



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
CAMPUS VII-GOVERNADOR ANTÔNIO MARIZ  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E SOCIAIS APLICADAS - CCEA  
DEPARTAMENTO FÍSICA  
CURSO DE LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA**

**MARIA DAS VITÓRIAS SANTOS DO NASCIMENTO**

**A IMPORTÂNCIA DA FÍSICA NA GERAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS:  
UM ESTUDO ANALÍTICO DAS TURBINAS EÓLICAS**

**PATOS – PB  
2022**

MARIA DAS VITÓRIAS SANTOS DO NASCIMENTO

**A IMPORTÂNCIA DA FÍSICA NA GERAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS:  
UM ESTUDO ANALÍTICO DAS TURBINAS EÓLICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Licenciatura Física da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito para a obtenção do título de licenciado em Física.

**Área de concentração:** Física.

**Orientador:** Prof. Dr. Thiago Brito Gonçalves Guerra.

**PATOS – PB  
2022**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

N244i Nascimento, Maria Das Vitorias Santos do.  
A importância da física na geração de energias renováveis [manuscrito] : um estudo analítico das turbinas eólicas / Maria Das Vitorias Santos do Nascimento. - 2022.  
22 p. : il. colorido.  
  
Digitado.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências Exatas e Sociais Aplicadas , 2022.  
"Orientação : Prof. Dr. Thiago Brito Gonçalves Guerra , Coordenação do Curso de Ciências Exatas - CCEA."  
1. Energia. 2. Energia Eólica. 3. Equação de Bernoulli. I.  
Título  
  
21. ed. CDD 333.79

MARIA DAS VITÓRIAS SANTOS DO NASCIMENTO

A IMPORTÂNCIA DA FÍSICA NA GERAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS: UM ESTUDO ANALÍTICO DAS TURBINAS EÓLICAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Licenciatura Física da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito para a obtenção do título de licenciado em Física.

Área de concentração: Física

Aprovada em: 13/12/2022

**BANCA EXAMINADORA**

THIAGO BRITO GONÇALVES GUERRA

Prof. Thiago Brito Gonçalves Guerra (Orientador)

Universidade Estadual da Paraíba

Jorge Luís da Silva

---

Prof. Jorge Luís da Silva

Instituto Federal da Paraíba

Anderson Alves de Lima

---

Prof. Anderson Alves de Lima

Universidade Federal de Campina Grande

A minha família, em especial a minha mãe, meu pai e meus irmãos por todo apoio e carinho que tiveram comigo, DEDICO.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu energia e coragem para concluir esse curso.

Agradeço aos meus pais, meus irmãos e demais familiares, pelo o apoio necessário

Agradeço aos meus professores, desde a alfabetização até a graduação, que com certeza foram as fontes de inspiração e motivação para seguir a vida acadêmica.

Agradeço ao meu orientador, Dr. Thiago Guerra, pela ajuda e paciência, e por ter me proporcionado um ensino de qualidade e significado.

Agradeço pelos momentos difíceis que me ensinaram a ser cada vez mais forte.

Muito obrigada aos meus amigos e colegas de curso, que durante essa jornada, compartilharam comigo momentos incríveis de experiências, troca de conhecimento e ideias .

Por fim, agradeço ao universo que por ser tão fascinante, eleva minha curiosidade pelo belo e misterioso mundo da física, o qual me ajuda na compreensão de tudo e do todo .

Obrigada a todos !

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Breve histórico sobre a energia eólica</b> .....	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Conceitos fundamentais</b> .....	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>Energias renováveis</b> .....	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>Energia eólica</b> .....	<b>14</b>
<b>6</b>	<b>Aerogeradores eólicos</b> .....	<b>14</b>
6.1	Transformações de energias .....	14
6.2	Componentes do sistema .....	15
6.3	Gerador .....	16
<b>7</b>	<b>Aerodinâmica</b> .....	<b>17</b>
7.1	Força de Sustentação .....	18
7.2	Força de Arrasto .....	19
<b>8</b>	<b>Transformações de energia</b> .....	<b>19</b>
<b>9</b>	<b>Considerações finais</b> .....	<b>22</b>
	<b>Referências bibliográficas</b> .....	<b>23</b>

## **A IMPORTÂNCIA DA FÍSICA NA GERAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS: UM ESTUDO ANALÍTICO DAS TURBINAS EÓLICAS**

Maria das Vitorias Santos do Nascimento<sup>1</sup>

### **RESUMO**

Em busca por fontes alternativas de energia e sustentabilidade, muitas empresas estão investindo em energias renováveis, afim de evitar o agravamento dos problemas ambientais em nível local e global. Nesta revisão, destacaremos a importância e aplicação dos princípios físicos nos aerogeradores eólicos. Discutiremos brevemente sobre a história e desenvolvimento das turbinas eólicas, evidenciando também o surgimento do primeiro moinho de vento no Brasil. Na sequência, uma fundamentação conceitual e teórica sobre energia e energias renováveis em especial a de origem eólica. Em seguida, as transformações de energia, componentes do sistema e o princípio básico de um gerador. Trataremos ainda das forças de origem aerodinâmica que giram as pás em torno do centro do rotor. Por fim, mostraremos a aplicação da equação de Bernoulli as pás eólicas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia. Energia Eólica. Equação de Bernoulli.

### **THE IMPORTANCE OF PHYSICS IN RENEWABLE ENERGY GENERATION: AN ANALYTICAL STUDY OF WIND TURBINES**

#### **ABSTRACT**

In search of alternative sources of energy and sustainability, many companies are investing in renewable energies, to avoid the worsening of environmental problems at local and global levels. In this review, we will highlight the importance and application of physical principles in wind turbines. We will briefly discuss the history and development of wind turbines, also highlighting the emergence of the first windmill in Brazil. Next, a conceptual and theoretical foundation on energy and renewable energies, in particular, wind energy. The energy transformations, system components, and the basic principle of a generator. We will also deal with the forces of aerodynamic origin that rotate the blades around the center of the rotor. Finally, we will show the application of the Bernoulli equation to wind blades.

**Keywords:** Energy. Wind Energy. Bernoulli's Equation.

---

<sup>1</sup> Aluna de Graduação em Licenciatura em Física na Universidade Estadual da Paraíba – Campus VII.E-mail: mvtoria458@gmail.com

## 1 Introdução

O crescimento dos centros urbanos causou inúmeras transformações que a sociedade não havia vivenciado até então. A medida que a sociedade foi se desenvolvendo, o consumo de energia aumentou proporcionalmente. Devido ao grande consumo de energia, hoje existe uma intensa busca por fontes de energias alternativas e renováveis.

Um dos assuntos mais recorrentes em todo o mundo atualmente do ponto de vista da sustentabilidade é a procura por fontes de energias renováveis. Dentre as várias fontes sustentáveis de geração de energia elétrica podem-se citar a energia produzida por painéis solares (a energia solar); aquelas provindas de aerogeradores (a energia eólica); e ainda a energia proveniente de quedas d'água, as hidrelétricas (a energia hidráulica) (VELOSO, 2022).

A produzida pelos ventos está se expandindo amplamente nos últimos anos por ser uma energia limpa e abundante. O papel das turbinas eólicas é aproveitar a energia cinética dos ventos. A captação e transmissão desse tipo de energia são feitos por equipamentos específicos que transformam a energia cinética dos ventos em energia elétrica. Para um bom entendimento dessa transformação, faz-se necessário uma compreensão do conceito de energia, suas transformações e do princípio de Bernoulli que descreve a dinâmica de um fluido movendo-se ao longo de uma linha de corrente.

Neste trabalho busca-se ressaltar como o princípio de Bernoulli pode ser utilizado para gerar energia renovável, especificamente a de origem eólica. Nesta pesquisa foi acatada como estratégia metodológica, a revisão bibliográfica optando-se por utilizar a revisão analítica que é um dos tipos de revisão de literatura, que possibilita o acesso às experiências de autores que já pesquisaram sobre o assunto.

## 2 Breve Histórico sobre a Energia eólica

De acordo com Zebral et al. (2012) não se sabe o período histórico correto que foi descoberto ou desenvolvido a utilização da energia oriundo dos ventos, entretanto, podem ser ressaltados certos momentos de maior aplicação da utilização desse tipo específico de energia. Os egípcios foram os primeiros a utilizarem a energia proveniente dos ventos. Em meados do ano de 2800 a.C. os egípcios começaram a utilizar velas para impulsionar os seus navios. Os persas por volta do ano 700 d.C.

começaram a construir moinhos de vento verticais que empregavam a força dos ventos para realizar a moedura de grãos.

Atualmente as turbinas eólicas tem sido usadas para a geração de energia elétrica. Para realizar isso o eixo de uma turbina eólica deve ser conectado em um gerador elétrico. O primeiro moinho de vento capaz de realizar a geração de energia elétrica criado por James Blyth foi instalado na sua casa de campo no interior da Escócia (PINTO, 2013).

De acordo com Mendonça (2014):

Como as velocidades de rotação da turbina são baixas, geralmente se utiliza um multiplicador de velocidade entre o eixo da turbina e o gerador. A energia é transferida para o sistema elétrico, ou para baterias que a armazenem, ou para que seja utilizada. Pour la Cour marca o ponto de transição entre os moinhos de vento e a moderna tecnologia de geração eólica. Ao construir uma turbina eólica experimental, em 1891, que acionava um dínamo. Ele usou a corrente contínua gerada pela turbina para eletrólise e armazenou o hidrogênio então produzido para fornecer eletricidade às áreas rurais da Dinamarca. (p. 23).

Em se tratando de produção de energia mais especificamente energia elétrica no Brasil o autor Magalhães (2009) determina que a energia elétrica comercial no Brasil se inicia com a construção das primeiras hidrelétricas e algumas áreas de iluminação pública no final do século XIX. Já na década de trinta o governo brasileiro começa a fazer uma regulação no mercado com o intuito de minorar os problemas iniciais de fornecimento de energia. Na década de cinquenta o Brasil passou pela primeira crise energética.

Depois da primeira crise do petróleo, inúmeros países, incluindo o Brasil, foram em busca de fontes energéticas alternativas, visando uma forma de energia não poluente chegou-se a energia eólica. O início da energia eólica no Brasil foi no ano de 1981 como Projeto Debra que é uma sigla com as iniciais de Deutschland e o Brasil para representar a parceria entre o governo brasileiro e alemão, por meio do Centro Aeroespacial da Alemanha essa parceria é resultado de um incentivo feito através de estudos que foram realizados pelo Centro de Tecnologia Aeroespacial (CTA) para a averiguação do potencial de geração de energia eólica na Região Nordeste do Brasil (PINTO, 2013).

Segundo Mendonça (2014) a primeira turbina eólica do Brasil foi instalada no arquipélago de Fernando de Noronha em 1992. A energia eólica nesse período correspondia 10% da energia produzida no arquipélago. Uma década depois o

governo brasileiro elaborou a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) com o intuito de estimular a utilização de fontes de energias renováveis.

### **3 Conceitos Fundamentais**

A energia está presente no Universo em várias formas. Todo processo físico no Universo envolve transformações de energia. Portanto, seu conceito é extremamente importante. Conceituamos energia, formal e genericamente, como a capacidade de um sistema físico realizar trabalho, tecnicamente, energia é uma grandeza escalar associada a um estado de um ou mais corpos.

A energia pode possuir diferentes formas e dependendo de como ela se manifesta, recebe diferentes denominações, as quais podem ser classificadas em renováveis e não renováveis, de acordo com a capacidade natural de reposição de recursos.

A lei da conservação da energia afirma que a energia não pode ser criada nem destruída - apenas convertida de uma forma para outra. Isso significa que um sistema sempre tem a mesma quantidade de energia, a menos que seja adicionada ou transferida energia externa. A única maneira de usar a energia é transformando-a de uma forma em outra.

Durante o período paleolítico o homem descobriu o fogo através da observação de raios que atingiam árvores, a partir disso o homem começou a tentar reproduzir o fogo por meio da utilização de pedras para gerar faíscas e utiliza-lo para seu benefício. Este período histórico iniciou com o ser humano utilizando a energia da natureza no caso o fogo em seu benefício dando início para a construção de uma civilização (DIEFENTHAELER, 2013).

O movimento de um fluxo intenso de uma corrente de água produz alguns tipos de energias e quando é aplicada em uma turbina possibilita que a mesma se mova e desta maneira gera a produção de energia (CORRADI et. al., 2010).

Segundo Silva (2019 p. 20):

A utilização de energia para produzir um determinado trabalho foi uma conquista da ciência, na Grécia Antiga já se estudava esse conceito, embora hoje haja algumas definições para essa grandeza, a energia não pode ser completamente explicada por estar imbricada em todos os fenômenos estudados na Física.

A biologia assim como na área da física também possui o seu conceito de energia no qual é a transferência de energia de animal para animal por meio da cadeia alimentar que é realizada desde os produtores até os seus consumidores (ARAUJO E NONENMACHER, 2009).

Para Silva (2019),

Richard Feynman, prêmio Nobel de Física no ano de 1965, em uma de suas palestras definiu de forma original essa grandeza, “ainda não sabemos o que é energia, mas não sabemos por ser a energia uma coisa ‘estranha’, a única coisa de que temos certeza e que a natureza nos permite observar é uma realidade, ou se preferir uma lei chamada Conservação de Energia”. Esta lei garante que a energia total do universo permanece constante, não podendo ser criada ou destruída, apenas transformada de um tipo de energia em outra, como por exemplo, quando a energia do vento é transformada em energia elétrica. (p.19).

De acordo com Goldemberg e Lucon (2007) a água o ar e a energia são itens fundamentais para a vida dos seres humanos, nas sociedades arcaicas o valor destes itens era zero e a produção de energia era por meio da lenha oriunda das florestas e era usada para o aquecer e cozinhar. Com o decorrer do tempo o consumo de energia foi aumentando o que ocasionou pela procura de novas fontes para a produção de energia. Depois da Revolução Industrial foi necessário utilizar de carvão, gás e petróleo para produzir energia, entretanto o custo para a produção de energia utilizando estes recursos era extremamente elevado.

Segundo Silva (2019 p. 15):

No mundo atual muito se ouve falar sobre calorías ou autonomia de baterias de celulares ou até mesmo sobre o consumo de uma lâmpada de uma residência. O fato é que, como já dito, ambos têm relação em energia, mas com aplicações diferentes. Levado ao sentido deste trabalho e que esses exemplos como o celular e a lâmpada devem ter sua energia repostas, deve se pensar de onde vem essa tal energia.

O desenvolvimento socioeconômico e sustentável estão diretamente ligados. Para compreender o que é energia é necessário conhecer as fontes, suas limitações e as complicações devido uma aplicabilidade inadequada que pode gerar danos ao meio ambiente e a sociedade. A energia que é utilizada atualmente é proveniente de vários recursos naturais como, água, sol, vento, resíduos sólidos e combustíveis fósseis, como gás natural e petróleo, estas são as fontes primárias de energia. Já as fontes secundárias de energia são produzidas por meio das fontes de energias

primarias (GATTI, 2018)

De acordo com Gatti (2018 p. 15):

petróleo é a fonte de energia mais consumida no mundo e pode ser encontrado na natureza impregnado em rochas sedimentares. Nos diferentes pontos de ebulição das substâncias que estão no petróleo, ocorre a separação para converter em outros produtos. Entre os produtos obtidos estão o gás, a gasolina, o querosene e as ceras. Todos eles têm influência no desenvolvimento da vida humana e no progresso tecnológico e econômico.

A energia é algo essencial para o progresso e desenvolvimento da sociedade, entretanto perante a probabilidade do esgotar as matrizes energéticas tradicionais e a degradação ambiental, é necessário a consciencialização por pesquisar novas fontes de energias renováveis para produzir energia. Diante deste cenário o governo vem criando novas políticas públicas que tem o objetivo de incentivar novos tipos de matrizes elétricas (MARTINS, 2017).

#### **4 Energias renováveis**

Segundo Goldemberg e Lucon ( 2007) as energias renováveis são as oriundas de ciclos naturais para conversão, como por exemplo a proveniente da radiação solar que é uma fonte primária de energia e não agride o meio ambiente. Entretanto atualmente o consumo e produção de energia é baseado em fontes fósseis, que ocasiona uma grande emissão de poluentes que prejudicam o meio ambiente, e que a um longo prazo pode causar danos ao planeta. Diante disso é necessário alterar os meios de produção de energia e criar incentivos para produção por meio de energias renováveis e neste sentido o Brasil manifesta condições favoráveis com relação ao resto do mundo.

De acordo com Silva (2019) o consumo de energia em países que são considerados desenvolvidos é tido como extremamente exagerado, e isto está gerando um grande desequilíbrio. Um terço da população do planeta não possui os serviços de energia mais básicos. O autor ressalva que um dos grandes desafios do século XXI é como produzir energia de maneira sustentável. De acordo com o autor o desenvolvimento das sociedades está diretamente ligado com a habilidade de produzir e usufruir da energia. Um estadunidense consome duas vezes mais energia que um indivíduo europeu e cinco vezes mais que alguém da América latina, esse desequilíbrio de consumo de energia é um grande problema.

Segundo Goldemberg, et al. (2010, p. 57):

(...) ao estimular o desenvolvimento de alternativas aos combustíveis convencionais de hoje, uma transição para energia sustentável poderia também ajudar a enfrentar as preocupações com a segurança energética, que estão novamente no topo da agenda de políticas nacionais e internacionais de muitas nações, reduzindo, dessa forma, a probabilidade de que a disputa por reservas de gás e petróleo, finitas e distribuídas de forma desigual, aumente tensões geopolíticas crescentes nas próximas décadas

## **5 Energia Eólica**

A energia eólica é a energia cinética da força de massas de ar em movimento, que é captada por turbinas eólicas e convertida em eletricidade.

As condições para este tipo de geração de energia são bem favoráveis no Brasil, onde a capacidade de projetos eólicos continua crescendo desde 2005. Segundo os dados da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), o país encerrou 2020 com 17,74 GW de potência operacional por aerogeradores, volume que já torna a energia eólica a segunda maior fonte da matriz elétrica brasileira.

A energia produzida pelo vento contribui com vários benefícios para a sociedade, auxiliando no processo de produção sustentável e favorecendo o progresso do país. Por isso, é de extrema importância conhecer melhor e investir em projetos eólicos, para desenvolvimento de uma economia nacional forte sustentável, colaborando assim, para a qualidade de vida das gerações futuras e para a promoção do país (apud GOMES; HENKES, 2015).

## **6 Aerogeradores eólicos**

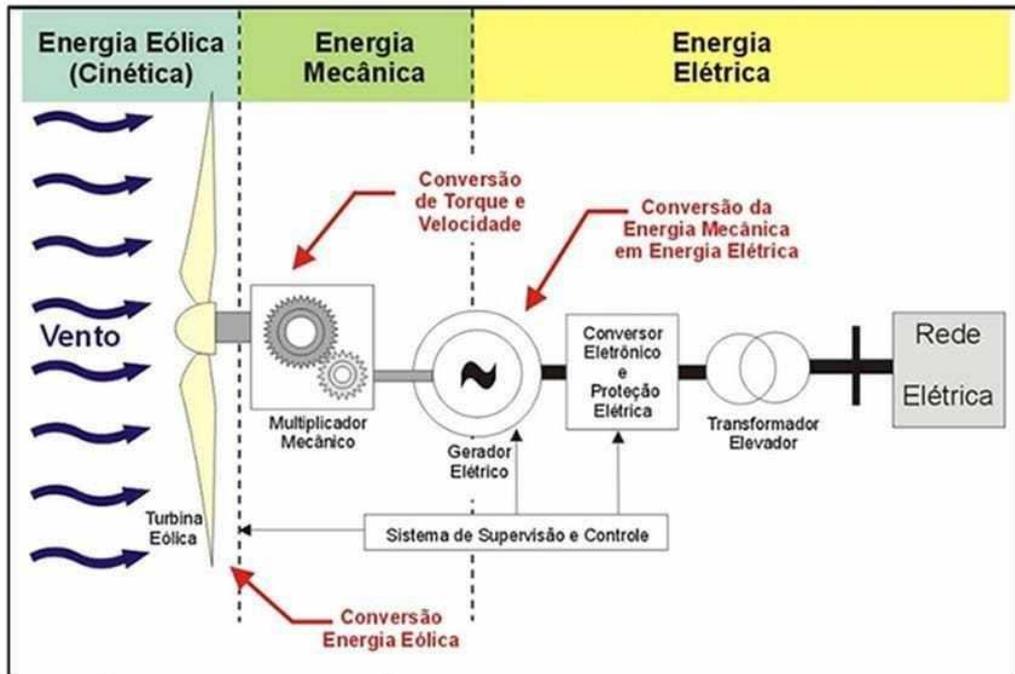
### **6.1 Transformações de energia**

Aerogeradores são dispositivos destinados a obtenção de energia elétrica a partir do vento. Durante o processo de transformação, as turbinas eólicas convertem a energia do vento em eletricidade em duas etapas. No primeiro momento, a turbina modifica parte de energia do vento e converte em energia mecânica. Em seguida, a energia mecânica é convertida em energia elétrica no gerador e depois passada para a rede elétrica.

O vento atinge as pás do rotor que se movimentam. Esse movimento é transferido para um sistema de engrenagens que multiplicam a frequência do rotor. Essa

velocidade é transmitida para o gerador elétrico responsável por produzir a eletricidade por meio do fenômeno de indução eletromagnética. Esses processos são demonstrados na ( Figura 1 ).

**Figura 1-** Esquema geral de funcionamento de um aero gerador



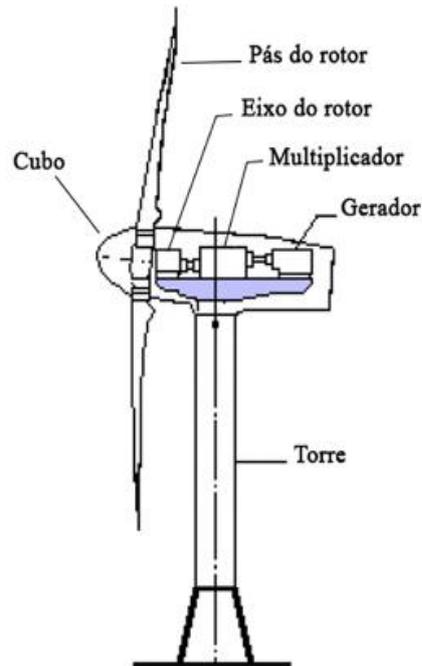
Fonte: Picolo (2014).

## 6.2 Componentes do sistema

Segundo Castro (2005, p.58) os moinhos eólicos ou aerogeradores são constituídos por vários componentes, como mostra a (Figura 2) mas o sistema basicamente se divide em 3 partes:

- Um rotor, ao qual estão acopladas as hélices ou pás
- Uma cabine ou nacelle, que aloja diversos outros componentes
- Uma torre, responsável por sustentar e posicionar o rotor na altura adequada

**Figura 2-** Componentes principais de um aero gerador



**Fonte:** Picolo (2014).

O rotor é o elemento da turbina eólica que transfere o movimento das pás para o eixo central que pode ser horizontal ou vertical. O mais usado nos projetos é o composto por três hélices. Dentro da cabine é possível encontrar dois eixos (principal e do gerador), existindo entre eles um conjunto de engrenagens a que se dá o nome de multiplicador. O eixo do gerador, sendo este o componente responsável pela conversão da energia mecânica em energia elétrica (EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA AALP, 2018). A torre é a estrutura que sustenta o rotor e a nacelle do aerogerador em altura ideal para a captação dos ventos; devido ao seu enorme tamanho, as torres eólicas são chamadas de gigantes da energia renovável.

### 6.3 Gerador

O princípio básico de um gerador consiste em uma turbina que produz um movimento de rotação em uma espira. Essa espira gira em torno de um eixo perpendicular a direção das linhas de força de um campo magnético que pode ser gerado por ímãs ou bobinas. Isso faz com que o fluxo do campo magnético da espira varie com o tempo e então é produzida uma força eletromotriz induzida  $fem$  ( $\epsilon$ ).

A  $fem$  induzida é diretamente proporcional a taxa de variação do fluxo, então para aumentar o seu "pico" é necessário aumentar essa variação. Além disso, segundo a lei de Faraday-Neumann-Lenz, o sentido da corrente elétrica induzida é tal

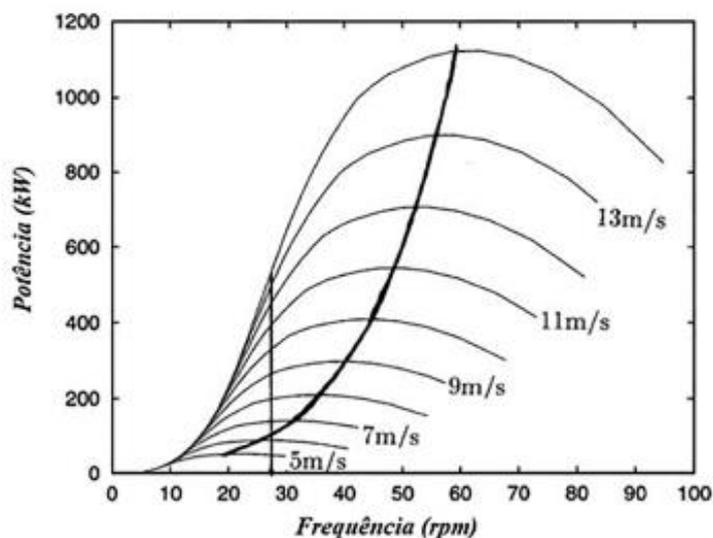
que o efeito que ela produz (campo magnético induzido) se oponha ao efeito que a gerou.

Durante um intervalo de tempo  $\Delta t$  o fluxo magnético  $\Delta\phi$  varia e dessa forma a *fem* ( $\varepsilon$ ) é dada pela razão entre variação do fluxo magnético e a variação do tempo, conforme a seguinte equação :

$$\varepsilon = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (1)$$

A partir disso podemos concluir que a potência produzida pelo aerogerador depende, além de outros fatores, da rotação dessa espira. O comportamento do sistema gerador-turbina será determinado pela relação entre a velocidade do vento e a potência fornecida pelo aerogerador que é conhecida como curva de potência ou curva característica do aerogerador e pode ser obtida teoricamente pelos pontos de intersecção representativa na (Figura 3) .

**Figura 3-** Curva característica de um gerador elétrico para diferentes rotações e curvas do aero gerador em diferentes velocidades do vento.



Fonte: Picolo (2014).

## 7 Aerodinâmica

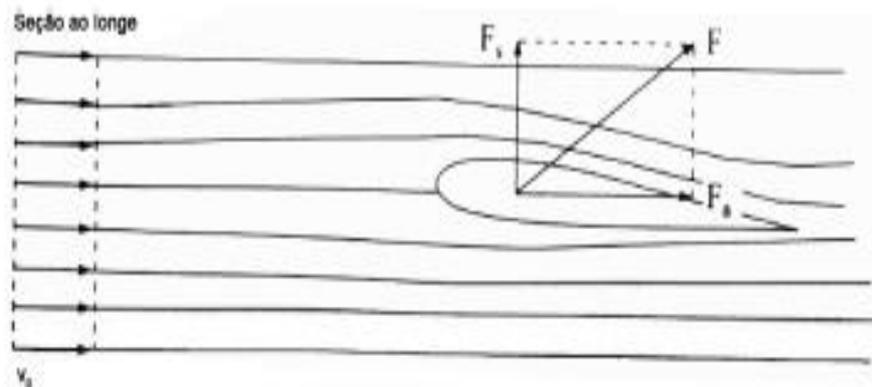
A aerodinâmica é o ramo da mecânica de fluidos que estuda o movimento do ar em redor dos corpos. A forma e a posição de um objeto determinam a sua resistência à passagem do ar. Ao passar por um corpo, o fluido provocará nele o aparecimento

de uma força resultante. Supondo o escoamento bidimensional, essa força poderá ser decomposta em duas componentes que serão chamadas de:

- **Resistência ao avanço ou força de arrasto, paralela às linhas de corrente ao longe**
- **Força de sustentação que é a componente normal ou perpendicular às linhas de corrente ao longe**

A (Figura 4) representa essas forças considerando que a região ao longe é uma seção perpendicular às linhas de corrente na região do fluido não perturbado de onde provem a velocidade do fluido ao longe do corpo, uniforme de valor  $v_0$ .

**Figura 4** – Forças atuantes em um corpo atravessado por um fluido.



Fonte: Pico (2014).

### 7.1 Força de sustentação

A explicação para o aparecimento da força de sustentação é o fato da velocidade do fluido ser diferente nas duas faces do aerofólio, provocando o diferencial de pressões causador de uma força resultante perpendicular à direção do movimento. As pás da turbina eólica são semelhantes às asas do avião. Elas possuem a forma fundamental para que ocorra o movimento. Na parte inferior ela é mais reta e na parte superior mais curvada. Quando o ar atravessa essa pá ele se divide parte passando por cima e parte por baixo. Ao atingir esse objeto, o ar se divide, porém, o caminho que ele percorre na parte superior é mais longo do que na parte inferior. A força de sustentação  $F_s$  é representada pela Eq. (2). Com essa equação pode-se notar a grande dependência dessa força com a velocidade.

$$F_s = \frac{1}{2} \cdot C_s \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (2)$$

Com essa equação pode-se notar a grande dependência dessa força com a velocidade. Onde  $C_s$  é um parâmetro determinado experimentalmente conhecido como coeficiente de sustentação,  $\rho$  é a massa específica do ar,  $A$  é a área de referência.

## 7.2 Força de arrasto

Quando existe uma velocidade relativa entre um fluido e um corpo sólido, o corpo experimenta uma força de arrasto  $F_D$  que se opõe ao movimento relativo e é paralela à direção do movimento relativo do fluido. A força de arrasto é dada pela Eq.(3) :

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_s \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (3)$$

A força de arrasto da superfície é a força provocada pelas tensões de cisalhamento (cociente entre o módulo da componente tangencial de uma força e a área sobre a qual ela está aplicada) na superfície sólida causadas pela variação da velocidade ao longo das perpendiculares do corpo.

## 8 Equação de Bernoulli aplicada às pás eólicas

O objetivo principal da equação de Bernoulli Eq.(8) é descrever a dinâmica de um fluido, mas também pode ser aplicada a qualquer situação prática, desde que aproximações coerentes sejam feitas.

Para começar, aplicamos a lei da conservação da energia mecânica,

$$W = \Delta K + \Delta U \quad (4)$$

onde  $W$  é o trabalho realizado para um fluido sofrer uma variação de energia cinética  $\Delta K$  e energia potencial gravitacional  $\Delta U$ :

$$\Delta K = \frac{1}{2} m V_2^2 - \frac{1}{2} m V_1^2, \quad (5)$$

$$\Delta U = m g y_2 - m g y_1, \quad (6)$$

Combinando as equações (5) e (6), obtemos:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho g y_2 \quad (7)$$

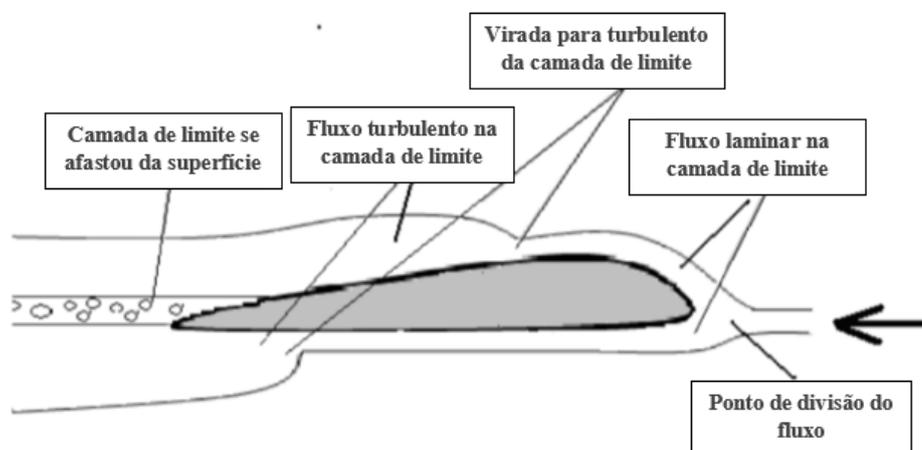
$$P + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho g y = \text{constante} \quad (8)$$

A equação de Bernoulli, estabelece que, para fluidos incompressíveis, sem transferência de calor, a energia por unidade de volume será constante conforme a Eq.(8).

Sendo  $P$  a pressão,  $\rho$  a densidade,  $y$  a altura e  $v$  a velocidade. A Eq.(8) explica diversos comportamentos de fluidos em escoamento de modo discreto, considerando balanços de energias.

É importante destacar que, diferentemente de outros mecanismos aerodinâmicos, as hélices descritas na (Figura 2) têm seus perfis dimensionados a gerar forças estáticas. A principal função das hélices é moldar a variação espacial dessa massa de maneira inteligente: a superfície curvada para cima causa uma pressão maior em um dos lados, e o próprio ar empurra o material.

**Figura 5-** Tipo de fluxo em volta do perfil da pá



Fonte: Vogt (2010).

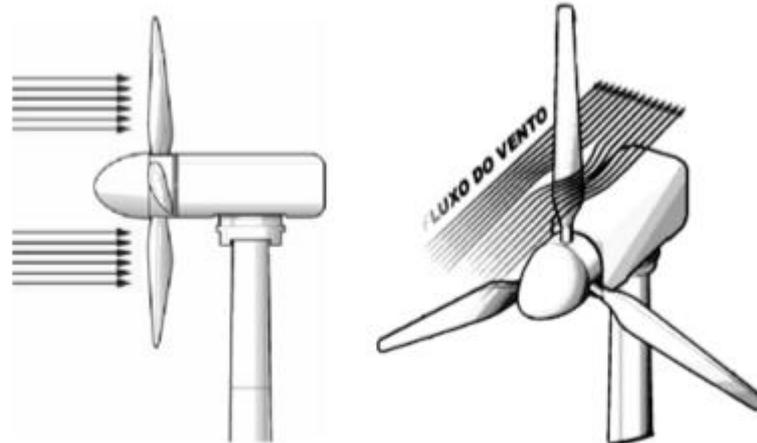
A figura acima, mostra como a parte superior e curvada do perfil impõe um a maior parte do fluxo do ar para cima. Como o vácuo não pode ser criado, o fluxo superior deve acelerar, pois percorrerá um caminho maior. O atrito devido a aceleração causa uma maior desaceleração no fluxo, portanto uma variação de energia da massa de ar, já é um indícios das ideias de Bernoulli .

Ao começar a “perceber” a existência da hélice ( através da desaceleração das

camadas de ar à frente ) a velocidade diminui rapidamente, a altura pode ser considerada constante e pode-se perceber de maneira precisa, que o ar tem sua densidade diminuída, pois o atrito com o material da hélice já causa calor. A pressão na região também diminui pois as pás “cortam” o fluxo de ar, aumentando área de superfície. Com a diminuição dos valores do primeiro e do terceiro termo na equação de Bernoulli, percebe-se claramente que uma parte da energia se transforma em “Potencial-Cinética”, uma energia que fica momentaneamente livre para ser aproveitada pela pá para movimento inicial do aerogerador . A maior parte dessa energia se transforma em cinética rotacional, a hélice consegue vencer a inércia e começa girar .

Vencida a inércia inicial, a maior parte da massa de ar se encontra nas faces superiores da hélice, e a aceleração causa um aumento da velocidade no primeiro termo. Para compensar, a pressão diminui, pois o fluido (ar) está escoando por áreas superficiais inteligentemente projetada, conforme é demonstrado na (figura 6) abaixo.

**Figura 6-** Fluxo de ar através das pás do rotor



**Fonte:** Adaptado de How Stuff Works.

Por fim, a parte preponderante de ar que está no ponto mais alto do perfil, sofre alguma desaceleração, causada pela própria forma da hélice, diminuindo o termo  $\frac{v^2}{2}$ . Além disso a altura diminui. A pressão em razão da massa específica do ar, pode ser considerada desprezível e a igualdade com uma constante pede um termo de energia positivo no lado direito da equação.

Esse termo positivo é a energia que é transmitida ao longo do movimento pelas forças de contato entre o fluido e a superfície da hélice. Tal energia causa a movimentação da estrutura e dá segmento a rotação geral do aerogerador. É

importante ressaltar a questão da transmissividade: a equação de Bernoulli, por se referir a constantes e a conservações de energias, pede uma interpretação por funções de estado. Na prática, entretanto, o fenômeno é contínuo e as variações diferenciais de cada termo causam o movimento resultante.

## **9 Considerações finais**

Neste trabalho procuramos mostrar a importância da Física ao tratar de um tema extremamente importante atualmente que é o da geração de energias renováveis, nomeadamente, a energia eólica. Buscamos com este estudo enfatizar algumas leis e princípios da Física presente no nosso dia a dia e que muitas vezes não são discutidos ou percebidos.

Sabemos que o Sol é nossa principal fonte energia (99% da energia que recebemos chega até a Terra na forma de energia radiante), parte dessa energia é usada para aquecer de forma desigual massas de ar, gerando os ventos que possuem energia cinética de translação. Os aerogeradores transformam uma parte dessa energia cinética do ar em energia cinética de rotação que é transformada por um motor elétrico em energia elétrica.

A geração de energia eólica além de ser uma fonte de energia limpa, renovável, possui uma rica Física envolvida nas diversas transformações de energia desde o Sol até chegar em nossas residências. Além disso, dois princípios podem ser destacados nesse processo: o princípio da conservação da energia e o princípio de Bernoulli.

## REFERÊNCIAS

- ARAUJO, M. C. P. & NONENMACHER, S. **Energia: Um Conceito Presente Nos Livros Didáticos De Física, Biologia E Química Do Ensino Médio**. Revista do programa de pós-graduação em educação–mestrado–universidade do sul de santa Catarina, v.2, n.3. p. [13]. 2009.
- CORRADI, Wagner. **Fundamentos de Física I**. Editora UFMG. Belo Horizonte, p. 580. 2010.
- DIEFENTHAELER, Inés Beatriz. Firpo. **Da Árvore as Painéis no Fogo: Como nos Tornamos Humanos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 2013.
- BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos Fluidos** (Pearson, São Paulo, 2008), 2ª ed.
- GATTI, André. **Energias renováveis na matriz energética: comparação brasil e estados unidos**. Universidade Federal de Santa Catarina, p. 58. 2018.
- GOLDEMBERT, José; LUCON, Oswaldo. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. Editora da Universidade de São Paulo, 3. ed. rev. e amp, 2011.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física**. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, c2009 vol 2;
- HANSEN, Martin, O.L. **Aerodynamics of Wind Turbines** (Earthscan, London, 2008), 2ª ed
- HERNÁNDEZ, García, F. **Análise Experimental e Simulação de Sistemas Híbridos Eólico-Fotovoltaicos**. Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre, 2004.
- LAYTON, Julia. **Como funciona a energia eólica**. Traduzido por HowStuffWorks Brasil.
- MAGALHÃES, Murilo Vill. **Estudo de utilização da energia eólica como fonte geradora de energia no Brasil**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 50. 2009.
- MARTINS, Ellen Beatriz Medeiros. **A geração de energia eólica como fator de desenvolvimento regional – o caso do Município de Lagoa Nova-RN**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Currais Novos, p. 45. 2017.
- MENDONÇA, Renaly Ribeiro. **Energia eólica: Uma tendência nacional**. Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande, p. 30. 2014.
- PICOLO, A. P.; BUHLER, A. J.; RAMPINELLI, G. A. Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [s. l.], v. 36, n. 4, p. 1-13, 3 out. 2014

PINTO, Milton. **Fundamentos de Energia Eólica**. Rio de Janeiro: LTC. 1ª edição, p. 392. 2013.

SEARS, F.; YOUNG, H.D.; ZEMANSKY, M.W. **Física II**. 12.ed., São Paulo: PEARSON, 2008, v.2

SALINO, P. J. **Energia eólica no Brasil: Uma comparação do PROINFA e dos novos leilões**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

VELOSO, Mário Vinicius Virginio; SILVA, Fabrício Marchado. Energia renovável: Desenvolvimento ambiental sustentável. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 14, p. e08111432467-e08111432467, 2022.

VOGT, Hans Heinch. **Análise estrutural das pás de gerador eólico de pequeno porte feitas de fibra vegetal brasileira**. Tese de Mestrado, UECE, Fortaleza, 2010.

ZEBRAL, D. E. da S.; ARÉAS, G. S. de A.; SILVA, J. de A. **Energia Eólica: o uso de energias renováveis nas plataformas de petróleo**. Bolsista de Valor, v. 2, n. 1, p. 55-62, 2012.