesmo espaço.

Desvantagens da energia eólica

A energia eólica, apesar de ser considerada uma fonte renovável e limpa de energia, também possui pontos de desvantagens. Tais como impactos ligados à modificação do espaço natural, à alteração das condições de vida de diversas espécies e à dependência de fatores geográficos. Abaixo podemos ver as principais desvantagens da energia eólica:

- Dependência da constância de ventos, fundamentais para o funcionamento e a eficiência dos aerogeradores.
- A produção de poluição sonora em razão do elevado ruído produzido pela movimentação das turbinas eólicas.
- A alteração da paisagem, principalmente por meio da instalação dos aerogeradores, que geram poluição visual.
- O elevado impacto no habitat de aves diversas, que resulta na alteração dos movimentos migratórios.
- A subordinação da instalação dos aerogeradores às características naturais do meio, como o clima, o relevo e a vegetação.

3 ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

O Brasil é um país onde sua produção de eletricidade está direcionada à dependência de duas principais matrizes: a hidrelétrica, predominante, e a termoelétrica, cuja maioria das usinas opera somente em tempos de baixa da primeira matriz. Por esse motivo, viu-se necessário a expansão da energia eólica no Brasil, que iniciou a partir da necessidade de diversificação das fontes energéticas do país, embora a produção de energia eólica ainda seja pequena no território brasileiro, é visível a evolução do setor no país ao longo dos últimos anos.

O Brasil apresenta um enorme potencial para geração de energia da eólica, conforme apontam os dados da Empresa de Pesquisa e Energia (EPE), a energia eólica já responde por 8,6% da matriz elétrica brasileira, em função de fatores como o relevo e as condições atmosféricas que condicionam a geração de ventos intensos o suficiente para movimentação das pás. Já em 2002, o governo brasileiro criou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), que é o órgão responsável por ampliar as matrizes que geram menos impactos ambientais, dentre elas a eólica, a solar, a geotérmica e outras. No País, embora o aproveitamento dos recursos eólicos tenha sido feito tradicionalmente com a utilização de cata-ventos multipás para bombeamento de água, algumas medidas precisas de vento, realizadas recentemente em diversos pontos do território nacional, indicam a existência de um imenso potencial de energia eólica ainda não explorado.

Além de ser importante no processo de diversificação da produção de eletricidade e diminuição da dependência de energia no Brasil, a expansão das fontes eólicas é necessária também por gerar menores impactos ambientais, como aqueles proporcionados na ativação de termelétricas. Por isso, os investimentos nessas e em outras fontes, embora estejam se intensificando, precisam expandir-se ainda mais a fim de gerar uma maior gama de resultados e garantir um melhor desenvolvimento do país em termos de infraestrutura. Entretanto, não foi apenas na costa do Nordeste que áreas de grande potencial eólico foram identificadas. Em Minas Gerais, por exemplo, uma central de energia eólica está em funcionamento, desde 1994, em um local (afastado mais de 1000 km da costa), com excelentes condições de vento.

Em 2014, segundo dados do Governo Federal, o Brasil ultrapassou a Alemanha no que se refere à expansão da energia eólica, atingindo o segundo lugar mundial, atrás apenas da China, que é o maior investidor em fontes energéticas no mundo em razão de sua alta demanda. A partir daí, a expansão da energia eólica no Brasil ocorreu através das parcerias entre o poder público e a iniciativa privada por intermédio da realização de leilões e concessões públicas para empresas interessadas.

A capacidade instalada no Brasil está acima de 20 MW, com turbinas eólicas de médios e grandes portes conectadas à rede elétrica. Além disso, existem dezenas de turbinas eólicas de pequeno porte funcionando em locais isolados da rede convencional para aplicações diversas, tais como bombeamento, carregamento de baterias, telecomunicações e eletrificação rural.

3.1 CRESCIMENTO EM PARQUES EÓLICOS

No Brasil, assim como em várias partes do mundo, quase não existem dados de vento com qualidade para uma avaliação do potencial eólico. Os primeiros sensores especiais para energia eólica foram instalados no Ceará e em Fernando de Noronha, no estado de Pernambuco, apenas no início dos anos 90. Os bons resultados obtidos com aquelas medições favoreceram a determinação precisa do potencial de energia eólica daqueles locais e a instalação de aerogeradores. Vários estados brasileiros seguiram os passos de Ceará e Pernambuco e iniciaram programas de levantamento de dados de vento.

A análise dos dados de vento de vários locais no Nordeste confirmou as características dos existentes na região, velocidades médias de vento altas, pouca variação nas direções do vento e pouca turbulência durante todo o ano. Diante da importância da caracterização dos recursos eólicos no Brasil, foi lançado o atlas eólico brasileiro, como pode ser visto na figura 18. Este atlas tem como objetivo principal desenvolver modelos atmosféricos, analisar dados de ventos e elaborar mapas eólicos. Atualmente podem ser destacados alguns projetos implementados no Brasil como pode ser observado na tabela 1.

Tabela 1 - Projetos de geração de energia eólica implementados no Brasil

Estado	Local	Capacidade Instalada	Produção anual prevista	Produção anual prevista
Ceará	Taíba	5MW	17500MWh	Operação
Ceará	Prainha	10MW	35000MWh	Operação
Ceará	Mucuripe	1,2MW	3800MWh	Operação
Ceará	Paracurú	30MW	-----	Estudo
Ceará	Camocim	30MW	-----	Estudo
Minas Gerais	Morro Camelinho	1,0MW	800MWh	Operação
Pará	Vila Joanes	40KW	32MWh	Operação
Pará	Costa NE	100MW	-----	Estudo
Paraná	Palmas I	2,5MW	7000MWh	Operação
Paraná	Palmas II	9,5MW	-----	Estudo
Paraná	Palmas III	75KW	-----	Estudo
Pernambuco	F. Noronha	75KW	60MWh	Operação
Rio de Janeiro	Cabo Frio	10MW	-----	Estudo

Fonte: CBEE [200?] *apud* Santos *et al.* (2006).

Figura 18 - Caracterização dos recursos eólicos no território brasileiro. Área marrom com velocidade do vento maior que 8,5 m/s, vermelho varia de 7,0 a 8,5m/s, laranja de 6,0 a 7,0 m/s, amarelo de 5,0 a 6,0m/s e azul 5,0 m/s.



Fonte: Santos *et al.* (2006).

O primeiro leilão ocorreu no ano de 2009 realizando empreendimentos em cinco estados da região Nordeste, no entanto, alguns dados merecem destaque: em 2003, o Brasil produzia somente 22 MW (megawatts) de eletricidade a partir de fontes eólicas, valor que aumentou para 602 MW em 2009 e aproximadamente 1 GW (gigawatts) em 2011. Recentemente, no ano de 2014, o país atingiu algo em torno de 5 GW, com a expectativa de elevação para 13 GW até 2018. Apesar de relevantes, esses números ainda são muito pequenos perante o potencial que o território nacional possui, que é calculado em aproximadamente 140 GW.

A região do Brasil com o maior potencial de produção de energia elétrica a partir da energia eólica é o Nordeste, com 75 GW, a metade da capacidade de todo o país. Não por acaso, a maioria das usinas existentes encontra-se nesta região. O estado brasileiro que mais produz energia eólica é o Rio Grande do Norte, que, até 2013, tinha uma capacidade instalada de 1.339,2 MW e uma expectativa de crescimento para 3.654MW até 2018. A seguir, temos uma tabela que sintetiza as principais unidades federativas do país nesse quesito:

Tabela 2 - Principais estados brasileiros em produção de energia eólica no Brasil

Estado	Capacidade eólica instalada em 2013 (MW)	Potencial energético em 2018 (MW)
Rio Grande do Norte	1.339,2	3.654,2
Ceará	661,0	2,325
Bahia	587,6	1.978,9
Rio Grande do Sul	460,0	1978,9
Santa Catarina	236,4	236,4

Fonte: Associação Brasileira de Energia Eólica

Fonte: Pena [200?].

3. 2 ÁREAS DE INVESTIMENTOS

O Brasil possui um dos maiores potenciais para aproveitamento Eólico em todo o mundo, já comprovado em diversos estados, bem como pelo desempenho e produção das Usinas Eólicas de Taíba, Prainha e Mucuripe (Ceará), Palmas (Paraná) e Bom Jardim da Serra (Santa Catarina). Obtendo hoje, 916 parques eólicos distribuídos em 12 Estados, totalizando mais de 10.100 aerogeradores em operação para a produção da eletricidade gerada pela força do vento. Os dados são da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA), sendo o Nordeste a região que mais produz energia eólica, com cerca de 90% dos parques eólicos brasileiros. Segundo dados divulgados no relatório Infovento, da ABEEÓLICA, mostram que

essa geração de energia é capaz de abastecer 36,2 milhões de residências por mês, beneficiando 108,7 milhões de habitantes em junho de 2023.

O Fator de Capacidade das Usinas Eólicas em regiões de ventos médios anuais superiores a 8m/s, atinge 40% e, em alguns locais como no litoral nordeste do Brasil, em alguns meses chega a atingir até 60%. No Brasil, os períodos de menor capacidade dos reservatórios das hidrelétricas coincidem exatamente com os períodos de maiores ventos e de maior geração de energia nas usinas eólicas. Essa complementaridade já comprovada entre as fontes eólicas em nosso país, potencializa uma maior confiabilidade e estabilidade do Sistema Elétrico Brasileiro. Apesar de vários trabalhos e pesquisas científicas realizadas nas décadas de 70 e 80 a geração de energia a partir de turbinas eólicas no Brasil teve início apenas em julho de 1992, com a instalação de uma turbina de 75kW na ilha de Fernando de Noronha, através de iniciativa pioneira do Centro Brasileiro de Energia Eólica - CBEE, os principais projetos de energia eólica no Brasil são mostrados na figura abaixo 19.

Figura 19 – Principais cidades com projetos para instalação de usinas eólicas



Fonte: Santos *et al.* (2006).

Mesmo assim, o Brasil possui uma produção de energia eólica muito pequena em relação a sua capacidade, dos quais (91%), operam comercialmente desde o início de 1999, com grande sucesso, fornecendo energia para o consumo de cerca de 200000 pessoas, no Ceará, no Paraná e em Santa Catarina. No Brasil, os parques eólicos já acumulam uma capacidade instalada de 26 gigawatts. Até maio deste ano, mais de 2 GW de potência foram adicionados no país. Sendo que o Rio Grande do Norte desponta como o maior produtor de energia eólica no País, o estado tem 248 parques instalados, com 2.991 aerogeradores, e uma potência de geração de 7.872,43 megawatts. Bahia e Piauí vem logo em seguida, em segundo e terceiro lugar, respectivamente. Enquanto a Bahia tem uma potência de geração de 7.633,37 MW, com

276 parques e 2.828 aerogeradores, o Piauí é responsável por gerar 3.583,95 MW, a partir de 108 parques, que somam 1.246 aerogeradores. Confira o ranking.

Tabela 3- Ranking dos maiores produtores de energia eólica no Brasil

Ordem	Cidade	Potência de geração
1	Rio Grande do Norte	7.872,4 MW
2	Bahia	7.633,37 MW
3	Piauí	3.583,95 MW
4	Ceará	2.568,34 MW
5	Rio Grande do Sul	1.835,89 MW
6	Pernambuco	1.061,77 MW
7	Paraíba	765,94 MW
8	Maranhão	426 MW
9	Santa Catarina	242,70 MW
10	Sergipe	34,50 MW
11	Rio de Janeiro	28,05 MW
12	Paraná	2,50 MW

Fonte: O autor (2023).

Atualmente, o complexo Lagoa dos Ventos, é o maior parque eólico da América Latina, localizado no município de Lagoa do Barro do Piauí, está ativo desde junho de 2021, composto por 230 turbinas eólicas com 716 MW de potência instalada, na tabela abaixo podemos ver a relação das maiores usinas de energia eólicas da região.

Tabela 4 - ranking dos maiores parques de energia eólica no Brasil

Ordem	Parque eólico	Potência de geração
1	Lagoa dos Ventos	716,5 MW
2	Campo Largo	687,9 MW
3	Chuí	582,8 MW
4	Oitis	517 MW
5	Rio do Vento	504 MW
6	Chafariz	471,2 MW
7	Chapada do Piauí	438 MW

8	Alto Sertão	438 MW
9	Delta do Maranhão	426 MW
10	Ventos de São Roque	396 MW

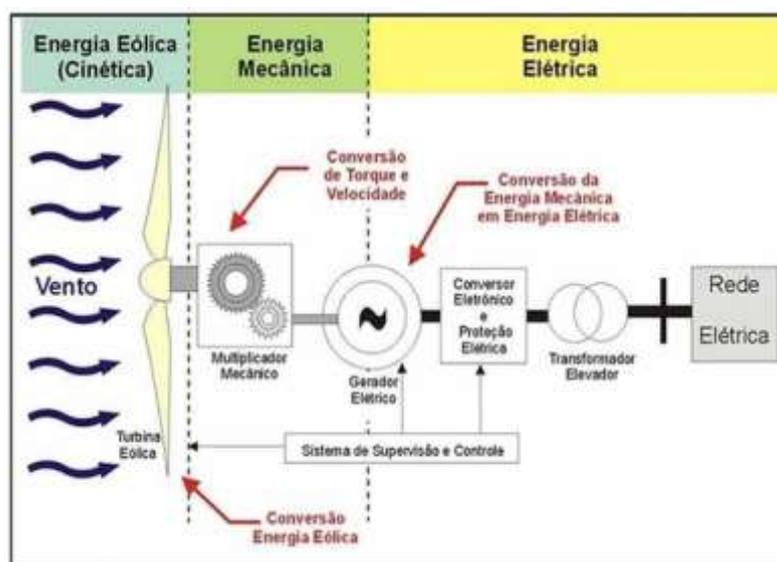
Fonte: O autor (2023).

Considerando o grande potencial eólico existente no Brasil, é possível produzir eletricidade a custos competitivos com centrais termoelétricas, nucleares e hidroelétricas. Análises dos recursos eólicos medidos em vários locais do Brasil, mostram a possibilidade de geração elétrica com custos da ordem de US\$70 - US\$80 por MWh. O custo da energia elétrica gerada através de novas usinas hidroelétricas construídas na região amazônica será bem mais alto que os custos das usinas implantadas até hoje. Quase 70% dos projetos possíveis deverão ter custos de geração maiores do que a energia gerada por turbinas eólicas. Outra vantagem das centrais eólicas em relação às usinas hidroelétricas é que quase toda a área ocupada pela central eólica pode ser utilizada (para agricultura, pecuária, etc.) ou preservada como habitat natural.

4 À FÍSICA DAS INDÚSTRIAS EÓLICAS

O processo na transformação de energia eólica em energia elétrica é realizado através da conservação de energia, onde é realizada a captação do vento por um aerogerador que por sua vez, irá realizar o processo de energia cinética, ou seja, no momento em que o vento toca a nacele, faz com que a mesma realize rotação, criando uma energia cinética com base em seu movimento, neste momento os movimentos iram produzir a energia mecânica conforme a figura 20.

Figura 20 - Processo da transformação de energia



Fonte: Pico; Rühler e Rampinelli (2014).

Para que possamos entender melhor o processo dessas transformações iremos abordar os tipos de energia e processo detalhadamente. A física nas indústrias eólicas, dar se por meio da transformação de energia mecânica em energia eólica, neste capítulo iremos abordar todo o processo desta transformação, entendendo o que é energia mecânica e seus processos quanto ao tipo de energias, assim como as formulações das equações deste processo, definiremos assim o tipo de energia que encontraremos no processo de energia eólica, também abordaremos como ocorre o processo de extração da energia e potência do vento e suas equações, além de tratarmos do processo de conservação de energia, processo este que irá tratar da transformação de energia mecânica em elétrica, neste trabalho a física que será abordada se refere apenas ao aerogerador de turbina eólica de eixo horizontal.

4.1 CONSERVAÇÃO DA ENERGIA MECÂNICA

Definir energia é um pouco complexo. No entanto, a conservação da energia mecânica ocorre, exclusivamente, quando existe a transformação de energia cinética em energia potencial, e vice-versa, desta forma podemos dizer que energia é o que coloca um corpo em movimento. Em outras palavras, a energia não se perde, ela se transforma de um tipo em outro. E pode ser armazenada.

No entanto, todos nós a percebemos quando fazemos sua utilização. Quando acendemos a lâmpada, damos partida em um carro ou até mesmo no ato de usar a energia dos alimentos para realizar as trabalho no dia a dia. Mas uma série de transformações ocorreu para que esses fenômenos acontecessem. Ou seja, uma forma de energia se transformou em outra. Em relação a conservação da energia eólica em energia elétrica, ocorre através do processo de extração de energia do vento, que é realizada pela captação da potência do vento por aerogeradores, que capta o vento, transformando em energia cinética, que por sua vez, é produzida mediante o torque nas pás, que acionam um eixo, que se liga a um gerador, produzindo eletricidade.

4.2 ENERGIA MECÂNICA

Energia mecânica é caracterizada pela capacidade de um corpo de gerar trabalho. O trabalho, por sua vez, é a energia aplicada por uma força em um deslocamento. A energia mecânica é a capacidade de um corpo de realizar trabalho. Quando associada ao movimento, é chamada energia cinética. A energia mecânica está embutida no nosso cotidiano, apesar de não percebermos isso. A energia mecânica é a energia que pode ser transferida de um corpo para outro, tudo através de um trabalho.

A energia mecânica é resultante da soma de duas energias: a cinética e a potencial. Isso significa que a energia mecânica é resultante de qualquer objeto que contenha energia potencial (gravitacional, elástica ou elétrica) ou estiver em movimento, ou seja, que tenha adquirido energia cinética. Dessa forma, estudaremos aqui as fórmulas da energia mecânica e das energias que a constituem.

$$E_m = E_c + E_p \tag{1}$$

- E_m : energia mecânica [Joule];
- E_c : energia cinética [Joule];
- E_p : energia potencial [Joule];

4.2.1 Energia Cinética

A energia cinética é a energia associada à velocidade de um corpo. Se existir velocidade, certamente haverá esse tipo de energia. Para objetos que estão em repouso, a energia cinética é nula, pois a velocidade de tais corpos é zero. Um exemplo é o jogo de bilhar onde o jogador aplica a energia cinética na bola branca através do taco e a bola branca, por sua vez, ao entrar em contato com outras bolas, transfere sua energia cinética para elas, acelerando-as enquanto a velocidade da bola branca diminui.

A energia cinética não depende exclusivamente da velocidade de um corpo, mas também de sua massa. Qualquer tipo de corpo em movimento é dotado desse tipo de energia: translação, rotação, vibração e outros. A equação que calcula a força cinética resulta do estudo do trabalho produzido por uma força mecânica, aplicada sobre um corpo em repouso ou em movimento, de modo que cause a alteração de sua velocidade.

Matematicamente, a energia cinética é determinada em função da massa do corpo em movimento, que é medida em quilogramas (kg), e da velocidade desenvolvida por ele, que é determinada em metros por segundo (m/s):

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

- E_c = Energia Cinética [Joule];
- m = massa[kg]
- v = velocidade[m/s]

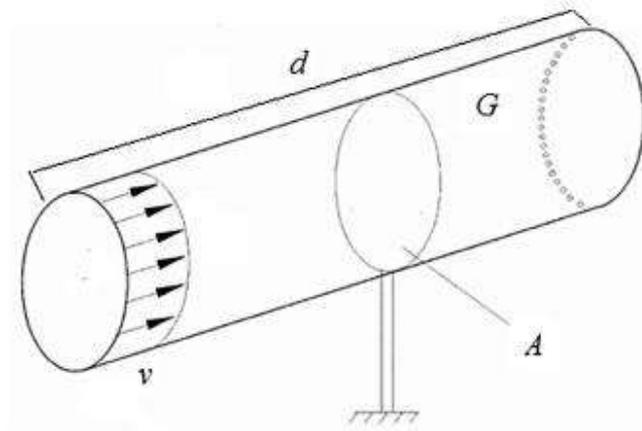
4.3 ENERGIA E POTÊNCIA EXTRAÍDA DO VENTO

Inicialmente realizamos o cálculo da potência disponível no vento, sabendo que a energia cinética é dada por:

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

Considere uma geometria G constituída por um cilindro de área transversal A e comprimento d , conforme a figura 21.

Figura 21 - Fluxo de ar através de uma área transversal A



- Geometria G atravessada por um fluido com velocidade v .

Fonte: Picolo; Rühler e Rampinelli (2014).

O volume V da geometria geométrica G , o produto entre a área transversal A e o comprimento d , levando em consideração que a geometria está sendo atravessada por um fluido com velocidade v , no caso esse fluido é dado pelo produto entre a área transversal A , a velocidade v do fluido e o tempo t , conforme a equação (3).

$$V = A \cdot d = A \cdot v \cdot t \quad (3)$$

Nesse caso consideramos que a vazão Q do fluido é a taxa de variação temporal do volume V do fluido que atravessa a geometria G com área transversal A e o comprimento d , logo podemos chegar à equação (4).

$$Q = \frac{dV}{dt} = A \cdot v \quad (4)$$

Pelo regime de escoamento, o fluxo de massa que atravessa a geometria G pode ser reescrito, como a equação (5):

$$m' = \frac{dm}{dt} = \rho \cdot v \cdot A \quad (5)$$

Onde m' é a vazão do fluxo de massa; ρ é a massa específica do ar.

Sendo assim, a energia cinética E pode ser reescrita a partir da equação (6).

$$E = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v \cdot t \cdot v^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot t \quad (6)$$

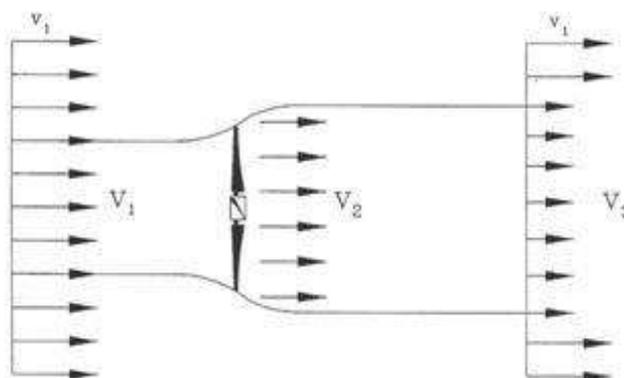
Então nesse caso a potência é a taxa de variação temporal da energia, desta forma podemos derivar a equação (6) em relação ao tempo, podendo afirmar que a potência eólica P disponível no vento que passa por uma seção transversal de área A , equação (7).

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (7)$$

A partir da equação (7), pode se constatar que a potência disponível no vento é proporcional ao cubo da velocidade do vento. Essa informação nos revela que a potência é fortemente dependente do vento. A potência disponível no vento não pode ser totalmente aproveitada pela turbina eólica para a geração de eletricidade. Em 1919 o físico alemão Albert Betz demonstrou que a eficiência dos conversores eólicos na extração da energia do fluxo de ar está limitada.[14] Então ao reduzir a velocidade do deslocamento da massa de ar, a energia cinética do vento é convertida em energia mecânica através da rotação das pás. A potência disponível no vento não pode ser totalmente aproveitada pelo aerogerador na conversão de energia elétrica.

Sendo assim é necessário levar em consideração a introdução de um índice denominado coeficiente de potência C_p , que pode ser definido como a fração da potência eólica disponível que é extraída pelas pás do rotor. Para determinar o valor máximo da energia extraída do vento (C_p máximo), o físico alemão Albert Betz considerou um conjunto de pás em um tubo onde v_1 seria o montante, representa a velocidade do vento na região anterior às pás, v_2 a velocidade do vento no nível das pás e v_3 seria a jusante, a velocidade do vento após deixar as pás, conforme apresentado na figura 22, abaixo:

Figura 22 – Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás.



Fonte: Dutra (2008).

A energia cinética extraída pelo aerogerador é a diferença entre a energia cinética a montante e a energia cinética a jusante do conjunto de pás:

O processo de montante que é dada por:

$$E_{C_m} = \frac{1}{2} m v_1^2$$

$$P = \frac{1}{2} m' v_1^2$$
(8)

O processo da jusante, também é parecido, dado por:

$$E_{C_j} = \frac{1}{2} m v_3^2$$

$$P = \frac{1}{2} m' v_3^2$$
(9)

Neste ponto é necessário fazer duas considerações extremas sobre a relação entre as velocidades v_1 e v_3 :

A velocidade do vento não é alterada ($v_1 = v_3$) – Neste caso nenhuma potência é extraída;

A velocidade do vento é reduzida a valor zero ($v_1 = 0$) – Neste caso o fluxo de massa de ar é zero, o que significa também que nenhuma potência seja retirada.

Desta forma a potência extraída P_e , é justamente a diferença do que entra(montante) e do que sai(jusante), então temos que a potência que fica na turbina, neste caso v_2 dada nesse caso por:

$$P_e = \frac{1}{2} m' (v_1^2 - v_3^2)$$
(10)

A partir dessas duas considerações extremas, a velocidade referente ao máximo de potência extraída é um valor entre v_1 e v_3 .

$$m' = \rho A v_2$$
(11)

Sendo que a área da turbina A é dada pela equação (12):

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$
(12)

Inserindo a equação (11) na equação (10), temos:

$$P_e = \frac{1}{2} \rho A v_2 (v_1^2 - v_3^2)$$
(13)

Pelo teorema de Betz, pode-se assumir que a relação entre as velocidades v_1 , v_2 e v_3 é dada por:

$$v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2} \quad (14)$$

Desta forma podemos relacionar a equação (14) na equação (13), então temos que:

$$P_e = \frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_3) (v_1^2 - v_3^2) \quad (15)$$

Sabendo que a eficiência de qualquer processo é dada por potência útil sobre a potência disponível:

$$\eta = \frac{P_e}{P} \quad (16)$$

Nesse caso já descobrimos a potência útil e também a potência disponível, então inserido as equações (15) e (7), respectivamente, na equação (16), logo:

$$\eta = \frac{\frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_3) (v_1^2 - v_3^2)}{\frac{1}{2} \rho A v_1^3} = \frac{1}{2} \left[\frac{(v_1 + v_3) (v_1^2 - v_3^2)}{v_1^3} \right] \quad (17)$$

Transformando essa expressão em termos de $\frac{v_3}{v_1}$, temos o coeficiente de potência C_p , que é a relação entre a potência extraída pelo conversor e a da corrente de ar não perturbado, conforme a figura 23.

$$\frac{1}{2} \left[\frac{(v_1 + v_3) (v_1^2 - v_3^2)}{v_1 \cdot v_1^2} \right] \quad (18)$$

Desta forma podemos reescrever o coeficiente de potência C_p , como:

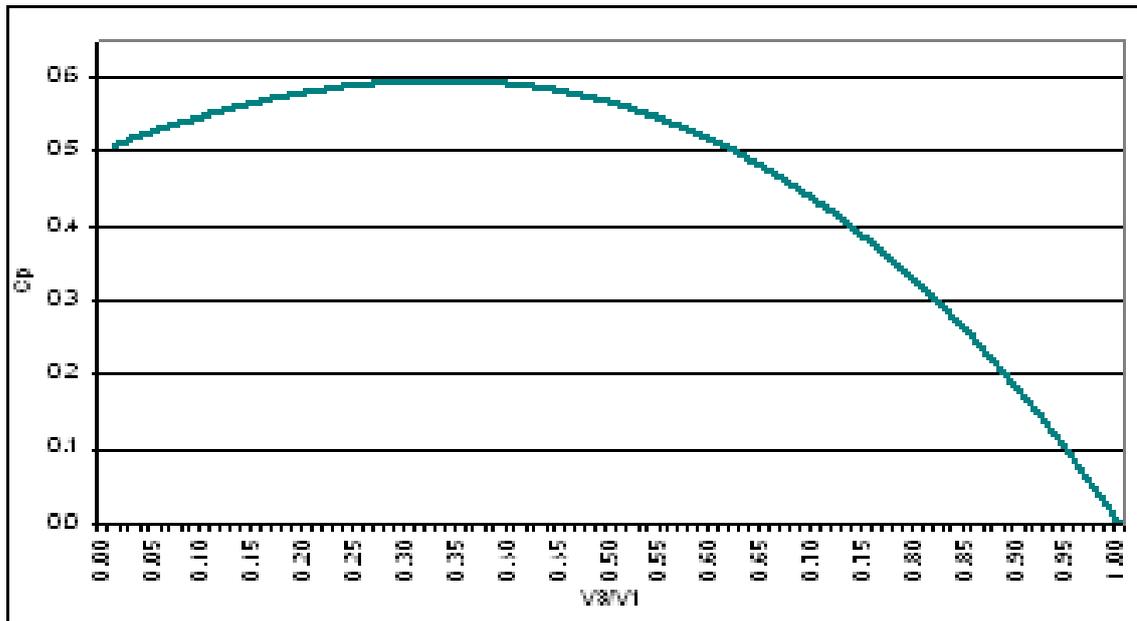
$$C_p = \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{v_3}{v_1} \right) \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \quad (19)$$

Onde:

$$\text{Potência do Vento } P = \frac{1}{2} \rho A v_1^3$$

$$\text{Coeficiente de Potência } C_p = \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\}$$

Figura 23– Distribuição de C_p em função de $\frac{v_3}{v_1}$



Fonte: Dutra (2008).

Se chamarmos de $x = \frac{v_3}{v_1}$, temos:

$$C_p = f(x) = \frac{1}{2} [1 + x] \cdot [1 - x^2] \quad (20)$$

Logo temos uma função de segundo grau, desta forma podemos encontrar os pontos críticos (máximos e mínimos) realizando a derivação de $\frac{d}{dx} = 0$.

Para isso devemos atender a algumas especificações:

Se $\frac{d^2}{dx^2} < 0$, temos um ponto crítico mínimo.

Se $\frac{d^2}{dx^2} > 0$, temos um ponto crítico máximo.

Neste caso estamos interessados em encontrar os pontos máximos do coeficiente de potência (C_p).

$$\frac{dC_p}{dx} = \left[\frac{1}{2} (1 - x^2 + x - x^3) \right]' = \frac{1}{2} (-2x + 1 - 3x^2) = 0 \quad (21)$$

Desta forma temos a relação:

$$-2x + 1 - 3x^2 = 0 \Rightarrow 2x - 1 + 3x^2 = 0 \Rightarrow a = 3, b = -1, c = 1$$

Sabendo que:

$$C_p = \frac{1}{2}(1+x) \cdot (1-x^2) \quad (22)$$

Então realizamos a primeira derivada, obtendo:

$$\frac{d}{dx} = \left(\frac{1}{2}(1+x)(1-x^2) \right) = f'(x) = \frac{1-x^2}{2} - x \cdot (x+1) \rightarrow -\frac{3x^2+2x-1}{2} \quad (23)$$

Através da primeira derivada, realizamos a segunda derivada, obtendo:

$$\frac{d^2}{dx^2} [f(x)] = f''(x) = \frac{-6x+2}{2} = -3x-1 \quad (24)$$

Encontramos então as seguintes soluções de pontos críticos:

Solução 1: $x = -1$, onde substituído no resultado $-3x - 1 = -3(-1) - 1 = 2$, nesse caso teríamos um ponto crítico mínimo.

Solução 2: $x = \frac{1}{3}$:

Onde substituído no resultado $-3x - 1 = -3\left(\frac{1}{3}\right) - 1 = \left(\frac{-3}{3}\right) - 1 = -2$, nesse caso teríamos um ponto crítico máximo. Desta forma encontramos o valor para $x = \frac{1}{3} = \frac{v_3}{v_1}$ e $\frac{dn}{dx} = 0$.

Logo para encontrarmos a eficiência máxima, temos:

$$C_{p_{max}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{3} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{1}{3} \right)^2 \right) = \frac{16}{27} = 59,3\% \quad (25)$$

Ao considerar o coeficiente de potência C_p em função de $\frac{v_3}{v_1}$ temos que:

$$C_{p_{Betz}} = \frac{16}{27} = 0.59 \text{ onde } \frac{v_3}{v_1} = \frac{1}{3} \quad (26)$$

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS OU CONCLUSÃO

Diante do estudo realizado foram apresentados os princípios básicos relacionados à energia eólica de forma simples e objetiva, destacando o processo de geração da energia mecânica nas empresas eólicas, assim como demonstrar a eficiência da captação de energia, por meio da captação de energia realizada por aerogeradores, considerando que a energia eólica já é uma energia renovável abundante que apresenta um grande potencial para a geração em larga escala. O Brasil é um país rico em recursos renováveis, porém precisa investir mais nessas áreas e tornar-se menos dependente de fontes poluentes de eletricidade. Então, a implantação do uso de energia eólica depende unicamente do crescimento tecnológico da humanidade, tendo como base o objetivo de diminuir os custos em redes hidrelétricas e o aumento do uso de fontes de energias renovadas que não tragam grandes impactos à natureza.

No entanto, o rendimento, a manutenção e o efeito sonoro de uma turbina, são as principais objeções a serem sanadas, o que depende do avanço tecnológico, tais como, a fabricação de materiais leves, baratos e mais resistentes, e na produção de máquinas que aumente o rendimento e aproveitamento da energia captada através do vento. Para o teste de viabilidade do projeto foi utilizado o método de pesquisa explicativa com a finalidade de entender e compreender o assunto abordado, partindo de uma revisão bibliográfica composta de fontes secundárias de estudos científicos para descrever o funcionamento do objeto, considerando dados obtidos através de órgãos responsáveis por gerir o controle da energia eólica no país, e fontes alternativas de estatísticas sobre o uso da energia desde a sua criação até os dias atuais.

O estudo realizado é de caráter essencialmente qualitativo através de explicação teórica sobre a física presente na energia eólica, o trabalho em questão pode ser apresentado de forma sucinta, onde foi mostrado a cada etapa do trabalho esclarecimentos das características do processo estrutural, como a física envolvida no seu processo, destacando o processo desde a estrutura de uma aerogerador e seu processo de captação do vento ,tratando da energia e potência extraída do vento, até o processo de transformação e conservação de energia. Além disso, relacionar esse tipo de conteúdo em sala de aula pode funcionar como um estímulo em relação ao estudo da física e a áreas relacionadas, agregando esse pensamento aos futuros profissionais que irão atuar no mercado de trabalho e serão responsáveis pela conservação de um ambiente propício às gerações que se seguem.

REFERÊNCIAS

- CAMARGO SCHUBERT ENGENHEIROS ASSOCIADOS. **Ceará: atlas eólico e solar.** Fortaleza, CE: Camargo Schubert Engenheiros Associados, 2019. Disponível em: <https://epbr.com.br/novo-estudo-identifica-117-gw-de-potenciapara-geracao-eolica-offshore-no-ceara/>. Acesso em: 15 maio 2020.
- DUTRA, Ricardo (org.). **Energia eólica: princípios e tecnologias.** Rio de Janeiro: CEPEL:CRESESB, 2008. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf. Acesso em: 19 ago. 2021.
- ECOTX ENERGY DATA. **Por que os aerogeradores geralmente tem três pás?** Curitiba, PR: Ecotx Energy Data, 14 jun. 2023. Disponível em: <https://www.ecotx.com.br/por-que-os-aerogeradores-geralmente-tem-tres-pas/>. Acesso em: 19 set. 2023.
- GUITARARRA, P. Energia eólica. **Brasil Escola**, [202?]. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/energia-eolica.htm>. Acesso em: 19 set. 2023.
- JOI. 7 componentes do aerogerador que você precisa conhecer. **Energês**, 2020. Disponível em: <https://energes.com.br/componentes-aerogerador/>. Acesso em: 16 out. 2023.
- LIMA FILHO, Antônio Carlos de. Considerações sobre o avanço da energia eólica. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, ano 4, ed. 10, v. 13, p. 111-127. out. 2019.
- MATTEDE, Henrique. Entenda como funciona um aerogerador. **Mundo da elétrica**, [202?]. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/entenda-como-funciona-um-aerogerador/>. Acesso em: 16 out. 2023.
- MONTEZANO, B. E. M. **Modelo dinâmico de visualização de um aerogerador com velocidade de rotação variável e controle de passo em VRML.** 2007. Projeto (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- PAVINATTO, Eduardo Fiorini . **Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede elétrica.** 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- PENA, Rodolfo F. Alves. Energia eólica no Brasil. **Mundo educação**. [200?]. Disponível em <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/energia-eolica-no-brasil.htm>, Acesso em: 24 mar. 2021.
- PICOLO, A. P.; RUHLER, A. J.; RAMPINELLI, G. A. Uma abordagem sobre a anergia eólica como alternativa de tópicos de física clássica. **Rev. Bras. Ensino Fís.** v. 36, n.4, dez. 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/fmxzk4CKmm8msVRqy9Qkbp/#>. Acesso em: 19 set. 2023.

RAIAMBAL, K.; CHELLAMUTH, C. “Modeling and simulation of grid connected wind electric generating system”. *In: COMPUTERS, COMMUNICATIONS, CONTROL AND POWER ENGINEERING*, 2002, Beijing, China. **Proceedings** [...]. Beijing, China: IEEE Press, 2002. p. 1847-1952.

REIS, Pedro. Energia eólica: como funciona e principais vantagens e desvantagens. **Portal Energia**, 10 fev. 2019. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/energia-eolica/>. Acesso em: 20 jul. 2021.

RIBEIRO, Luíza Bastos. **Um estudo sobre energia eólica no Brasil**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, MG, 2017. Disponível em: https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/356/1/MONOGRAFIA_EstudoEnergiaE%C3%B3lica.pdf . Acesso em: 24 mar. 2021.

SANTOS, Alisson Alves dos Santos *et al.* **Projeto de geração de energia eólica**. 2006. Projeto de Graduação (Engenharia Industrial Mecânica) - Universidade Santa Cecília, Santos, SP, 2006. Disponível em: <https://docplayer.com.br/1463789-Universidade-santa-cecilia-projeto-de-geracao-de-energia-eolica.html>. Acesso em: 15 ago. 2023.