

# A FÍSICA DA ENERGIA EÓLICA



Foto: Marcos Aurelio Ribeiro Miranda

Albuquerque - Sousa - Costa - Albuquerque

A FÍSICA DA ENERGIA  
EÓLICA



Márcia Cristina Palheta Albuquerque  
Leonardo Pereira de Sousa  
Sandro do Nascimento da Costa  
Marcos Lázaro de Souza Albuquerque

# A FÍSICA DA ENERGIA EÓLICA

1<sup>a</sup>. edição

Bragança, PA  
Marcos Lázaro de Souza Albuquerque  
2018

**TÍTULO:** A física da energia eólica (2018)

**ILUSTRAÇÃO:** Leonardo Pereira de Sousa  
Márcia Cristina Palheta Albuquerque

**ILUSTRAÇÃO DE CAPA:** Marcus Aurelio Ribeiro Miranda

**EDITORACÃO:** Marcos Lázaro de Souza Albuquerque

**REVISÃO:** Sandro do Nascimento da Costa

**ISBN:** 978-85-922768-4-3

**PUBLICAÇÃO E COMERCIALIZAÇÃO DA OBRA**

Clube de Autores Publicações S/A CNPJ: 16.779.786/0001-27  
Rua Otto Boehm, 48 Sala 08, América - Joinville/SC, CEP 89201-700  
Home Page: <<https://www.clubedeautores.com.br>>  
E-mail: <[atendimento@clubedeautores.com.br](mailto:atendimento@clubedeautores.com.br)>

**IMPRESSO POR:**

Alpha Graphics Bela Vista  
Rua Rui Barbosa, 468, Bela Vista – São Paulo, SP, CEP 01326-010

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Biblioteca Prof. Armando Bordallo da Silva. Bragança, PA / UFPA**

---

A física da energia eólica / Márcia Cristina Palheta Albuquerque (et al). –  
Bragança (PA): M. Albuquerque, 2018.

ISBN: 978-85-922768-4-3  
50 f.: il.

1. Física. 2. Energia eólica. 3. Ensino médio. 4. Educação. I. Albuquerque, Márcia Cristina Palheta. II. Título.

CDD: 23. ed.: 621.312136

---

Elaboração: Diego Santos da Silva  
Bibliotecário-Documentalista CRB2/593

# AGRADECIMENTO

Este livro não teria acontecido sem o apoio irrestrito do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA), Campus Bragança. Também agradecemos ao Programa Institucional de Bolsa de Iniciação à Docência (PIBID). Manifestamos o nosso agradecimento aos professores José Ricardo Patrício de Sousa e Luiz Rocha da Silva, pelas valiosas e convenientes alterações sugeridas à versão final desta obra.

Os autores



# PREFÁCIO

A presente obra propõe uma breve abordagem sobre a energia eólica, contextualizada em conteúdos básicos de Física: deslocamento, velocidade, potência, energia cinética, hidrodinâmica, potência e indução eletromagnética. Os autores tiveram a intenção de desenvolver um conteúdo que se tornasse útil para os discentes que cursam o Ensino Médio.

A disposição dos assuntos está dividida em quatro capítulos, precedida por uma introdução. A bibliografia consultada e o índice remissivo apresentam-se ao final. O primeiro capítulo faz uma breve história sobre a energia eólica. Em seguida, o potencial eólico brasileiro e o do Pará estão apresentados no segundo e terceiro capítulos, respectivamente. No quarto capítulo, é relatado o contexto físico da energia eólica, onde são discutidos a formação dos ventos, velocidade do vento, vazão, equação da continuidade, potência e transformações de energia.



# SUMÁRIO

AGRADECIMENTO .....	v
PREFÁCIO.....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	xi
INTRODUÇÃO.....	13
CAPÍTULO 1 – Uma breve história sobre a energia eólica.....	17
CAPÍTULO 2 – O potencial eólico brasileiro .....	21
CAPÍTULO 3 – O potencial eólico do Pará .....	25
CAPÍTULO 4 – Contexto físico da energia eólica.....	31
4.1 Formação dos ventos .....	32
4.2 Velocidade e direção do vento.....	35
4.3 Vazão de uma coluna de ar.....	37
4.4 Equação da continuidade no aerogerador.....	39
4.5 Potência eólica.....	40
4.6 Transformações de energia.....	42
BIBLIOGRAFIA .....	45

ÍNDICE REMISSIVO.....49

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa eólico da Região Norte. ....	26
Figura 2 - Velocidade média anual para Ajuruteua, PA.	28
Figura 3 - Deslocamento do ar a partir da diferença de pressão. ....	33
Figura 4 - Orientação de direções dos ventos. ....	36
Figura 5 - Vazão de uma coluna de ar em um cilindro de comprimento $d$ e área $A$ . ....	38
Figura 6 - Tubo de escoamento de área de seção transversal variável. ....	39
Figura 7 - Princípio de funcionamento do gerador elétrico. ....	43
Figura 8 - Experimento da Lei de Faraday-Lenz. ....	44



# INTRODUÇÃO

A história da humanidade sempre esteve relacionada ao uso da energia desde sua forma mais primária, por exemplo, o fogo. Através do descobrimento do fogo, as necessidades básicas do homem como: alimentação, aquecimento e iluminação foram atendidas devido à utilização deste recurso para seu desenvolvimento. A energia desempenha um papel fundamental para humanidade e para seu crescimento econômico.

Discussões têm sido centralizadas em torno do tema energia, principalmente sobre o fim dos combustíveis fósseis e como estes serão substituídos gradativamente por fontes alternativas de energia. Além disso, há uma preocupação extrema com os problemas ambientais gerados por fontes de energia não renováveis. As energias renováveis são na atualidade o grande passo para o desenvolvimento de um mundo sustentável.

Neste cenário, as energias renováveis como: a solar e eólica, surgem como uma alternativa de fonte inesgotável de recursos que podem ser uma forma importante de preservação do meio ambiente. Para este trabalho o nosso interesse será voltado especificamente à energia eólica, considerando que o vento é uma grandeza em abundância na natureza e ocorre em função do deslocamento de massas de ar quentes do equador em direção a regiões mais frias nos polos, o que ocasiona um movimento regular de circulação geral da atmosfera, ou seja, os ventos surgem a partir das dinâmicas da Terra.

De acordo com a International Agency Energy, em 2015 a energia eólica foi a grande responsável pelo crescimento na geração de energia, por fontes renováveis no mundo, sendo responsável por 34 %, seguida por hidroelétricas com 30 % e por usinas heliotérmicas 18 % (IEA, 2015). Em 2016, pouco menos de 487 GW da nova capacidade de energia eólica foi instalada em todo mundo, segundo o Global Wind Energy Council (2017), a potência está da ordem de 55 GW anualmente. Segundo o relatório síntese do Balanço Energético Nacional (BEN, 2017), com a base de dados referentes à 2016, a

matriz energética renovável brasileira ficou mais limpa com alta de 75,5 % para 81,7 %. A geração de energia eólica, atingiu 33,5 TWh, crescimento de 54,9 % e a potência eólica atingiu 10.124 MW, ocasionando uma expansão de 32,6 %.

Diante de assuntos como a preservação ambiental e o uso consciente de energia, torna-se um desafio para os professores levarem para sala de aula questões tão importantes e tão presentes em seu cotidiano. Ministrar uma aula sobre energia nos coloca à frente de um conteúdo complexo, devido a relação do tema com o uso das tecnologias e da questão econômica.

É de fundamental importância apresentar aos discentes do ensino médio o tema energia de forma que os mesmos se tornem conscientes do uso racional dos recursos energéticos, além de lhes mostrar as vantagens das novas formas de energia, como a Eólica, que por ser renovável preserva o meio ambiente.

Os conteúdos de Física necessários para compreensão do tema energia devem estar relacionados principalmente com o cotidiano do aluno, já que o mesmo apresenta grande significado no discurso de uma

sociedade e outras opções de abordagem para explicar tais conteúdos sempre serão importantes para a formação do cidadão contemporâneo.

Assuntos como, energia mecânica, a dinâmica do ar e eletricidade podem estudados a partir da energia produzida pelos ventos, além disso, desperta nos discentes a reflexão sobre a preservação ambiental através da interdisciplinaridade.

Ampliar os conhecimentos, relacionar os conceitos físicos presentes na energia eólica pode ser uma ferramenta fundamental e alternativa para a compreensão dos tópicos de Física referentes a geração de energia. Além disso, proporciona a alunos e professores uma ampla discussão sobre a contribuição dessas novas fontes de energia para a vida sustentável do planeta.

# CAPÍTULO 1 – UMA BREVE HISTÓRIA SOBRE A ENERGIA EÓLICA

Com o avanço da agricultura, o homem precisou de ferramentas que o auxiliasse nas diversas atividades no campo, tais como: a moagem de grãos e a irrigação através do bombeamento de água, que exigiam muito esforço humano e também dos animais.

A partir de então, o homem procurou desenvolver – mesmo de maneira primitiva – o moinho, o qual foi utilizado no beneficiamento dos produtos agrícolas. O sistema foi aperfeiçoado com a utilização da água como força motriz. Entretanto, como não havia rios em todos os lugares, a concepção do vento como fonte de energia possibilitou a ampliação do uso deste recurso, substituindo a força do homem e dos animais.

Acredita-se que antes da invenção dos cata-ventos na Pérsia, a China (2.000 A.C) e o Império Babilônico

(1.700 A.C.), também utilizavam cata-ventos rústicos para irrigação. Sabe-se pouco sobre o uso e desenvolvimento destes instrumentos primitivos na China e no Oriente Médio, assim como os que surgiram no Mediterrâneo, em que os primeiros modelos utilizavam velas de sustentação em eixo horizontal, comumente encontrados nas ilhas gregas.

Na Europa, os moinhos de vento foram uma forte influência na economia da agricultura. Porém, com o desenvolvimento tecnológico e de sistema de controle, o uso deles favoreceu várias atividades. Na Holanda, estes tiveram grandes aplicações, como na moagem de grãos, produção de óleos vegetais (1582) e também para fabricação de papel (1586) devido ao surgimento da imprensa.

Os moinhos de vento resistiram na Europa até o final do século XIX. Com a chegada da Revolução Industrial, houve um declínio no uso da energia eólica devido principalmente ao surgimento da máquina a vapor.

Ao final do século XIX e início do século XX, com o avanço da rede elétrica, foram feitas várias

pesquisas para o aproveitamento da energia eólica para grandes blocos de energia.

No estado de Ohio, Estados Unidos (1888), o industrial Charles Brush inventou o primeiro cata-vento destinado à geração de energia elétrica. Ele fornecia uma potência de 12 kW em corrente contínua, e a energia produzida era armazenada em baterias para alimentar 350 lâmpadas incandescentes.

Em 1931, desenvolveram na Rússia usinas eólicas de grande porte para utilização em usinas elétricas. Essa foi a primeira tentativa bem-sucedida de se conectar um aerogerador<sup>1</sup> de corrente alternada com uma usina termoelétrica. Outros modelos foram projetados, entretanto, não foram concluídos devidos principalmente à concorrência de novas tecnologias, como a dos combustíveis fósseis e ao aparecimento de novas reservas de petróleo.

A Segunda Guerra Mundial (1939-1945) contribuiu para o desenvolvimento de aerogeradores de médio e grande porte, uma vez que os países

---

<sup>1</sup> Gerador elétrico que converte energia eólica em energia elétrica.

empenhavam grandes esforços para economizar combustíveis fósseis.

Após a Segunda Guerra Mundial, o petróleo e as grandes usinas hidrelétricas se tornaram extremamente competitivos economicamente, e os aerogeradores foram construídos apenas para fins de pesquisa.

Mas com a crise internacional do petróleo, na década de 70, é que houve interesse e investimentos suficientes para viabilizar o desenvolvimento e aplicação de equipamentos em escala comercial. Então, a primeira turbina eólica comercial foi ligada à rede elétrica pública, em 1976, na Dinamarca. Os custos dos equipamentos, principal entrave para o uso comercial da energia eólica teve uma queda de preços entre os anos 1980 e 1990.

## CAPÍTULO 2 – O POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO

Para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável, é necessário que sua densidade seja maior ou igual a  $500 \text{ W/m}^2$ , a uma altura de 50 m, o que requer uma velocidade mínima do vento de 7,0 a 8,0 m/s. Para a Organização Mundial de Meteorologia, apenas em 13% da superfície o vento apresenta velocidade média igual ou superior a 7,0 m, a uma altura de 50 m.

O Brasil possui um potencial eólico considerado satisfatório. Segundo o relatório do Balanço Energético Nacional<sup>2</sup>, com base nos índices de 2016, a geração de energia eólica no Brasil, atingiu 33,5 TWh, o que representa um crescimento de 54,9 %, e a potência eólica atingiu 10.124 MW, uma expansão de 32,6 %.

---

<sup>2</sup> Brasil, Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br>>.

No Brasil, o primeiro aerogerador em operação comercial foi instalado em 1992. Este também foi o primeiro em operação na América Latina, instalado em Fernando de Noronha. Foi uma parceria entre o Centro Brasileiro de Energia Eólica e a Companhia Energética de Pernambuco.

A partir deste ponto, estabeleceu-se um marco nacional no desenvolvimento dos aerogeradores, e, conseqüentemente, na produção em larga escala de energia elétrica advinda desse recurso, principalmente em regiões do país desvinculadas e não atendidas pela distribuição de energia elétrica do Sistema Integrado Nacional.

Os primeiros estudos do potencial eólico brasileiro foram feitos na região Nordeste, principalmente no Ceará e em Pernambuco. Estes tiveram apoio da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) e da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), dando início à primeira versão preliminar do Atlas Eólico Brasileiro (AEB), em 2001.

Com o aumento do aproveitamento eólico em escala mundial e com a instalação das primeiras usinas eólicas brasileiras (década de 1990), começaram as primeiras medições sobre a velocidade do vento, com torres entre 30 e 50 m de altura, nos estados do Pará, Ceará, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Segundo estes resultados, os melhores potenciais eólicos estão na região Norte e Nordeste, em que na altitude de 50 m da superfície do solo, a velocidade do vento é superior a 8 m/s.



## CAPÍTULO 3 – O POTENCIAL EÓLICO DO PARÁ

Foram desenvolvidos estudos que quantificaram a velocidade do vento da região Norte, para implantação de tecnologias eólicas. Foram feitas parcerias entre o Centro de Energia Elétrica da Eletrobrás (CEPEL) e as Centrais Elétricas do Norte do Brasil (ELETRONORTE).

Em várias localidades da região Norte foram instalados anemômetros, a fim de obter-se o mapa eólico que serviria de suporte para o Atlas Eólico Brasileiro. No estado do Pará, foram instaladas estações anemométricas nas localidades de Vizeu, Ajuruteua, Salinópolis, Algodual, Soure e Chaves. E no estado do Amapá, na localidade de Goiabal.

Um estudo feito por Blasques et al (2010), estudou uma localidade da região Norte e outra do Nordeste, e fez a comparação para implementação de sistemas eólicos de grande porte.

Os resultados mostram que, apesar das duas localidades estarem relativamente distantes uma da outra, apresentam características de vento semelhantes, com a localidade da região Norte apresentando potencialidade eólica. Portanto, o litoral do Estado do Pará é propício para instalação de aerogeradores, conforme a Figura 1 <sup>3</sup>.

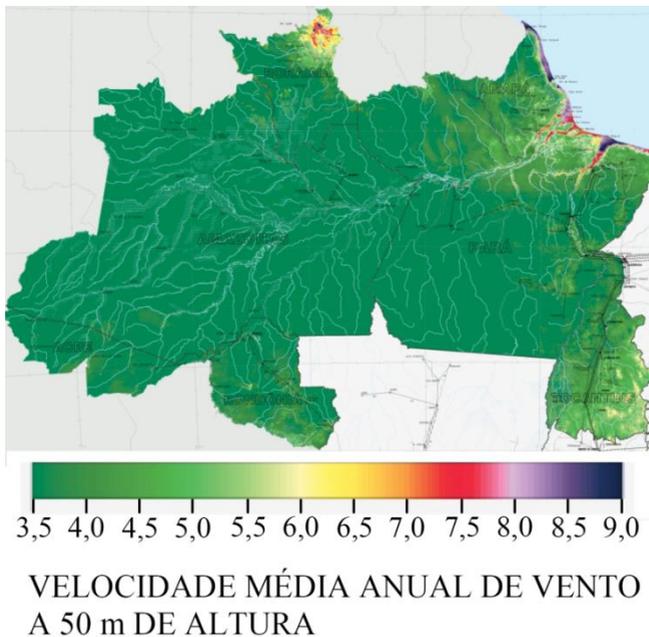


Figura 1 - Mapa eólico da Região Norte.

---

<sup>3</sup> Brasil, Ministério de Minas e Energia, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (2001). Disponível em: <<http://www.cepel.br>>.

No Pará, em 1993, o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) em parceria com a companhia elétrica local, realizou várias coletas de dados de velocidade vento, em sete localidades do Estado, no litoral e também na Ilha do Marajó, visando identificar o potencial eólico.

Já em 1998, a Universidade Federal do Pará (UFPA) através do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE) implantou mais três estações em localidades com possível potencial eólico.

Junto com a Companhia Elétrica do Pará (CELPA), foram instaladas estações anemométricas nos seguintes municípios: Vizeu, Ajuruteua, Salinópolis, Soure e Chaves. Estas começaram a operar em 1996, com anemômetros instalados a 30 m do solo.

Em parceria com algumas prefeituras e dos financiamentos de agências nacionais de pesquisa, o GEDAE coletou dados nas estações dos municípios de Mota (Maracanã), Tamaruteua (Marapanin) e Praia Grande (Ponta de Pedras).

Para a localidade de Ajuruteua (Bragança), os resultados da velocidade do vento ao longo do ano obtidos por Frade e Pinho (2000)<sup>4</sup> estão mostrados na figura 2, em que eles comparam os valores medidos e os calculados através de um polinômio de grau 3, com ajuste a partir da decomposição da matriz dos coeficientes de valores singulares.

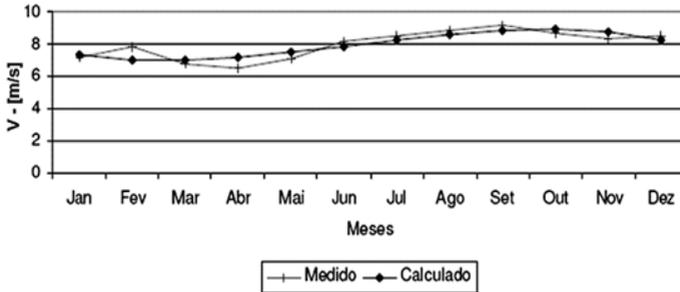


Figura 2 - Velocidade média anual para Ajuruteua, PA.

Pode-se verificar, a partir dos resultados obtidos para Ajuruteua, que a mesma possui um potencial eólico que pode ser aproveitado para instalações de sistemas eólicos de pequeno ou, até mesmo, de médio e grande porte.

<sup>4</sup> FRADE, L. C. S.; PINHO, J. T. Levantamento, tratamento e análise de dados de velocidade e direção do vento no litoral do Estado do Pará. Universidade Federal do Pará. Belém. 2000.

Para Vaz (2010)<sup>5</sup>, a implantação de sistemas eólicos para geração de energia elétrica é uma alternativa importante para atender localidades que ainda não são assistidas com energia elétrica.

---

<sup>5</sup> VAZ, J. R. P. Estudo de turbinas eólicas adaptadas a baixas velocidades de vento. Universidade Federal do Pará. Belém. 2010.

CLUBE DE AUTORES PUBLICAÇÕES S/A  
DETÉM OS DIREITOS LEGAIS DE  
PUBLICAÇÃO, DIVULGAÇÃO E  
COMERCIALIZAÇÃO DESTA OBRA.  
CONFIRA EM:

[https:// www.clubedeautores.com.br/book/243456--  
A\\_FISICA\\_DA\\_ENERGIA\\_EOLICA#.WsVKh9TwbIU](https://www.clubedeautores.com.br/book/243456--A_FISICA_DA_ENERGIA_EOLICA#.WsVKh9TwbIU)