

3- TURBINA EÓLICA

“Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma” (Antoine Lavoisier)

3.1- Introdução

A energia cinética existente no vento é extraída pelo equipamento denominado de Turbina Eólica. A turbina eólica é um conversor que através da interação de seu rotor e pás com o vento, converte a energia cinética de translação das massas de ar em movimento, em energia cinética de rotação de um eixo acoplado ao gerador elétrico.

Como visto no capítulo anterior, o vento pode ser considerado uma combinação da velocidade média e das flutuações turbulentas em torno dela. A experiência demonstrou que os principais aspectos do desempenho das turbinas eólicas (potência e carga) são, em grande parte, determinados pelas forças aerodinâmicas geradas pela média das velocidades do vento. Forças aerodinâmicas periódicas causadas pelo cisalhamento (tangenciais) do vento, ventos fora do eixo de rotação do rotor e forças aleatoriamente flutuantes induzidas por turbulência e efeitos dinâmicos são as fontes de fadiga que influenciam nos picos de cargas experimentadas por uma turbina eólica. Estes fatores são, obviamente, importantes, mas só podem ser compreendidos uma vez que a aerodinâmica da operação em estado estacionário tenha sido entendida.

Nas últimas três décadas, avanços notáveis no projeto de turbinas eólicas foram alcançados juntamente com os desenvolvimentos tecnológicos modernos. Estima-se que os avanços na aerodinâmica, dinâmica estrutural e micrometeorologia podem contribuir para um aumento anual de 5% do rendimento energético das turbinas eólicas.

Neste capítulo será apresentada uma visão geral dos aspectos relativos à aerodinâmica das turbinas, introduzindo conceitos importantes que ilustram o comportamento da interação dos rotores eólicos com os ventos. Em outras palavras, serão estudadas as turbinas eólicas utilizadas para a produção de energia elétrica, em especial, as de eixo horizontal e de grande potência de geração, geralmente instaladas em parques eólicos compostos de vários outros desses equipamentos.

3.2- Classificação das turbinas eólicas

Existe uma variedade de turbinas eólicas desenvolvidas para extrair a energia dos ventos e transformá-la em energia elétrica e, por conseguinte, as turbinas eólicas podem ser classificadas de diversas formas. Apresentaremos a seguir alguns tipos de turbinas classificadas de acordo com o(a):

- orientação do eixo rotativo das pás;
- sentido do fluxo de ar com relação ao rotor;
- potência da turbina;
- utilização ou não de caixa de engrenagens;
- instalação em terra ou no mar;
- e conectada ou não à rede elétrica.

3.2.1- Orientação do eixo rotativo das pás

Ao considerar a orientação do eixo rotativo das pás do rotor, turbinas eólicas modernas podem ser classificadas em turbinas de eixo horizontal e de eixo vertical (Fig. 18). A turbina eólica de eixo horizontal domina a maior parte da indústria eólica. Eixo horizontal significa que o eixo de rotação da turbina eólica é horizontal ou paralelo ao solo. Nas aplicações de grandes potências, são muito raros os casos de utilização de turbinas de eixo vertical. No entanto, em pequenas aplicações eólicas e residenciais, as turbinas de eixo vertical têm seu lugar.

Fig. 18- Turbina eólica com eixo horizontal (esquerda) e turbina eólica com eixo vertical (direita)

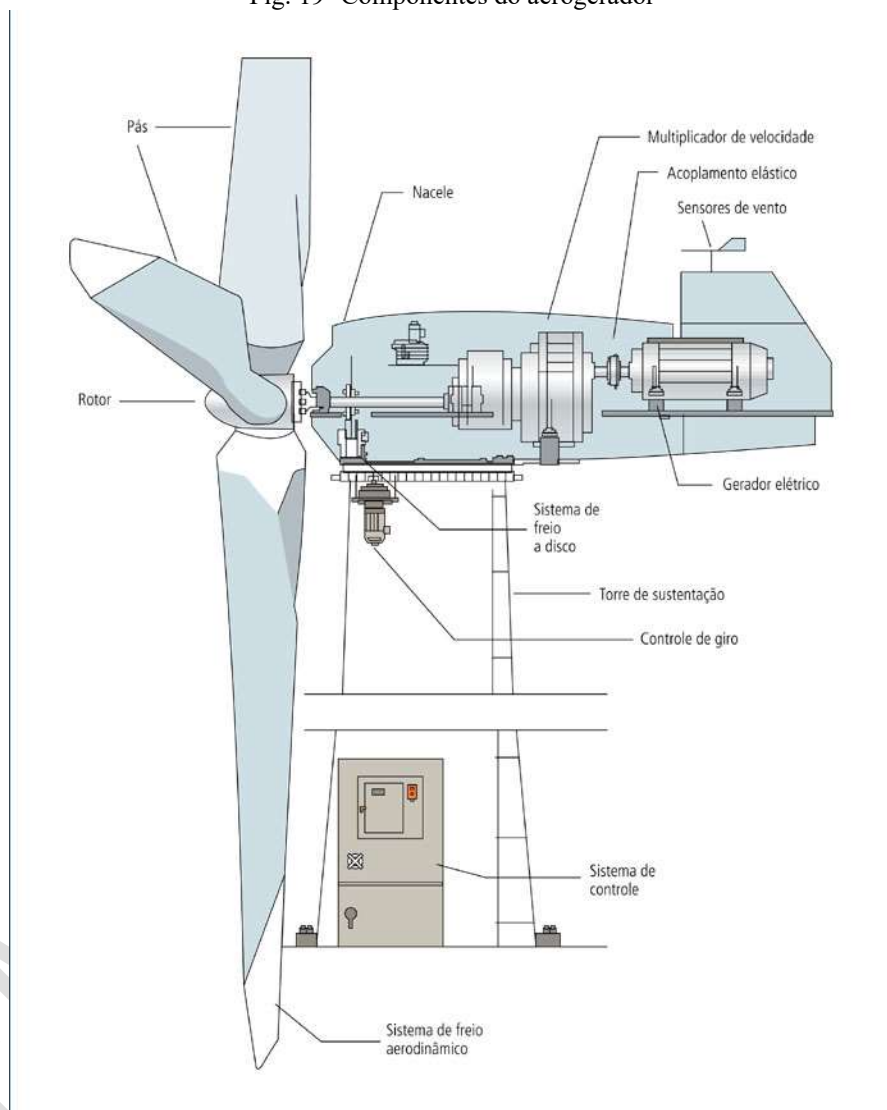


Fonte: <https://www.solarlightsmanufacturer.com>

Embora tenham sido desenvolvidas diferentes configurações de turbinas na busca de um design ideal, houve uma grande consolidação nas turbinas eólicas de eixo horizontal com três pás igualmente espaçadas. Elas são ligadas a um rotor cuja potência mecânica é transferida por uma caixa de engrenagem ao gerador. A caixa de engrenagens tem a função de aumentar a velocidade de rotação do eixo para que o gerador consiga operar. Entretanto, algumas configurações de turbinas não utilizam a caixa de engrenagem por utilizarem geradores que operam em baixas velocidades de rotação de seu eixo. O conjunto: gerador elétrico, caixa

multiplicadora de velocidades, eixos, mancais, sistema de freios sistema de controle e mecanismos de giro da turbina estão contidos em um abrigo chamado nacele. A energia gerada é então transmitida torre abaixo até o transformador e deste para o ponto de conexão com a rede. A todo este conjunto turbina, nacele, torre e transformador, chamamos de aerogerador que está ilustrado na Fig. 19 com seus principais componentes.

Fig. 19- Componentes do aerogerador



Fonte: ANEEL, 2005

As vantagens na utilização de turbinas eólicas de eixo horizontal em relação as de eixo vertical incluem:

- Controle do ângulo de ataque das pás possibilitando controlar a velocidade do rotor, a saída de potência e a proteção contra o excesso de velocidade;

- A flexibilidade no projeto de formatos das pás do rotor que pode ser otimizado aerodinamicamente possibilitando maior eficiência;
- Avanços tecnológicos no desenvolvimento em projetos de pás;
- Acesso a ventos de maiores velocidades devido à altura da torre;
- Maior eficiência, uma vez que as pás estão posicionadas perpendicularmente ao vento;

As desvantagens desse tipo de turbina com relação a de eixo vertical são:

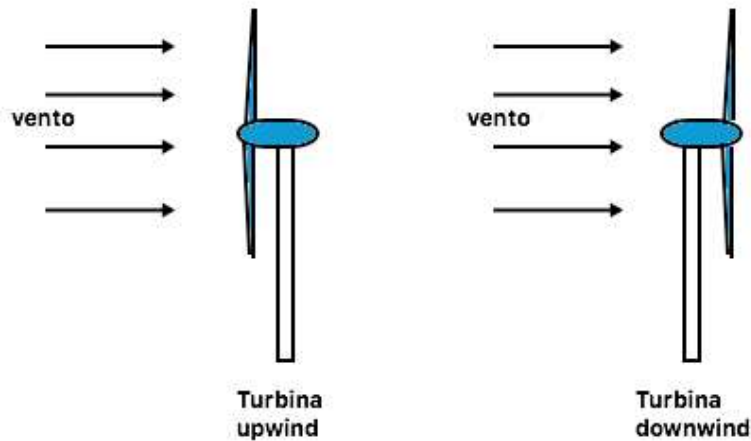
- Maiores dificuldades de instalação devido a maioria dos equipamentos estarem instalados no topo da torre;
- Maiores dificuldades de logística dos equipamentos;
- Necessidade de um sistema de controle para girar as pás em direção ao vento;
- Construção mais complexa da torre para poder apoiar o peso de todo o aerogerador.

As vantagens apresentadas determinam a razão porque quase todas as turbinas eólicas para gerar eletricidade construídas até o momento têm rotores horizontal e, por esse motivo, nos concentraremos neste tipo de turbina daqui em diante.

3.2.2- Sentido do fluxo de ar

Baseado na configuração do rotor em relação ao fluxo do vento, as turbinas eólicas de eixo horizontal podem ser ainda classificadas como *upwind* ou *downwind*, conforme pode ser observado na Fig. 20. A maioria das turbinas eólicas de eixo horizontal utilizadas hoje em dia são turbinas *upwind*, nas quais os rotores eólicos “enfrentam” o vento, e, portanto, é necessário controle ativo para a orientação do rotor em relação ao vento. A principal vantagem desta configuração é evitar a distorção do fluxo do vento que passa pela torre e pela *nacelle*. Para uma turbina do tipo *downwind*, o vento passa primeiro através da *nacelle* e torre e depois chega as pás. Esta configuração exige que as pás do rotor sejam mais flexíveis, gerando ruídos que dificultam a autorização e a aceitação deste tipo de turbina. No entanto, devido à influência da torre e *nacelle*, a potência de saída tende a flutuar muito devido aos cortes no fluxo normal do vento.

Fig. 20- Turbinas eólicas upwind e downwind



Fonte: adaptado de Hemane, 2012.

3.2.3- Potências das turbinas eólicas

As turbinas eólicas podem ser divididas em várias categorias amplas, tendo em vista suas capacidades nominais: micro, pequenas, médias, grandes e muito grandes. Embora uma definição restrita de microturbinas eólicas não esteja disponível, é aceito que uma turbina com a potência nominal menor que 75 kW pode ser categorizada como microturbina eólica, dada a regulamentação brasileira para a micro geração de energia elétrica. As microturbinas eólicas são especialmente adequadas em locais onde a rede elétrica não está disponível, ou podem ser usados em iluminação pública, bombeamento de água e residentes em áreas remotas. Microturbinas eólicas precisam relativamente de baixas velocidades de vento para o arranque e operam em velocidades de vento moderadas. Turbinas eólicas pequenas geralmente se referem às turbinas com potência de saída menores que 100 kW. As turbinas eólicas mais comuns têm tamanhos médios com potência nominal de 100 kW a 1 MW. Este tipo de turbinas eólicas pode ser usado tanto na rede ou sistemas fora da rede, sistemas híbridos, geração de energia em fazendas eólicas ou unidades únicas de mini geração de energia elétrica. As turbinas eólicas de 1 MW até 10 MW podem ser classificadas como turbinas eólicas de grande porte. Nos últimos anos, as turbinas eólicas de múltiplos megawatts tornaram-se o principal produto no mercado internacional de energia eólica. A maioria dos parques eólicos atualmente usa grandes turbinas eólicas, especialmente em parques eólicos localizados no mar (*offshore*). Turbinas eólicas ultra grandes são referidas as que possuem capacidade acima de 10 MW.

3.2.4- Rotor direto ou com caixa de engrenagens

De acordo com a condição da transmissão em um sistema de gerador de energia eólica, turbinas eólicas podem ser classificadas como grupos de acionamento direto ou acionamento

por engrenagem. Com o objetivo de adaptar a velocidade do rotor à velocidade de rotação mais elevada dos geradores convencionais que necessitam de maiores velocidades, uma turbina eólica normalmente usa uma caixa de engrenagens de vários estágios. A velocidade angular dos rotores geralmente varia na faixa de 20 a 150 rpm (rotações por minuto), devido às restrições de velocidade na ponta da pá. Todavia, os geradores elétricos, sobretudo os síncronos, trabalham com rotações muito mais elevadas, geralmente entre 1.200 a 1.800 rpm, tornando necessária a utilização de um mecanismo de multiplicação de velocidade entre dois eixos.

As vantagens do sistema de engrenagens incluem menor custo e menor tamanho e peso do gerador. No entanto, a utilização de uma caixa de engrenagens pode diminuir significativamente a confiabilidade e aumentar o nível de v da turbina eólica, além de maiores perdas de energia mecânica.

Ao eliminar a caixa de engrenagens de múltiplos estágios de um sistema gerador, o eixo do gerador é conectado diretamente ao rotor da lâmina. Portanto, o conceito de acionamento direto é superior em termos de eficiência energética, confiabilidade e simplicidade, entretanto requer um gerador de maior peso e volume.

3.2.5- Turbinas terrestres e marítimas

Turbinas eólicas terrestres têm uma longa história em seu desenvolvimento. Há um número de vantagens na implantação de fazendas eólicas terrestres, incluindo menor custo de fundações, facilidade de integração com a rede elétrica, menor custo na construção das torres e acesso mais conveniente para operação e manutenção. Fazendas eólicas marítimas (*offshore*) têm evoluído muito devido ao excelente recurso eólico no mar, em termos de intensidade de energia eólica e continuidade. Uma turbina eólica instalada no mar pode produzir uma maior potência e operar mais horas a cada ano em comparação com a mesma turbina instalada em terra. Além disso, as restrições ambientais são mais flexíveis em locais *offshore* do que em sites *onshore*. Por exemplo, o ruído da turbina não é um problema para a energia eólica *offshore*.

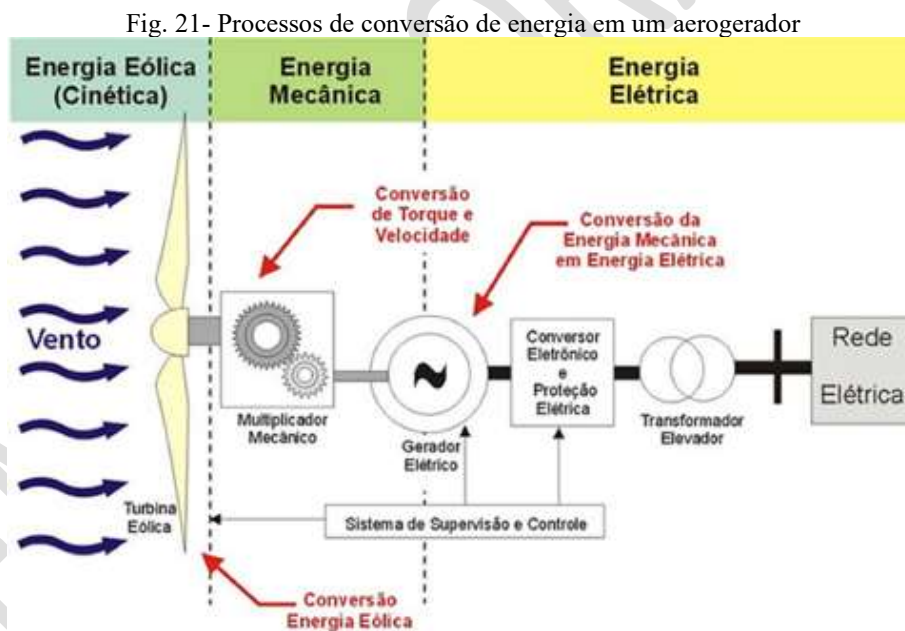
3.2.6- Turbinas conectadas à rede e fora da rede

As turbinas eólicas podem ser usadas para aplicações conectadas à rede *ongrid* ou isolada da rede elétrica *offgrid*. A maioria das turbinas eólicas de tamanho médio e quase todas de grande porte são usadas em aplicações vinculadas à rede elétrica. Uma das vantagens óbvias dos sistemas de turbinas eólicas na rede é de não necessitar de baterias para o armazenamento da energia elétrica produzida. Como contraste, e antes da vigência da regulamentação da microgeração de energia elétrica no Brasil, a nível mundial, a maioria das pequenas turbinas

eólicas estão fora da rede para residências, fazendas, telecomunicações e outras aplicações. No entanto, por se tratar de uma fonte intermitente, a energia elétrica produzida a partir de turbinas eólicas fora da rede pode variar drasticamente em um curto período de tempo. Consequentemente, as turbinas fora de rede geralmente são usadas de forma híbrida com baterias, geradores diesel, sistemas fotovoltaicos ou sistemas de bombeamento e geração hídrica para melhorar a estabilidade de fornecimento de potência ativa.

3.3- Conversão de energia

A produção de energia elétrica em um aerogerador depende de duas etapas de conversão de energia. A primeira etapa é a interação das pás e rotor eólico (turbina) com o vento. Essa interação transforma a energia cinética do vento em energia mecânica no eixo do rotor. Na segunda etapa, o gerador recebe a energia mecânica e a converte em energia elétrica que, por conseguinte, é transmitida para a rede da concessionária. A Fig. ilustra as etapas de transformação de energia, bem como os demais sistemas envolvidos em todos o conjunto que compõe o aerogerador.



Fonte: Picolo et al, 2014.

Conforme já discutido no capítulo sobre Recurso Eólico, a potência disponível no vento é dada por:

$$P = \frac{\rho A v^3}{2} \quad (32)$$

Onde:

ρ = densidade do ar [kg/m^3];

A = área da seção transversal [m^2];

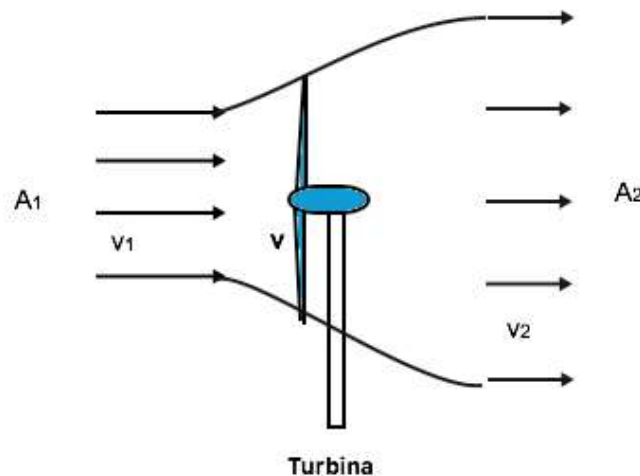
v = velocidade do vento [m/s];

P = potência do vento [W].

A potência dada pela Eq. (32) é a disponível no vento. Mas, quanto de potência mecânica pode ser extraída do fluxo livre de uma turbina eólica? A Fig. 21 ilustra o fluxo de ar através de uma turbina eólica de eixo horizontal. A vazão do ar pode ser representada pelo tubo de vazão mostrado na figura.

A lei de continuidade de fluxo de Bernoulli estabelece que a vazão de massa do fluido é constante ao longo do tubo de vazão. Considere que não há fluxo de massa de ar através dos limites do tubo de vazão e assumindo que a massa específica do ar é constante, que é válido para velocidades abaixo de 100 m/s. Assim, temos que:

Fig. 21- Fluxo de ar fluindo através de uma turbina eólica de eixo horizontal



Fonte: Autor.

$$Q = Av = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (33)$$

Onde:

Q = fluxo de massa de ar [m^3/s];

v = velocidade do vento na entrada da turbina [m/s];

A = área da seção transversal do tubo de vazão do vento livre antes da turbina [m^2];

v_1 = velocidade do vento livre antes da turbina [m/s];

A_1 = área da seção transversal do tubo de vazão do ar na entrada do rotor da turbina [m^2];

v_2 = velocidade do vento na saída da turbina [m/s];

A_2 = área da seção transversal do tubo de vazão do ar na saída do rotor da turbina [m^2].

Ao produzir a energia cinética mecânica por meio do aproveitamento de parte da energia cinética do vento, a turbina eólica provocará a redução da velocidade do vento na saída do rotor, o que resultará no aumento do diâmetro do tubo de vazões conforme pode ser observado na Fig. 21 e de acordo com a lei de conservação do fluxo de massa dada pela Eq. (33).

A potência do vento extraída pela turbina eólica é a diferença entre a potência do vento na entrada e na saída da turbina eólica, ou seja:

$$P = P_1 - P_2 \quad (34)$$

Onde:

P = potência extraída do vento pela turbina eólica [W];

P_1 = potência disponível no vento livre antes da turbina eólica [W];

P_2 = potência disponível no vento na saída da turbina eólica [W];

A potência extraída do vento pela turbina eólica é dada pela Eq. (32), por analogia, as potências disponíveis no vento antes e depois da turbina, são dadas, respectivamente, por:

$$P_1 = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \quad (35)$$

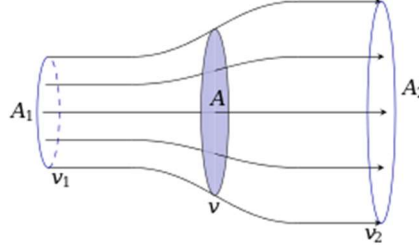
$$P_2 = \frac{1}{2} \rho A v_2^3 \quad (36)$$

3.4- Limite de Betz

A lei de Betz indica um limite máximo para uma potência máxima que pode ser extraída do vento por uma turbina eólica, pois se houver muita perda na velocidade do vento o ar irá

fluir em volta da área do rotor da turbina eólica, em vez de atravessá-la. A lei é derivada dos princípios de conservação de massa e momento do fluxo de ar que flui através de um "disco atuador" (a área varrida pelas pás da turbina) idealizado que extrai energia do fluxo de vento, conforme ilustra a Fig. 22 Fig. 31.

Fig. 22- Fluxo de ar fluindo através de disco atuador (a área varrida pelas pás da turbina eólica)



Fonte: Autor

De acordo com a lei de Betz, a velocidade do vento na saída da turbina eólica não pode ser inferior a 1/3 da velocidade do vento livre antes da turbina. Neste caso, o rotor absorve no máximo a energia equivalente a 2/3 da energia disponível do vento livre antes da turbina. Ou seja, para a máxima transferência de potência:

$$v_{m\acute{a}x} = \frac{2}{3} v_1 \quad (37)$$

$$v_{2m\acute{a}x} = \frac{1}{3} v_1 \quad (38)$$

Em termos de potência máxima extraída do vento, temos de acordo com as Eq. (32) e (37):

$$P_{m\acute{a}x} = P_{1m\acute{a}x} - P_{2m\acute{a}x} = \frac{1}{2} \left(\rho A \frac{2}{3} v_1 \right) v_1^2 - \frac{1}{2} \left(\rho A \frac{2}{3} v_1 \right) \left(\frac{1}{3} v_1 \right)^2$$

Assim,

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \rho A v_1^3 \right) = \frac{16}{27} P_1 = 0,593 P_1 \quad (39)$$

Portanto, a lei de Betz estabelece um limite que nenhuma turbina pode capturar mais de 16/27 (59,3%) da energia cinética no vento. O fator 16/27 (0,593) é conhecido como coeficiente de Betz. Turbinas eólicas práticas em escala útil atingem no máximo 75% a 80% do limite de Betz.

3.5- Coeficiente de potência de uma turbina eólica

Como visto no item anterior, uma turbina eólica ideal pode extrair no máximo 16/27 (59,3%) da potência disponível no vento. Uma turbina real somente poderá extrair parte deste valor máximo, visto que, neste limite teórico não estão consideradas as perdas de potência aerodinâmicas na conversão da energia eólica.

O coeficiente de potência C_p indica a relação entre a potência extraída do vento pela turbina eólica e a potência disponível no vento antes da turbina, ou seja:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A v^3} \quad (40)$$

Onde:

v = velocidade do vento [m/s];

P = potência extraída pela turbina eólica [W];

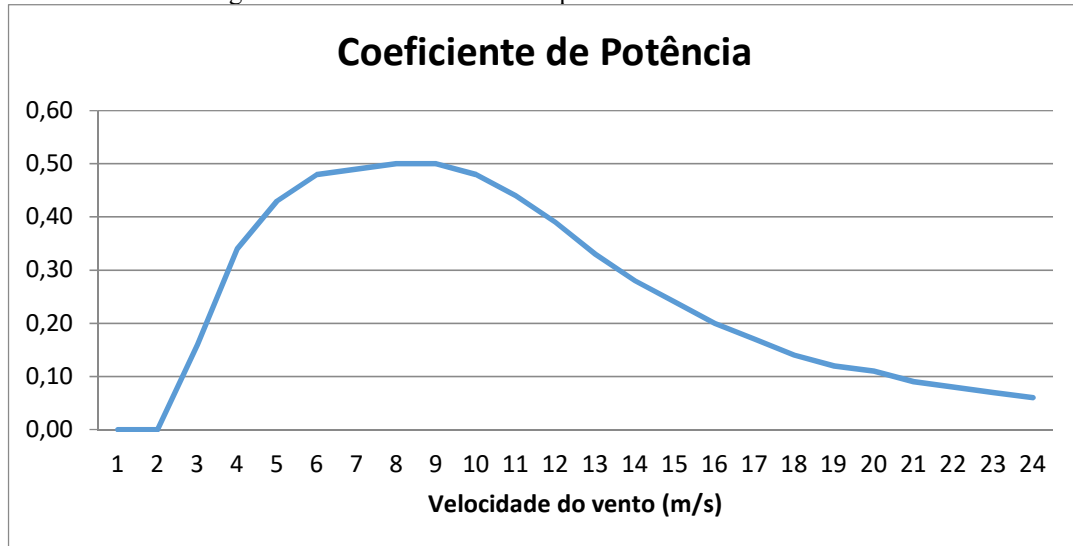
C_p = coeficiente de potência da turbina eólica [adimensional];

A = área varrida pelo rotor da turbina [m²];

ρ = massa específica do ar [Kg/m³];

O coeficiente de potência varia de acordo com a velocidade do vento, como mostra o gráfico da Fig. 23 de uma turbina eólica real. Esta variação deve-se ao fato das pás do rotor da turbina alterarem suas eficiências aerodinâmicas em função da variação da velocidade do vento incidente. O ponto de máximo da curva $C_p \times v$ representa a máxima eficiência da turbina e é obtida em uma determinada velocidade do vento.

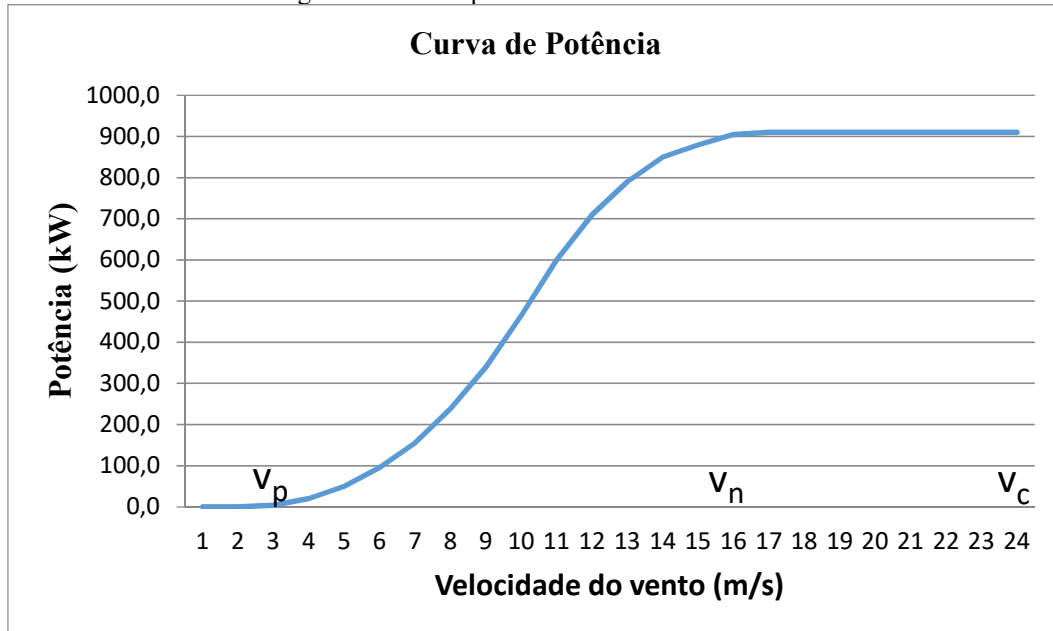
Fig. 23- Curva do coeficiente de potência de uma turbina eólica



Fonte: Adaptado da curva de coeficiente de potência do aerogerador Enercon E44 – 910kW.

A curva de potência para a mesma turbina pode ser vista na Fig. 24 a seguir, onde podemos verificar a variação da potência da turbina com a velocidade do vento. Observa-se que a potência da turbina eólica aumenta praticamente com o cubo da velocidade do vento até que alcance a potência nominal quando, a partir deste ponto, permanecerá constante. A conversão de energia se dá a partir de um valor mínimo de velocidade do vento v_p , chamada de velocidade de partida da turbina. A potência da turbina é limitada ao valor nominal P_n à velocidade nominal v_n , determinado pela capacidade do gerador elétrico. A partir daí o controle de velocidade da turbina mantém o mais constante possível. Na velocidade de corte v_c , a turbina é retirada de operação com o objetivo de preservá-la de esforços mecânicos muito grandes devidos a velocidades do vento excessivamente altas.

Fig. 24- Curva de potência de uma turbina eólica



Fonte: Adaptado da curva de potência do aerogerador Enercon E44 – 910kW..

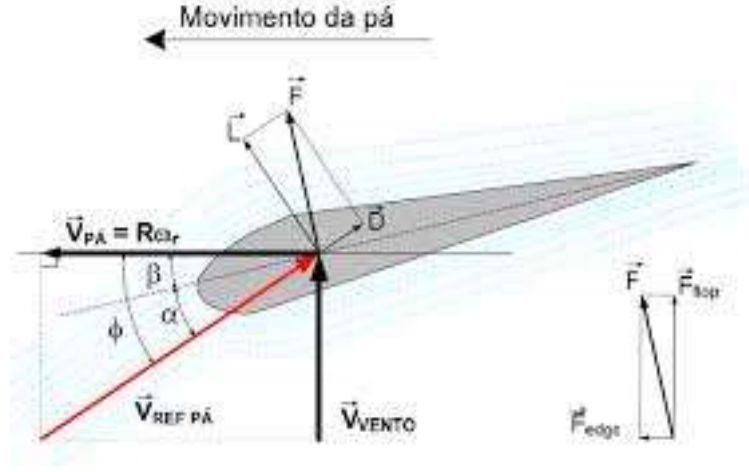
3.6- Forças de arrasto e sustentação

Para compreender como as modernas turbinas operam duas forças da aerodinâmica das turbinas serão introduzidas: arrasto e sustentação.

Qualquer objeto imerso em um fluido em movimento, como o vento por exemplo, está sujeito a uma força provocada pelo impacto do fluxo de ar sobre ele. Pode-se considerar que essa força possui duas componentes agindo em direção perpendicular uma em relação a outra, conhecidas como força de arrasto e força de sustentação. A magnitude dessas forças depende da forma do objeto, sua orientação com relação ao fluxo de ar e a velocidade desse fluxo.

A força de arrasto em uma turbina eólica é a que empurra as pás na mesma direção do fluxo de ar. A força de sustentação experimentada pela pá que está perpendicular a direção formada pelo fluxo de ar.

Fig. 25- Forças de arrasto e sustentação em uma pá de turbina eólica



Fonte: ?????????????????

A linha que une as duas extremidades da pá (borda de fuga e de ataque), comprimento da seção transversal da pá, é conhecida como linha de corda. A face ou lado superior é conhecido como zona de pressão negativa ou sucção e a face inferior como zona de pressão negativa. Na Fig. 24, α representa o ângulo de ataque, formado entre a direção do vento resultante e a linha de referência (linha de corda).

As características de sustentação e arrasto das várias formas de aerofólios, para uma faixa de ataque, são determinadas por meio de medição realizadas em testes em túnel de vento. As características de arrasto e sustentação medidas e determinadas para cada ângulo de ataque do vento podem ser descritas usando os coeficientes adimensionais de arrasto e sustentação (C_a e C_s) ou a razão entre esses dois coeficientes (C_s / C_a). O conhecimento destes é essencial na seleção adequada das seções de aerofólio para o projeto das pás de uma turbina eólica. Os coeficientes de arrasto e sustentação podem ser calculados de acordo com:

$$C_a = \frac{F_a}{\frac{1}{2} \rho A v^3} \quad (41)$$

$$C_s = \frac{F_s}{\frac{1}{2} \rho A v^3} \quad (42)$$

3.7- Pás de uma turbina

As pás são os componentes que interagem com o vento e são projetados com um aerofólio para maximizar a eficiência aerodinâmica.

A forma típica de uma lâmina e suas seções transversais mostram que a lâmina acaba e o ângulo total entre a raiz e a ponta é de cerca de 25° . A área da seção transversal da lâmina é bastante grande para obter a alta rigidez necessária para suportar as cargas mecânicas variáveis sob operação normal. De fato, o vento exerce uma força instável, tanto pelas flutuações devido à turbulência, quanto pela maior velocidade em função da altitude. Essas forças são o desgaste das pás da turbina eólica.

Durante a rotação, uma lâmina em posição alta fica sujeita a uma ação mais forte do vento em comparação com a intensidade do vento em uma posição mais baixa. Finalmente, a força centrífuga devido à rotação exerce tração nas diferentes seções da lâmina e o peso da própria lâmina cria um momento de flexão na raiz que se alterna em cada rotação. As lâminas são feitas de materiais leves, como materiais plásticos reforçados com fibra, que têm boas propriedades de resistência ao desgaste.

3.8- Aerofólios e aerodinâmica

A importância das forças de sustentação e arrasto é sua contribuição para a ação ativa na operação de uma turbina eólica. Aprendemos na seção anterior que a força aerodinâmica depende da forma e do tamanho de um objeto e que, se em qualquer ângulo de ataque, os coeficientes de sustentação e arrasto são conhecidos, é possível determinar as forças de sustentação e arrasto no objeto.

Em uma turbina eólica, desejamos de ter a potência máxima retirada do vento. Por essa razão, se a turbina funciona com base na força de sustentação, pretende-se que a força de sustentação seja muito maior do que a força de arrasto. Se, por outro lado, uma turbina funciona com base na força de arrasto, gostamos que a força de arrasto seja maior que a sustentação. Você verá mais tarde que as turbinas que funcionam com base na força de sustentação são mais eficientes e preferidas para aquelas baseadas na força de arrasto. Vale a pena mencionar aqui que os aviões funcionam com base na força de sustentação de suas asas. Quando um avião se move, ele se comporta como se estivesse parado e flui ao redor, como um objeto no fluxo de vento. No caso de um avião, a força de arrasto é oposta ao movimento do avião e não é desejável; assim, seu valor deve ser o menor possível. Pelo contrário, sustentação é a força que mantém o avião no ar; então, é desejável que sua magnitude seja grande.

É muito importante notar que muitos tamanhos diferentes de aerofólios podem ser feitos a partir de um perfil de aerofólio. Em outras palavras, se os tamanhos relativos de várias partes de um aerofólio forem mantidos os mesmos, podemos ter muitas escalas diferentes do mesmo aerofólio. Para todos os tamanhos diferentes, os coeficientes de sustentação e de arrasto serão os mesmos, mas as forças de sustentação e de arrasto aumentarão com a área do aerofólio. Se a área dobra, o mesmo acontece com a força aerodinâmica; e, assim, as forças de sustentação e de arrasto dobram (sob a mesma temperatura, pressão barométrica e velocidade do ar).

A propriedade importante de um aerofólio é que ele possui valores maiores de força de sustentação e valores menores da força de arrasto para a maioria dos ângulos de ataque que surgem na prática. Essa propriedade é geralmente representada pelos coeficientes de sustentação e de arrasto e pela razão de sustentação para arrastar, que é a razão entre o coeficiente de sustentação e o coeficiente de arrasto. Enquanto que com uma placa plana o valor máximo possível para esta relação pode ser um número pequeno, com aerofólios esta relação pode alcançar valores acima de 20.

Devido à desejável propriedade aerodinâmica dos aerofólios, em todas as turbinas para as quais a força ativa é “elevar” a estrutura das pás tem o perfil de um aerofólio selecionado.

Um bom aerofólio é necessário para ter as seguintes propriedades:

- Curvas graduais.
- Borda de fuga acentuada.
- Borda de ponta redonda.
- Baixa espessura para relação de cordas.
- Superfícies lisas.
- Elevada relação de /resistência ao arrasto

3.9- Controle de potência de uma turbina

Os sistemas de controle de turbinas eólicas continuam a desempenhar papéis importantes para garantir a operação segura e confiável das turbinas eólicas e para otimizar a captura de energia eólica. Os principais sistemas de controle em uma moderna turbina eólica incluem controle de passo, controle de *stall* (passivo e ativo), controle de guinada e outros.

Sob condições de alta velocidade do vento, a saída de energia de uma turbina eólica pode exceder seu valor nominal. Assim, o controle de potência é necessário para controlar a saída de potência dentro das flutuações permitidas para evitar danos à turbina e estabilizar a saída de energia. Existem duas estratégias principais de controle no controle de potência: controle de *pitch* e controle de *stall*. O sistema de controle de energia da turbina eólica é usado para controlar a saída de energia dentro das flutuações permitidas.

3.9.1- Controle de passo (*Pitch*)

O sistema de controle de inclinação é uma parte vital da moderna turbina eólica. Isso ocorre porque o sistema de controle de inclinação não apenas regula continuamente o ângulo de inclinação da lâmina da turbina eólica para aumentar a eficiência da conversão de energia eólica, mas também serve como sistema de segurança em caso de altas velocidades do vento ou situações de emergência. Exige-se que, mesmo em caso de falha de energia da rede, as pás do rotor ainda possam ser acionadas em suas posições empenadas, usando a energia de baterias de reserva ou capacitores ou dispositivos mecânicos de armazenamento de energia.

As primeiras técnicas de controle ativo de passo da lâmina aplicaram atuadores hidráulicos para controlar todas as lâminas juntas. No entanto, essas técnicas de controle de passo coletivo não satisfizeram completamente todos os requisitos de regulação do ângulo de passo da lâmina, especialmente para turbinas eólicas MW com o aumento no comprimento da lâmina e altura do cubo. Isso ocorre porque o vento é um fluxo altamente turbulento e a velocidade do vento é proporcional à altura do solo. Portanto, cada lâmina experimenta diferentes cargas em diferentes posições de rotação. Como resultado, técnicas de controle de passo de lâmina individuais mais avançadas foram desenvolvidas e implementadas, permitindo o controle de cargas aerodinâmicas assimétricas nas lâminas, assim como cargas estruturais na estrutura não giratória, como a dobra lateral da torre. Em tal sistema de controle, cada lâmina é equipada com seu próprio atuador de passo, sensores e controlador. Na atual indústria de energia eólica, existem basicamente dois tipos de sistemas de controle de passo de lâmina: sistemas controlados por hidráulica e elétricos controlados. Como mostrado na Figura 12, o sistema de controle de passo hidráulico usa um atuador hidráulico para impulsionar a lâmina girando com direção à sua linha central axial. As vantagens mais significativas do sistema de controle de passo hidráulico incluem seu grande poder de direção, a falta de uma caixa de câmbio e um robusto poder de reserva. Devido a essas vantagens, os sistemas de controle de passo hidráulico historicamente dominam o controle de turbinas eólicas na Europa e na América do Norte por muitos anos.

Os sistemas de controle elétrico de passo foram desenvolvidos alternativamente com os sistemas hidráulicos. Este tipo de sistema de controle tem uma eficiência maior do que a dos sistemas hidráulicos controlados (que normalmente é inferior a 55%) e evita o risco de poluição ambiental devido ao fluido hidráulico ser dividido ou vazado.

Em um sistema de controle de passo elétrico, como mostrado na Fig. 13, o motor se conecta a uma caixa de engrenagens para diminuir a velocidade do motor para uma velocidade de controle desejada. Uma engrenagem de pinhão aciona uma engrenagem de anel interna, que é fixada rigidamente ao teto da pá do rotor. Alternativamente, alguns fabricantes de turbinas eólicas usam a estrutura de acionamento por correia ajustando o ângulo de inclinação. O uso de motores elétricos pode aumentar a taxa de resposta e a sensibilidade do controle de passo da lâmina. Para melhorar a confiabilidade da operação, foi proposto o uso de sistemas de controle de inclinação redundantes para serem equipados em grandes turbinas eólicas.

3.9.2- Controle por *stall*

3.10- Fator de capacidade de uma turbina

Devido à natureza intermitente do vento, as turbinas eólicas não produzem energia o tempo todo. Assim, um fator de capacidade de uma turbina eólica é usado para fornecer uma medida da potência real da turbina eólica em um determinado período (por exemplo, um ano) dividido pela sua saída de energia se a turbina tiver operado o tempo todo. Um fator de capacidade razoável seria de 0,25 a 0,30 e um fator de capacidade muito bom estaria em torno de 0,40.

De fato, o fator de capacidade da turbina eólica é muito sensível à velocidade média do vento.