

Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica

(An approach to the wind energy as an alternative for teaching topics of classical physics)

Ana Paula Picolo¹, Alexandre J. Bühler¹, Giuliano Arns Rampinelli²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul,
Farroupilha, RS, Brasil

²Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, SC, Brasil

Recebido em 14/5/14; Aceito em 26/6/14; Publicado em 3/10/2014

Este trabalho apresenta um estudo sobre os princípios teóricos básicos envolvidos na energia eólica e sua conversão para energia elétrica. É realizada uma abordagem qualitativa e quantitativa 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, contribuindo para um ensino mais contextualizado e atraente ao estudante.

Palavras-chave: energia renovável, energia eólica, ensino de física.

This work presents a study about the basic theoretical principals involved in the generation of electricity from wind energy. A quantitative and qualitative approach is performed to the wind energy in order to relate the presented contents with several topics studied in classic physics. Wind energy represents an area of knowledge which involves several issues that can be directly used in the physics teaching contributing to a more contextualized and attractive teaching for the student.

Keywords: renewable energy, wind energy, physics teaching.

1. Introdução

O vento consiste no deslocamento de massas de ar, o que trás consigo energia com um grande potencial para ser utilizada na geração de eletricidade. Esse 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. Vários países estipularam metas e definiram programas com a finalidade de criação de um ambiente mais favorável para que as fontes alternativas de energia elétrica pudessem ter uma participação mais efetiva na matriz de geração de energia elétrica reduzindo também a dependência de combustíveis fósseis [1].

No final do ano de 2013, a capacidade eólica mundial atingiu 318 GW e a potência instalada anualmente tem sido, desde 2009, da ordem de 40 GW com variações de 10% de acordo com oscilações da economia mundial [2]. A participação de energias renováveis na matriz de

energia elétrica brasileira é da ordem de 85%, enquanto que a média mundial é da ordem de 20% [3]. A energia hidráulica é a principal responsável por esta participação significativa das energias renováveis na matriz elétrica. A geração hidráulica participou em 2012 com aproximadamente 77% da geração de energia elétrica no Brasil enquanto que em 2011 esta participação havia sido da ordem 82%. Esta situação torna o país dependente de condições climatológicas para geração de energia elétrica. A participação da energia eólica saltou de 0,5% em 2011 para 0,9% em 2012 [3].

A obtenção de energia elétrica a partir do vento possui muitos benefícios sendo que o funcionamento desse sistema envolve diversos conteúdos fundamentais da física. Os princípios básicos para a geração de energia elétrica a partir do vento se relacionam intimamente com grandes temas estudados pela física que pode servir como um auxiliar para o estudo desses conteúdos. 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

²E-mail: giulianorampinelli@gmail.com.

ar.

Este trabalho apresenta um estudo sobre os princípios teóricos básicos envolvidos na energia eólica, que proporcionam uma ampla visão sobre essa forma de geração de eletricidade e que pode ser facilmente compreendida por alunos de ensino médio ou técnico, assim como por professores. Os conceitos abordados neste trabalho possuem relação direta com os conteúdos de física clássica representando uma interessante alternativa para o ensino de diversos tópicos desta disciplina.

2. Formação dos ventos

A energia eólica é uma das formas assumidas pela energia solar. O vento é o movimento do ar em decorrência de um aquecimento irregular da atmosfera pelo Sol [4].

A atmosfera terrestre é aquecida de forma desigual devido fato à radiação solar incidente sobre a superfície terrestre que não se distribui igualmente e aos movimentos de rotação do próprio planeta.

As regiões tropicais recebem os raios solares quase que perpendicularmente e por isso são mais aquecidas do que as regiões polares [5]. Essas porções da atmosfera mais aquecidas tornam-se menos densas e mais leves tendendo a subir em direção às camadas superiores. O espaço deixado pela porção ascendente é logo ocupado por massas de ar menos aquecidas. O deslocamento de massas de ar determina a formação dos ventos. A Fig. 1 mostra esse mecanismo [6].

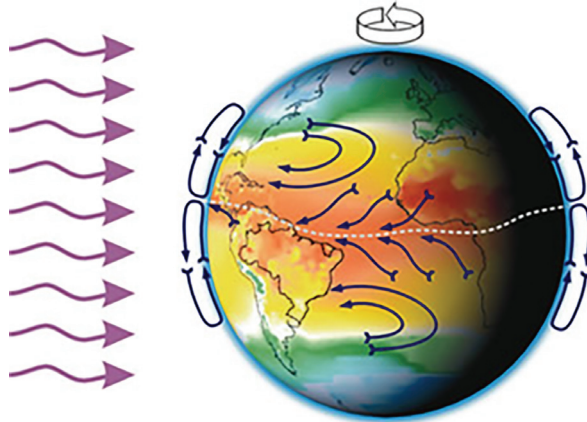


Figura 1 - Mecanismo de formação dos ventos [6].

Esse processo conhecido como convecção térmica onde a energia térmica se transmite mediante o transporte de matéria ocorre também em outros casos como, por exemplo, com as brisas. Durante um dia de sol, o ar se aquece em contato com a superfície terrestre e tende a subir enquanto que na superfície da água de mares ou oceanos esse processo, no mesmo intervalo de tempo, é mais lento devido ao calor específico maior da água. Portanto durante o dia, os ventos sopram da água para o continente. Já durante a noite, a água demora mais para esfriar do que a terra, então ocorre o

processo inverso e o ar atmosférico irá soprar da terra para a água.

O vento é muito variável, tanto geograficamente quanto temporalmente, sendo influenciado por diferentes aspectos, que afetam a sua intensidade, direção e sentido, como por exemplo, as condições do solo e do relevo, a presença de obstáculos, entre outros.

Há muitas regiões climáticas diferentes em todo o mundo, algumas com uma maior presença de vento que outras. Estas diferenças são em grande parte ditadas pela latitude, o que afeta a quantidade de insolação. Dentro de qualquer região climática, há uma grande variação em uma escala menor, determinada pela geografia física - a proporção entre a terra e o mar, o tamanho de massas de terra, e a presença de montanhas ou planícies, por exemplo. O tipo de vegetação pode também ter uma influência significativa através dos seus efeitos sobre a absorção e reflexão da radiação solar, que afeta as temperaturas da superfície [7].

Localmente, a topografia tem um efeito importante sobre o clima do vento. Colinas e montanhas resultam em regiões locais de aumento da velocidade do vento. Isto é, em parte, resultado da altitude, pois geralmente a velocidade do vento aumenta com a elevação acima do solo, e topos de morros e montanhas podem projetar para as camadas mais elevadas a velocidade do vento. É também, em parte, resultado da aceleração do fluxo de vento sobre e ao redor colinas e montanhas, e canalizado através de passagens ou ao longo de vales alinhados com o fluxo [7]. Da mesma forma, a topografia também pode produzir áreas com a velocidade do vento reduzida, como nos vales ou ser diminuída por barreiras como árvores ou edifícios.

O escoamento de ar sobre a superfície terrestre é modelado pelo relevo e pela presença de obstáculos que também produz turbulências no fluxo. A rugosidade da superfície é a propriedade física que descreve a ação da superfície terrestre na redução do momento e na absorção do impacto dos ventos [8].

A perturbação na movimentação de ar será maior conforme a complexidade do relevo e a altura dos seus componentes. Com isso, a velocidade do vento não será uniforme verticalmente desenvolvendo um perfil com valores menores próximos ao solo que vão crescendo na medida em que são consideradas alturas maiores [9].

O comprimento da rugosidade z_0 próximo à superfície terrestre é a altura onde a velocidade é nula. Acima dele, encontra-se a camada limite atmosférica que representa uma região com uma altura variável entre 100 e 3000 m de altura e que sofre as interações superfície-atmosfera. O vento adiante de alguns quilômetros da superfície que, teoricamente, não sofre influência do atrito da superfície, é chamado de vento geostrófico [8]. A Fig. 2 representa o perfil vertical da velocidade do vento desde a superfície até a altura do vento geostrófico.

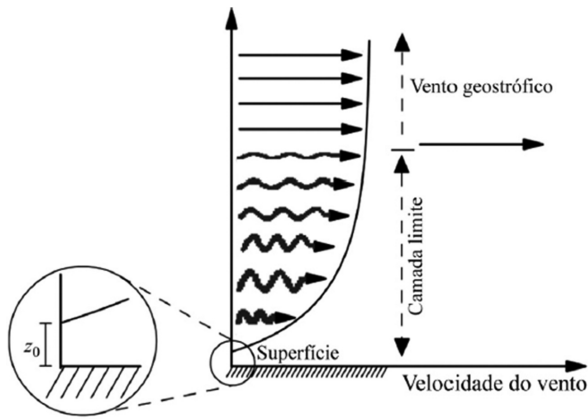


Figura 2 - Perfil vertical da velocidade do vento desde a superfície até a altura do vento geostrófico [8].

Na camada superficial, que é a zona de interesse para as turbinas eólicas, a topografia do terreno e a rugosidade do solo condicionam fortemente o perfil de velocidades do vento, que pode ser representado pela lei logarítmica de Prandtl, apresentada na Eq. (1) [10]

$$v(z) = \frac{v_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), \quad (1)$$

onde a variação da velocidade v com a altura vertical z , é dada em função da velocidade de fricção (v_*), da constante de Von Karmán (k), e do comprimento de rugosidade z_0 .

O comprimento de rugosidade z_0 é definido por uma escala de comprimento utilizada para caracterizar a rugosidade do terreno. Ele deve ser considerado como um parâmetro temporal, pois está diretamente associado às mudanças naturais da paisagem [11]. A Tabela 1 mostra valores característicos para o comprimento característico da rugosidade do solo (z_0).

Tabela 1 - Valores típicos de z_0 [10].

Tipo de terreno	z_0 (m) Min.	z_0 (m) Max.
Lama / gelo	0,00001	0,00003
Mar calmo	0,0002	0,0003
Areia	0,0002	0,001
Neve	0,001	0,006
Campo de cereais	0,001	0,01
Relva baixa / estepes	0,01	0,04
Descampados	0,02	0,03
Relva alta	0,04	0,1
Terreno com árvores	0,1	0,3
Floresta	0,1	1
Povoação dos subúrbios	1	2
Centro da cidade	1	4

3. Energia eólica para geração de eletricidade

A energia contida no vento pode ser utilizada para a geração de eletricidade. Um sistema eólico pode ser utilizado em sistemas isolados, sistemas híbridos ou sistemas interligados à rede elétrica. Os sistemas híbridos apresentam a utilização de mais de uma fonte associadas para a geração de energia elétrica como, por exemplo, turbinas eólicas e módulos fotovoltaicos, geradores a diesel, entre outras. Os sistemas isolados são de pequeno porte utilizado para abastecer certas regiões, nas áreas rurais, em fazendas ou residências. Os sistemas interligados à rede, como nos parques eólicos, correspondem a sistemas onde toda a geração é entregue diretamente à rede elétrica [5].

Além disso, os geradores de energia eólica podem ser posicionados no mar onde são chamados de *offshore*. O dispositivo destinado à obtenção de energia elétrica a partir do vento é chamado de aerogerador. De acordo com aspectos relacionados ao projeto de construção, os aerogeradores podem ser classificados de acordo com a posição do eixo de rotação do rotor do vento. A Fig. 3 mostra os dispositivos eólicos que têm um eixo de rotação vertical e os com eixo horizontal de rotação [12].

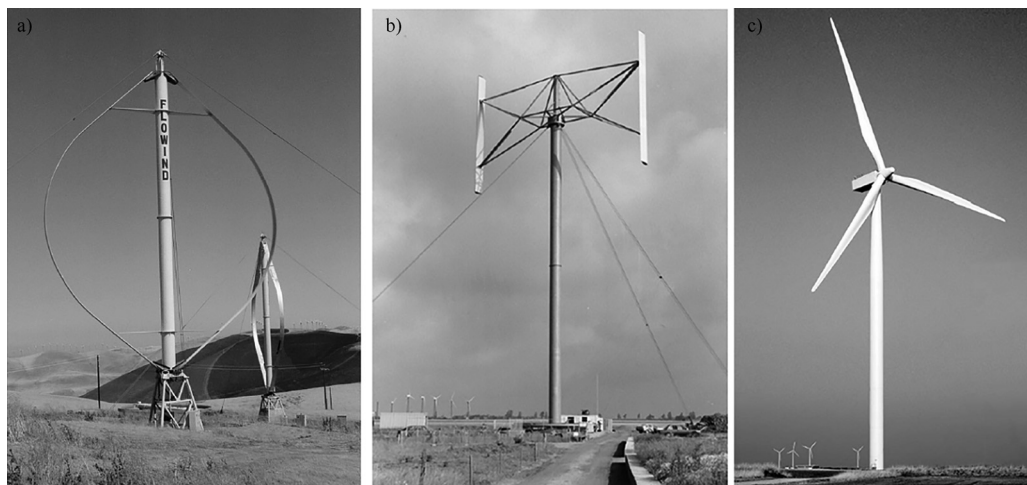


Figura 3 - Aerogeradores classificados de acordo com o eixo de rotação: (a) eixo de rotação vertical e (b) horizontal [12].

Conversores de energia eólica que têm os seus eixos de rotação na posição horizontal correspondem ao princípio de design dominante na tecnologia de energia eólica atualmente [12]. Na Fig. 4 são representados os principais componentes deste equipamento.

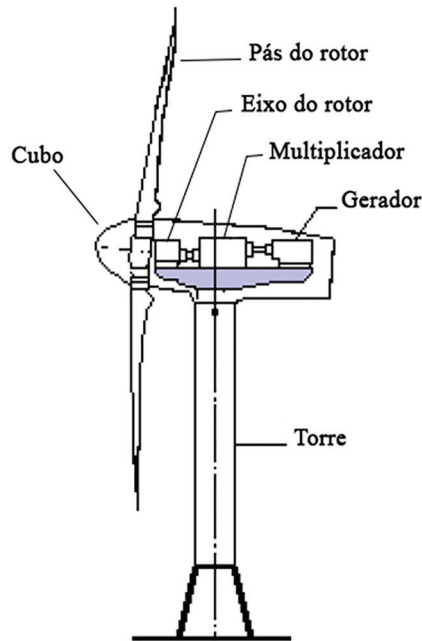


Figura 4 - Componentes principais de um aerogerador [9].

As vantagens deste projeto se devem ao fato de que utilizando modelos de hélice, a velocidade do rotor e a potência de saída podem ser controladas pelo sistema de lâminas do rotor sobre o seu eixo longitudinal (controle de inclinação das pás). Além disso, a forma da pá do rotor pode ser otimizada aerodinamicamente para

obtenção de maior eficiência [12].

As pás do rotor, idealmente, devem possuir um baixo peso, alta resistência e uma boa aerodinâmica [13]. Esses componentes estão fixados no cubo que transmite as forças aerodinâmicas que incidem nas pás na forma de torque para eixo do rotor [14].

A grande maioria das turbinas em operação é constituída por três pás. A energia capturada ao vento é cerca de 3 a 5% maior quando se passa de duas para três pás, mas esta percentagem diminui à medida que se aumenta o número de pás [10]. Esse fato se deve a maior estabilidade e aerodinâmica proporcionada pelo design composto por três pás.

A caixa multiplicadora é utilizada quando se necessita aumentar a frequência produzida, para ser transmitida ao gerador elétrico. O gerador elétrico transforma a energia mecânica em energia elétrica. A torre é necessária para elevar os demais componentes do aerogerador até uma altura suficiente para obtenção do vento com maior potencial. As torres modernas podem ter dezenas de metros de altura. A estrutura tem que suportar cargas significativas e resistir a uma exposição constante as condições naturais do local ao longo de toda a sua vida útil que é estimada em cerca de vinte anos [10].

3.1. Transformações de energia

De acordo com o princípio de conservação de energia, considerando algumas perdas entre os processos, basicamente um aerogerador converte energia a partir de dois processos. Inicialmente a energia cinética do vento é transformada em energia mecânica e posteriormente em energia elétrica que será distribuída para rede elétrica. Esses processos estão demonstrados na Fig. 5.

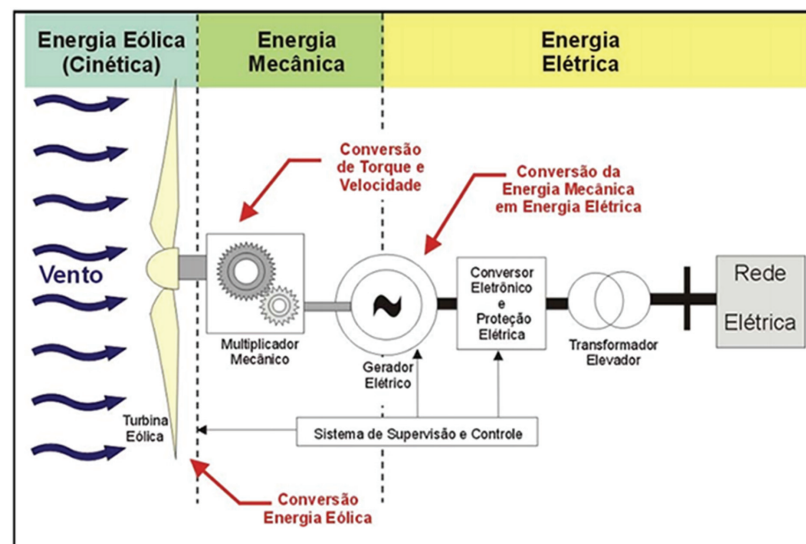


Figura 5 - Esquema geral de funcionamento de um aerogerador [15].

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. Dependendo da tecnologia utilizada pelo aerogerador, o multiplicador mecânico e o conversor eletrônico não são necessários.

3.2. Transmissão e caixa multiplicadora

A transmissão, que engloba a caixa multiplicadora, possui a finalidade de transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até o gerador. A caixa multiplicadora tem a finalidade de realizar a adaptação entre a baixa frequência do rotor e a elevada frequência do gerador. A frequência do rotor está entre, aproximadamente, 20 e 150 rpm enquanto que a frequência dos geradores está situada entre, aproximadamente, 1000 rpm e 3000 rpm. Portanto, uma caixa de frequências (multiplicador) é geralmente colocada, nesses casos, entre o eixo do rotor e o eixo do gerador [16]

A caixa multiplicadora é composta por eixos, mancais, engrenagens de transmissão e acoplamentos. A Fig. 6 apresenta um sistema simplificado de associação de polias de diâmetros diferentes. A caixa multiplicadora, como descrita, é um sistema de maior complexidade, entretanto a simplicidade do sistema da Fig. 6 ilustra a relação existente de frequência entre engrenagens de diferentes diâmetros.

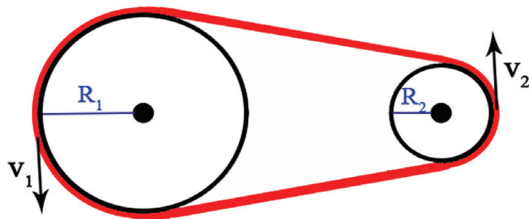


Figura 6 - Esquema de duas polias ligadas por corrente.

Através da combinação de engrenagens de características diferentes, é possível transmitir movimentos e ampliar ou reduzir forças. Para esse tipo de acoplamento, a velocidade linear v nos pontos indicados na Fig. 6, em contato com a correia ou polia, tem o mesmo valor, conforme Eq. (2). A velocidade linear está diretamente relacionada com a velocidade angular, conforme a Eq. (3). Combinando a Eq. (2) e a Eq. (3), pode-se encontrar a Eq. (4). Sabendo que a velocidade angular pode ser escrita como função da frequência f , obtém-se a Eq. (5). E por fim pode-se obter a relação entre as frequências e os raios, conforme Eq. (6).

$$v_1 = v_2, \quad (2)$$

$$v = \omega \cdot R, \quad (3)$$

$$\omega_1 \cdot R_1 = \omega_2 \cdot R_2, \quad (4)$$

$$2\pi \cdot f_1 \cdot R_1 = 2\pi \cdot f_2 \cdot R_2, \quad (5)$$

$$f_1 \cdot R_1 = f_2 \cdot R_2, \quad (6)$$

onde ω é a velocidade angular; R é o raio da polia e f a frequência da polia.

Baseando-se na Eq. (6), conclui-se que para que haja um aumento da frequência da polia e consequentemente da velocidade angular, é necessário que a polia movida, aquela que fornece o movimento, tenha um raio maior do que a polia motora que recebe o movimento. As engrenagens, quando acopladas por uma corrente, giram no mesmo sentido e enquanto que se estiver em contato direto, giram em sentidos opostos. Como pode ser observado na Fig. 7.

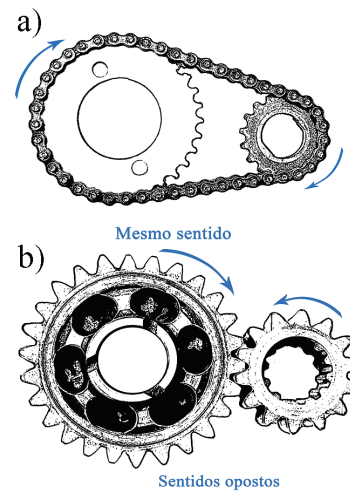


Figura 7 - Engrenagens acopladas por corrente (a) e em contato direto (b).

Nos aerogeradores, esse princípio é utilizado em grande escala, produzindo engrenagens de vários tamanhos e formatos de acordo com a potência desejada, como mostrado na Fig. 8.

3.3. Gerador

O princípio básico de funcionamento 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 à 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 através da espira varie com o tempo e então é produzida uma força eletromotriz induzida fem (ε). Assim, a força eletromotriz resulta do movimento relativo que há entre a espira e o campo magnético. A Fig. 9 representa o princípio básico desse equipamento.

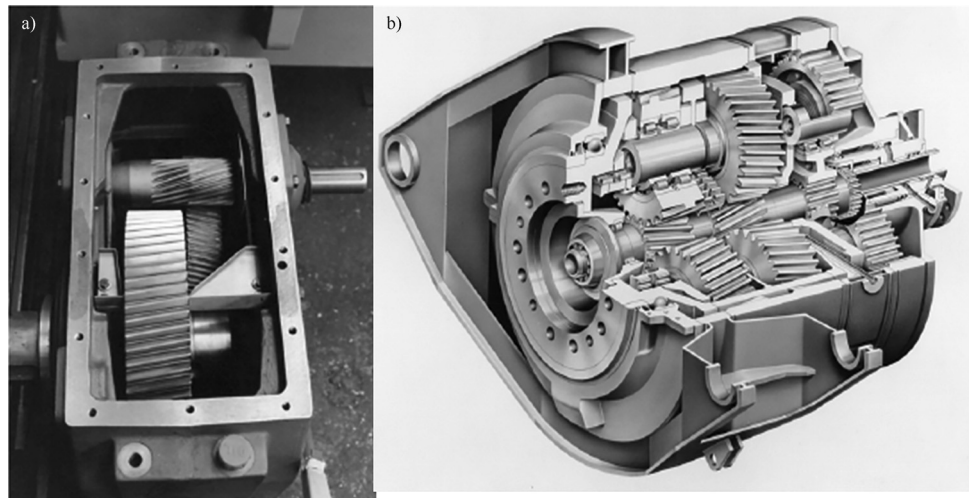


Figura 8 - (a) Caixa multiplicadora de duas fases para aerogeradores de eixo paralelo da classe de potência de 200 a 500 kW (b) caixa multiplicadora planetária de três estágios da classe de potência 2 a 3 MW [12].

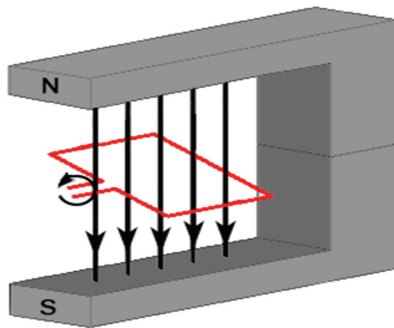


Figura 9 - Princípio básico de um gerador elétrico.

O fluxo magnético (Φ) representa o produto entre a indução magnética, a área da superfície plana e o cosseno do ângulo formado, como apresentado na Eq. (7).

$$\Phi = B.A.\cos\theta, \quad (7)$$

onde B é a intensidade do campo magnético; A é a área da espira; e θ é o ângulo formado entre o condutor e as linhas de fluxo magnético.

Dependendo da posição da espira, a intensidade da corrente varia assim como o sentido da corrente se inverte o que dá origem a corrente alternada.

Analisando a Eq. (7) pode-se concluir que o fluxo magnético será máximo quando o cosseno do ângulo foi 0° e a espira estiver na posição horizontal, onde as linhas do campo magnético não a cruzam, e será mínimo quando o cosseno do ângulo for 90° como no caso da espira estiver na vertical, onde as linhas de campo atravessam toda a sua área. Supondo que o fluxo magnético através de um circuito fechado tenha sofrido uma variação $\Delta\varphi$ em um intervalo de tempo isso provocará nesse circuito uma corrente induzida. Conclui-se então que no circuito foi estabelecida uma *fem* responsável

pele aparecimento da corrente que é denominada *fem* induzida.

A *fem* induzida é diretamente proporcional a taxa de variação do fluxo, então para aumentar o seu “pico” é necessário aumentar essa variação. Isso será possível aumentando a velocidade de rotação da espira. 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 Δt o fluxo magnético $\Delta\varphi$ varia e dessa forma a *fem* (ε) é dada pela razão entre variação do fluxo magnético e a variação do tempo, conforme Eq. (8).

$$\varepsilon = \frac{\Delta\varphi}{\Delta}t. \quad (8)$$

A magnitude da corrente induzida na espira depende da velocidade relativa entre o campo magnético e esse condutor. A partir disso podemos concluir que a potência produzida pelo aerogerador depende, além de outros fatores, da rotação dessa espira. O aumento da rotação produz um aumento da potência, mas só até certo ponto. Ocorre que se a rotação for muito intensa há uma dificuldade da passagem do vento através da turbina o que implica que mesmo aumentando a rotação, a potência diminui depois de certa velocidade [9].

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 da Fig. 10 [16]. A Fig. 10 representa a curva característica do gerador elétrico para diferentes frequências e curvas características da turbina eólica

em diferentes velocidades de vento, válida para algumas topologias de aerogeradores.

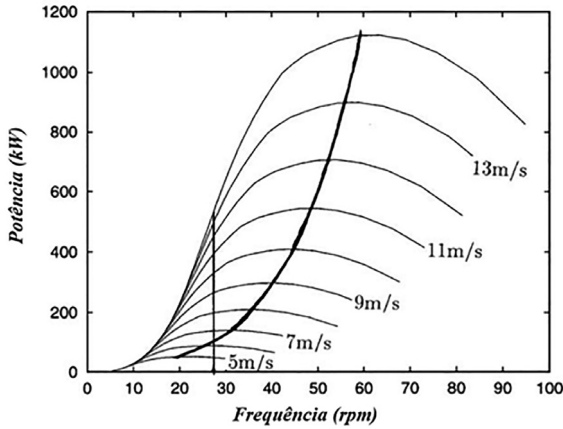


Figura 10 - Curva característica do gerador elétrico para diferentes rotações e curvas características do aerogerador em diferentes velocidades do vento [16].

4. Energia e potência extraída do vento

A energia eólica utilizada para geração de energia elétrica é a energia cinética E do vento que se desloca com certa velocidade v que é dada pela Eq. (9).

$$E = \frac{1}{2}mv^2, \quad (9)$$

onde m é a massa da coluna de vento.

Considere uma geometria G constituída por um cilindro de área transversal A e comprimento d , conforme Fig. 11

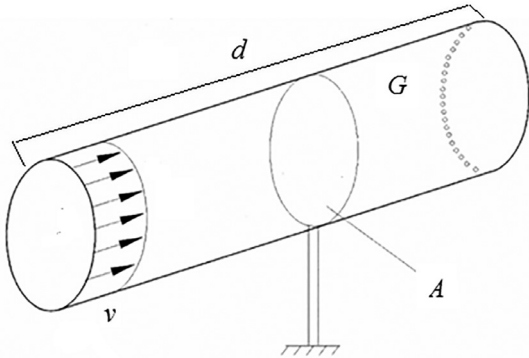


Figura 11 - Geometria G atravessada por um fluido com velocidade v .

O volume V da geometria G é o produto entre a área transversal A e o comprimento d . Considerando que esta geometria está sendo atravessada por um fluido com velocidade v , o volume de fluido que atravessa o mesmo é dado pelo produto entre a área transversal A , a velocidade v do fluido e o tempo t (Eq. (10)).

$$V = A \cdot d = A \cdot v \cdot t. \quad (10)$$

A vazão Q do fluido é a taxa de variação temporal do volume V de fluido que atravessa a geometria G de área transversal A e comprimento d é dada pela Eq. (11).

$$Q = \frac{dV}{dt} = A \cdot v. \quad (11)$$

Em um regime de escoamento permanente e incompressível, o fluxo de massa que atravessa a geometria G pode ser determinado pela Eq. (12).

$$\phi_m = \frac{dm}{dt} = \rho \cdot v \cdot A, \quad (12)$$

onde ϕ_m é o fluxo de massa; ρ é a massa específica do ar.

A energia cinética E pode ser reescrita a partir da Eq. (13).

$$E = \frac{1}{2} \rho \cdot V \cdot v^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v \cdot t \cdot v^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot t. \quad (13)$$

A potência é a taxa de variação temporal da energia e, portanto, derivando a Eq. (13) em relação ao tempo, pode-se determinar a potência eólica P disponível no vento que passa por uma seção transversal de área A (Eq. (14)).

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3, \quad (14)$$

onde P é a potência do vento; A é a área varrida pelas pás do aerogerador em movimento e v é a velocidade do vento.

A partir da Eq. (14) 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 da velocidade do vento. Se essa grandeza duplicar, isso gerará um aumento de oito vezes na potência. Por isso, para a utilização da energia eólica é necessário que haja um fluxo constante e razoavelmente forte de vento.

A potência disponível no vento, porém, não pode ser totalmente aproveitada pela turbina eólica para a geração de eletricidade. Em 1919, o físico alemão Albert Betz demonstrou cientificamente que a eficácia dos conversores eólicos na extração da energia do fluxo de ar está limitada [17]. A questão é a quantidade de energia mecânica que pode ser extraída da corrente de ar livre de fluxo por um conversor de energia. Como a energia mecânica só pode ser extraída com o custo da energia cinética contida no vento, o que significa que, com um fluxo de massa inalterada, a velocidade de escoamento por trás do conversor de energia eólica deve diminuir. Reduzir a velocidade, no entanto, significa ao mesmo

tempo um aumento da secção transversal, enquanto que o mesmo fluxo de massa deve passar através dele. Assim, é necessário considerar as condições à frente e atrás do conversor [12].

A massa de ar que passa pelo rotor forma um tubo circular de corrente, entre o ar anterior e o posterior ao rotor do aerogerador. A corrente de ar antes da passagem pelo disco do rotor forma um tubo com diâmetro menor que o disco do rotor e a posterior, um tubo com diâmetro maior que o disco [14]. Esse princípio está demonstrado na Fig. 12, considerando que v_1 é a velocidade antes de passar pela turbina eólica e v_2 é a velocidade após a passagem.

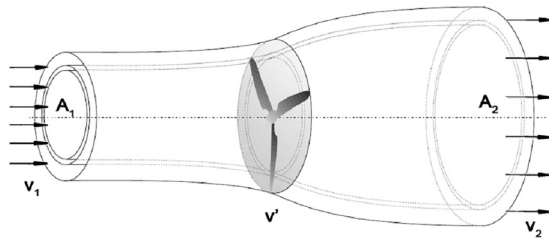


Figura 12 - Tubo imaginário circular de corrente do ar anterior e posterior ao rotor.

A energia mecânica extraída da corrente de ar corresponde à diferença de potência do fluxo de ar antes e depois do conversor.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_1 \cdot v_1^3 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_2 \cdot v_2^3, \quad (15)$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (A_1 \cdot v_1^3 - A_2 \cdot v_2^3). \quad (16)$$

Considerando um escoamento em regime permanente e incompressível, de acordo com a equação da continuidade, para manter o mesmo fluxo de massa deve haver uma mudança na velocidade v .

$$\rho \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho \cdot v_2 \cdot A_2. \quad (17)$$

Com isso encontra-se a Eq. (18).

$$P = \frac{1}{2} \rho v_1 A_1 (v_1^2 - v_2^2). \quad (18)$$

A partir da Eq. (18) podemos constatar que se v_2 for igual a zero, a potência seria máxima, ou seja, todo o ar é retido pelo aerogerador. No entanto, este resultado não faz sentido fisicamente. Se a velocidade de v_2 escoamento por trás do conversor for zero, então a velocidade de entrada v_1 deve também tornar-se zero, o que implica que não haveria mais o fluxo através do conversor. Então o resultado fisicamente significativo consiste em uma determinada relação numérica de v_2/v_1 onde o poder extraível atinge o seu máximo [12].

Sabe-se que a velocidade referente ao máximo de potência extraída é um valor entre v_1 e v_2 . Este valor pode ser calculado se a velocidade no rotor v' for conhecida. Assim, a velocidade de fluxo através do conversor é igual à média aritmética das v_1 e v_2 .

$$v' = \frac{v_1 + v_2}{2}. \quad (19)$$

Se a velocidade v' apresentada na Eq. (17) for inserida na Eq. (18), tem-se

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_2}{v_1} \right] \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \right\}. \quad (20)$$

Na Eq. (20), o termo entre colchetes é chamado coeficiente de potência c_p , é a relação entre a potência mecânica extraída pelo conversor e a da corrente de ar não perturbado. O coeficiente de potência e a potência extraída da corrente de ar só dependem da relação entre as velocidades do ar antes e depois de passar pelo rotor. Esse coeficiente de potência atinge o valor máximo quando a relação entre as velocidade v_2/v_1 for igual a $1/3$. Betz foi o primeiro a obter este resultado e por causa disso é muitas vezes chamado de "Fator Betz" [12].

$$c_{p\text{máx}} = \frac{16}{27} = 0,593. \quad (21)$$

4.1. Distribuição de Weibull

Estudos estatísticos de séries de velocidades do vento de vários anos mostraram que a probabilidade de ocorrência das velocidades segue comportamentos típicos, que podem ser representados por expressões analíticas. A mais usada é a função de probabilidade de Weibull [9].

A Fig. 13 mostra a comparação entre os valores reais medidos e os valores obtidos com a distribuição analítica para uma determinada localidade.

Percebe-se que esse método se aproxima muito das condições reais. A partir disso pode-se obter a estimativa das condições do vento com grande precisão o que pode ser usado para a escolha do lugar adequado para o posicionamento dos aerogeradores e o correto dimensionamento dos mesmos.

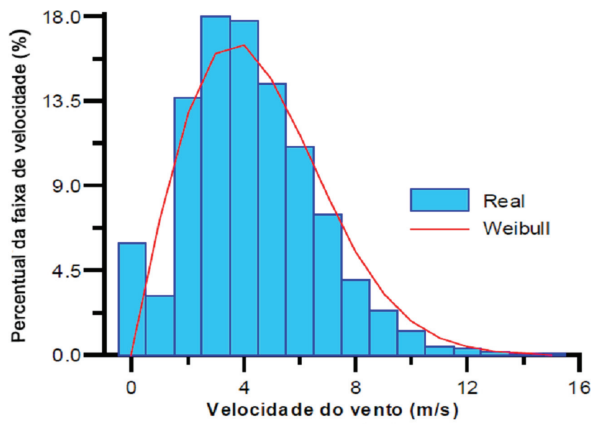


Figura 13 - Distribuição de probabilidade de ocorrência das velocidades do vento real e estimada [9].

5. Aerodinâmica

O ar é um fluido que pode ser caracterizado como uma substância compressível e capaz de escoar. 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 [18]:

- 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 Fig. 14 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

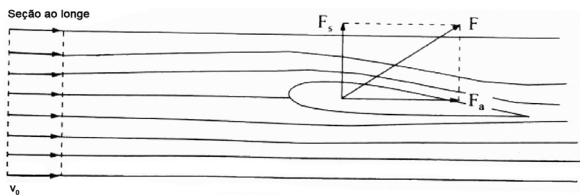


Figura 14 - Forças atuantes em um corpo atravessado por um fluido [18].

5.1. Força de sustentação

A força de sustentação pode estar presente em qualquer objeto, entretanto o corpo destinado a provocar proposadamente essa força é o aerofólio ou perfil de asa ou turbina eólica. A explicação para o aparecimento da força de sustentação pode ser explicado de várias formas [19]. Há uma descrição aerodinâmica da sustentação, usada por engenheiros. Esta abordagem

apresenta uma matemática complexa combinada com simulações computacionais para calcular e determinar a força de sustentação em um perfil de asa [19].

Uma segunda descrição é baseada na equação de Bernoulli sendo de fácil entendimento e usada na maioria dos manuais de treinamento de voo para explicar a sustentação de uma asa. 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 [18].

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. Com isso a velocidade das partículas na parte superior será maior do que na inferior o que gera uma diferença de pressão no aerofólio. O resultado é uma força direcionada para cima chamada de força de sustentação F_S . A diferença de pressão nas diferentes partes da asa é que gera a força de sustentação. Quanto maior a velocidade do ar em relação à asa, maior a diferença de pressão em cima e embaixo e maior a força de sustentação. Quanto maior a velocidade de um fluido por uma superfície, menor é a pressão que ele exerce. Por causa disso a pressão do ar embaixo é maior do que em cima.

Essa relação entre velocidade e pressão em um fluido pode ser explicada pela equação de Bernoulli, descrita pelo italiano Daniel Bernoulli (1700-1782), juntamente com o suíço Leonhard Euler (1707-1783) que estuda o comportamento de um fluido que se move ao longo de um tubo [14]. Sua principal desvantagem é o fato de estar baseada no princípio dos *tempos de trânsito iguais*, ou ao menos na hipótese de que uma vez que o ar tem um caminho maior para percorrer por cima da asa, ele tem que fazê-lo mais rapidamente. Esta abordagem é focada no formato da asa e impede que se entendam vários fenômenos importantes como o voo invertido, a potência, o efeito-solo e a dependência da sustentação com o ângulo de ataque da asa. [19-20]. Embora esta explicação ainda seja muito comum em diversos textos científicos e didáticos, atualmente ela é reconhecidamente incorreta ou no mínimo, incompleta.

A terceira maneira de descrever a sustentação é chamada de descrição física e atualmente é a abordagem aceita para a explicação do surgimento da força de sustentação. Ela é baseada essencialmente nas três leis de Newton e em um fenômeno chamado de efeito Coanda [19].

A primeira lei de Newton, conhecida como lei da inércia, afirma que um corpo, na ausência de força externa atuando sobre ele, mantém seu estado de movimento (repouso ou movimento retilíneo uniforme). Se

o escoamento de um fluido por um perfil de asa ou turbina eólica se curvar, pode-se afirmar que há uma força atuando sobre o perfil ou turbina. A terceira lei de Newton afirma que para cada força de ação há uma força de reação igual em magnitude, mas no sentido contrário. A fim de criar sustentação, o perfil de asa da turbina eólica, por exemplo, precisa interagir com o ar em movimento (vento). A força exercida pela turbina eólica sobre o ar em movimento é a força de ação, enquanto a força de sustentação representa a força de reação do vento sobre o rotor da turbina eólica. A Fig. 15 compara duas situações sobre um perfil de asa.

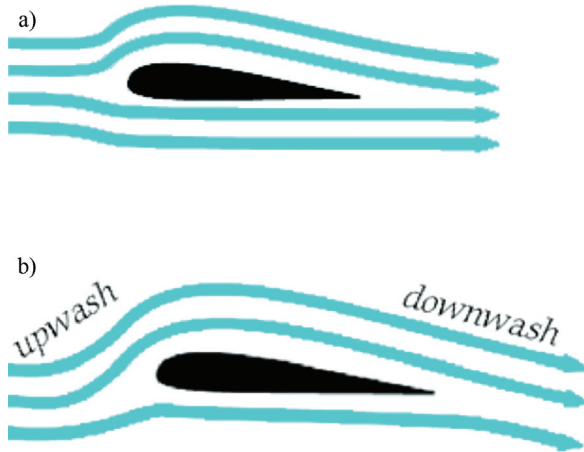


Figura 15 - Escoamento de fluido de ar em um perfil de asa [19].

Na Fig. 15a pode-se observar que o ar vem direto em direção à asa, a contorna e sai direto pela parte de trás da mesma. Porém o ar atrás que sai da asa está exatamente igual a quando ele estava na frente da asa. Não há uma força de ação sobre o ar e, portanto não pode haver força de sustentação [19-20].

Na Fig. 15b, o ar passa pela asa e é encurvado para baixo. A primeira lei de Newton diz que deve haver uma força sobre o ar para encurvá-lo (força de ação). A terceira lei de Newton diz que deve haver uma força igual, mas em sentido contrário (para cima) sobre a asa (força de reação). Para poder criar uma sustentação, a asa precisa desviar uma grande quantidade de ar em movimento [19-20].

A sustentação de um perfil de asa ou turbina eólica é igual à taxa de variação temporal do momento do ar em movimento que ela está curvando. Para conseguir uma força de sustentação maior, o perfil de asa da turbina eólica ou tem que deslocar (curvar) mais ar ou aumentar a velocidade vertical. A componente vertical da velocidade do ar atrás do perfil de asa é a componente vertical do *downwash*. Quanto maior o ângulo de ataque do perfil de asa maior a velocidade vertical do ar. Do mesmo modo, para um ângulo de ataque fixo, quando maior a velocidade do ar em movimento, ou seja, quanto maior a velocidade de vento maior a velocidade vertical do ar. Tanto o aumento do ângulo

de ataque quanto o aumento da velocidade de vento fazem aumentar a magnitude da componente vertical para baixo da velocidade. É esta velocidade vertical que dá ao perfil de asa da turbina eólica sua sustentação. Por fim, a força de sustentação F_S é representada pela Eq. (22). Com essa equação pode-se notar a grande dependência dessa força com a velocidade.

$$F_S = \frac{1}{2} \cdot C_S \cdot \rho \cdot A \cdot v^2, \quad (22)$$

onde C_S é um parâmetro determinado experimentalmente conhecido como coeficiente de sustentação, ρ é a massa específica do ar, A é a área de referência.

5.2. 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 [20]. A força de arrasto é dada pela Eq (23)

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot A \cdot v^2. \quad (23)$$

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 [18].

Além disso, o sólido fica, na sua parte dianteira, sujeito a pressões maiores que na sua parte traseira tendo como resultante das pressões uma força no sentido do escoamento é a força de arrasto de forma ou de pressão [18].

A Fig. 16 mostra o escoamento em torno de um cilindro e a sua ampliação na região próxima onde ocorre o descolamento e a velocidade é maior.

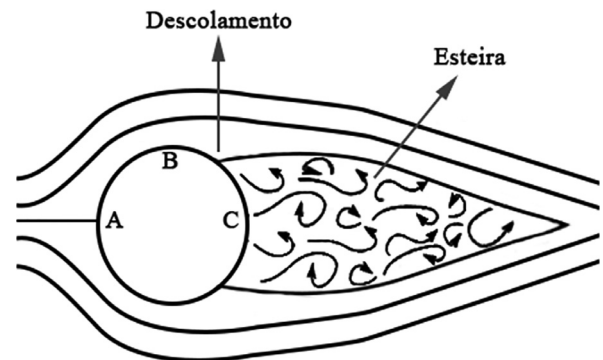


Figura 16 - Escoamento em torno de uma esfera.

Considerando o decorrer de um escoamento não viscoso em torno de uma esfera apresentado na Fig. 16,

observa-se que há um ponto de estagnação, onde a velocidade é zero, tanto na frente como por trás da esfera (pontos A e C). Para esses pontos a equação de Bernoulli prevê uma pressão máxima. No ponto B, haverá uma velocidade máxima e, portanto, uma pressão mínima. Próximo da superfície da esfera existe uma fina camada limite na qual a velocidade do fluxo é reduzida para zero. Este fluido lento perto do limite não tem uma quantidade suficiente de movimento para chegar à região de alta pressão perto C, o resultado é que o fluido se separa do limite e se cria uma região separada uma região de fluxo de recirculação. A alta pressão existente perto do ponto de estagnação na frente nunca é recuperada na parte de trás da esfera e o resultado é uma força retardadora relativamente grande na direção do fluxo [21].

Na parte de trás do corpo, onde ocorre esse descolamento, o escoamento caracteriza-se por uma região com redemoinhos chamada de esteira, um fenômeno que é muitas vezes indesejável. Por exemplo, nas pás de uma turbina os fluxos separados podem reduzir a eficiência.

Como a força de arrasto resiste ao movimento relativo, no caso dos aerogeradores é necessário reduzir o seu valor ao máximo possível. Para isso, são usados corpos de formato alargados. Esses corpos permitem que a camada limite e as trajetórias das partículas os contornem com facilidade, não causando acelerações muito bruscas que criariam uma grande variação de pressões e consequentemente um grande descolamento. Ao alongar suavemente os corpos, a força de arrasto será relativamente baixa, pois o deslocamento acontecerá na traseira numa área pequena. O alongamento do corpo causa, porém, um acréscimo do arrasto de superfície e, portanto, a melhor forma aerodinâmica é aquela que causa a menor soma dos dois efeitos, o de forma e o de superfície [18].

Contrariamente aos corpos aerodinâmicos, têm-se os corpos abruptos que oferecem grande resistência ao avanço. A Fig. 17 mostra a representação de um corpo abrupto e de um aerofólio.

Os coeficientes de sustentação e de arraste são resultado de medidas empíricas realizadas em túneis de vento. Cada ângulo de ataque (α) específico resulta em valores específicos de coeficientes de sustentação e de arraste [14]. O ângulo de ataque α é definido como o ângulo entre a linha que une os bordos de entrada e de saída do aerofólio (linha de corda) e a velocidade relativa [10].

A Fig. 18 mostra as forças aerodinâmicas que atuam sobre um aerofólio exposto a uma corrente de ar.

5.3. Escoamento laminar e turbulento

As partículas de um fluido em movimento podem escoar de maneira a apresentarem trajetórias bem definidas ou

não.

A estrutura do escoamento laminar é caracterizada pelo movimento suave em lâminas ou camadas, onde não há mistura macroscópica de camadas próximas ao fluido. Já o regime turbulento é caracterizado por movimentos tridimensionais aleatórios de partículas, em acréscimo a um movimento médio, comportamento que é causado pelas flutuações de velocidade [22].

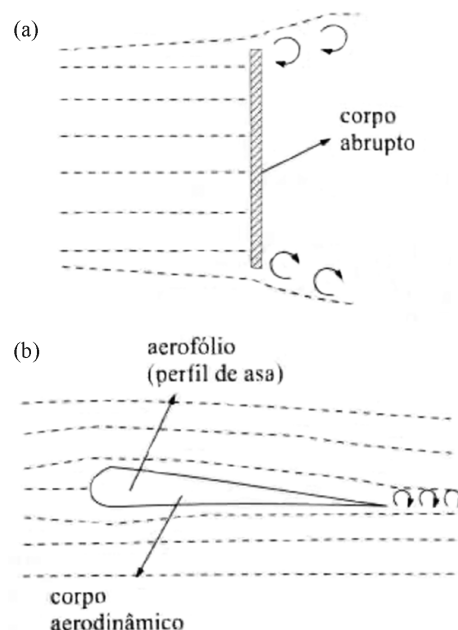


Figura 17 - Representação de um corpo abrupto (a) e de um aerofólio (b) [18].

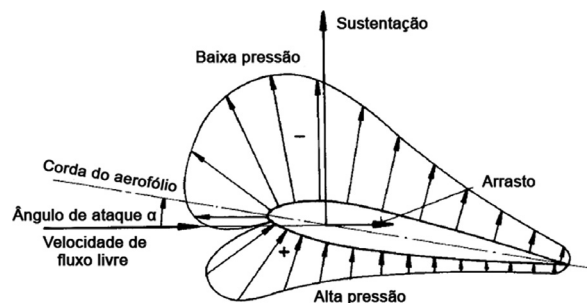


Figura 18 - Forças aerodinâmicas que atuam sobre um aerofólio exposto a uma corrente de ar [12].

Como exemplo de escoamento laminar pode-se citar a água escoando de uma torneira, formando uma linha contínua ou um filamento de fumaça de cigarro em um ambiente tranquilo. Já o escoamento turbulento pode-se citar a fumaça do cigarro quando começa a subir tornando instável formando movimentos aleatórios

A Fig. 19 mostra a diferença entre o escoamento laminar e o escoamento turbulento.

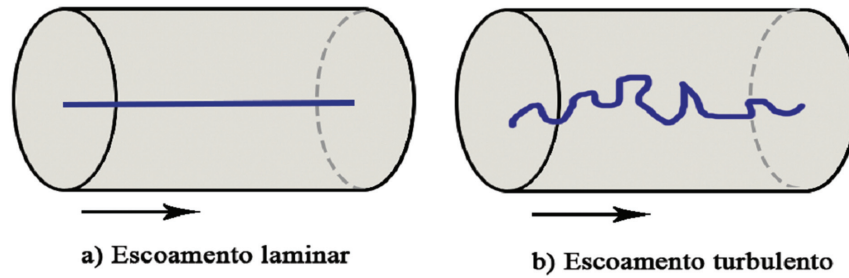


Figura 19 - Esquema de fluxos a) laminar e b) turbulento.

Osborne Reynolds, um físico e engenheiro irlandês, verificou que o fato de o fluido ser laminar ou turbulento depende do valor de um número adimensional (Re), conhecido como número de Reynolds, dado pela Eq. (24).

$$Re = \frac{\rho v D}{\eta}, \quad (24)$$

onde ρ é a massa específica do fluido; v é a velocidade do fluido; D é o diâmetro do tubo; e η é o coeficiente de viscosidade.

Número de Reynolds muito baixo indica um movimento viscoso lento, quando os efeitos da inércia são desprezíveis. Número de Reynolds moderado caracteriza um escoamento com variação suave. Número de Reynolds alto indica escoamento turbulento, que pode variar lentamente no tempo [23].

Isso se estabelece com mais precisão definindo um número de Reynolds crítico de maneira em que o fluxo é laminar se $Re < Re_{crit}$. Por exemplo, o fluxo no interior de um tubo com parede áspera se encontrou que $Re_{crit} = 2000$, este é o número crítico mínimo utilizado na maioria das aplicações em engenharia. Entretanto, o número de Reynolds é diferente para cada geometria [21]. Devido ao fato de ser influenciado por diversos fatores, o vento na altura onde é utilizado para a obtenção nos geradores eólicos, caracteriza-se como sendo turbulento. A Fig. 20 representa o efeito da distribuição de velocidade do vento irregular ao longo da área varrida do rotor na velocidade de fluxo ascendente das pás rotativas do rotor.

No ambiente aberto, a velocidade do vento e a turbulência são sempre distribuídas de forma desigual no espaço sobre a área varrida pelas pás do rotor. Muitas rajadas de vento golpeiam o rotor não como um todo, mas apenas em um dos lados ou apenas parcialmente. Este fato é significativo para a resposta da estrutura que diz respeito ao rotor em rotação. As pás do rotor “batem” nas rajadas, e a velocidade de vento local muda, na sua velocidade tangencial. Um observador que viaje com a pá de rotor experimenta estas mudanças de velocidade consideravelmente mais forte do que o que seria no estado estacionário. Além disso, dependendo da duração da rajada e da velocidade do rotor, a pá

do rotor pode encontrar a mesma rajada por diversas vezes [12].

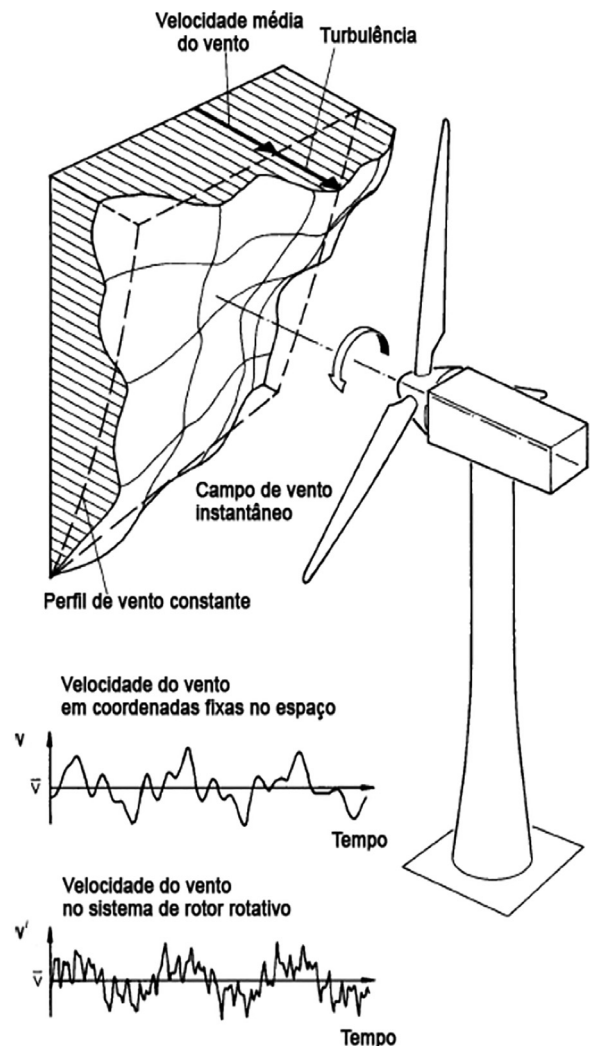


Figura 20 - Efeito de uma distribuição de velocidade do vento irregular ao longo da área varrida do rotor na velocidade de fluxo ascendente das pás rotativas do rotor [12].

6. Conclusão

Neste trabalho foram apresentados os princípios básicos relacionados à energia eólica de forma simples e objetiva sendo acessível a alunos e professores.

É preciso disseminar o conteúdo referente a energia eólica já que está 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 como as utilizadas em usinas termelétricas.

A disciplina de física aborda muitas situações que envolvem a geração de eletricidade e pode abrir uma porta para inserir conteúdos relevantes ao sistema de ensino e muito presentes no contexto atual aliando, assim, os conhecimentos dos fenômenos físicos com a reflexão sobre a preservação do meio ambiente.

Além disso, a utilização desse conteúdo em sala de aula pode funcionar como um estímulo em relação ao estudo da física e a áreas relacionadas. Agregar esse pensamento aos futuros profissionais que irão atuar no mercado de trabalho e serão responsáveis pela conservação de um ambiente propício as gerações que se seguem.

Referências

- [1] G.A. Rampinelli e C.G. Rosa Junior, Revista Ciências Exatas e Naturais **14**, 273 (2012).
- [2] Global Wind Energy Council, *Global Wind Report – Annual Market Update* (Global Wind Energy Council, Brussels, 2014).
- [3] Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), *Balanco Energético Nacional 2013 – Ano Base 2012: Relatório Síntese* (EPE, Rio de Janeiro, 2013).
- [4] E.G.C. Neves, R.C.F. Damé, C.F.A. Teixeira e R. Münchow, *Introdução ao Estudo de Energia Eólica. Caderno Didático* (Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2009).
- [5] R.M. Dutra, *Energia Eólica: Princípios e Tecnologias* (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, Rio de Janeiro, 2008). Disponível em http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf.
- [6] O.A.C. Amarante, M. Brower, J. Zack e A.L. Sá, *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro* (Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2001). Disponível em http://www.cresesb.cepel.br/atlas_eolico_brasil/atlas-web.htm. Acesso em 10/11/2012.
- [7] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins and E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook* (John Wiley & Sons, Ltd, England, 2001).
- [8] F.R. Martins, R.A. Guarnieri e E.B. Pereira, Revista Brasileira de Ensino de Física **30**, 1304 (2008).
- [9] F. Hernández García, *Análise Experimental e Simulação de Sistemas Híbridos Eólico-Fotovoltaicos*. Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre, 2004.
- [10] R.M.G. Castro, *Introdução à Energia Eólica: Energias Renováveis e Produção Descentralizada* (Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2009), 4ª ed.
- [11] R.M. Dutra, *Viabilidade Técnico-Econômica da Energia Eólica face ao Novo Marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro*. Dissertação de Mestrado, Programa de Planejamento Energético, COPPE, 2001, 300 p.
- [12] E. Hau, *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics* (Springer, Berlin, 2006).
- [13] D.A. Horn, *Análise Numérica da Esteira Aerodinâmica Formada por uma Turbina Eólica com Dimensionamento Ótimo de Betz*. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, 2010.
- [14] H.H. Vogt, *Análise Estrutural de Pás de Gerador Eólico de Pequeno Porte Feitas de Fibra Vegetal Brasileira*. Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas, UECE, Fortaleza, 2010.
- [15] E.F. Pavinatto, 2005. *Ferramenta para Auxílio À Análise de Viabilidade Técnica da Conexão de Parques Eólicos À Rede Elétrica*. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Elétrica, COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.
- [16] M.O.L. Hansen, *Aerodynamics of Wind Turbines* (Earthscan, London, 2008), 2ª ed.
- [17] C. Rebelo e L.S. Silva, Moinhos de vento do futuro. Revista Rua Larga, Portugal, Universidade de Coimbra, 2009, disponível em <http://www.uc.pt/ruaLarga/anteriores>.
- [18] F. Brunetti, *Mecânica dos Fluidos* (Pearson, São Paulo, 2008), 2ª ed.
- [19] D. Anderson e S. Eberhardt, Física na Escola **7**(2), 43 (2006).
- [20] K. Weltner, M.I. Sundberg, A.S. Esperidão e P. Miranda, Revista Brasileira de Ensino de Física **23**, 429 (2001).
- [21] M.C. Potter, D.C. Wiggert e M. Hondzo, *Mecânica dos Fluidos* (Pioneira Thomson Learning, São Paulo, 2004), 3ª ed.
- [22] R.W. Fox e A.T. McDonald, *Introdução à Mecânica dos Fluidos* (LTC - Livros. Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 2001), 5ª ed.
- [23] F.M. White, *Mecânica dos Fluidos* (McGraw-Hill, Porto Alegre, 2011), 6ª ed.