

*Centro de Referência para Energia Solar  
e Eólica Sérgio de Salvo Brito*



***ENERGIA EÓLICA  
PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES***

<http://www.cresesb.cepel.br>

E-mail: [crese@cepel.br](mailto:crese@cepel.br)

**CEPEL**   
SISTEMA ELETROBRÁS



# **ENERGIA EÓLICA - PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES**

<b>1. O RECURSO EÓLICO</b>	<b>4</b>
1.1. Mecanismos de Geração dos Ventos	4
1.2. Movimento das Massas de Ar	5
<b>2. COMPONENTES DE UM SISTEMA EÓLICO</b>	<b>6</b>
2.1. Rotor Eólico	8
2.2. Transmissão e Caixa Multiplicadora	10
2.3. Mecanismos de Controle	10
2.3.1. Controle de Passo	11
2.3.2. Controle Estol	12
2.4. Gerador	13
2.5. Torre	14
2.6. Sistema de Armazenamento de Energia	14
2.7. Acessórios	14
<b>3. APLICAÇÕES DOS SISTEMAS EÓLICOS</b>	<b>15</b>
3.1. Sistemas Isolados	15
3.2. Sistemas Híbridos	15
3.3. Sistemas Interligados à Rede	15
<b>4. PROJETOS IMPLEMENTADOS NO BRASIL</b>	<b>17</b>

# 1. O RECURSO EÓLICO

A energia eólica provém da radiação solar uma vez que os ventos são gerados pelo aquecimento não uniforme da superfície terrestre. Uma estimativa da energia total disponível dos ventos ao redor do planeta pode ser feita a partir da hipótese de que, aproximadamente, 2% da energia solar absorvida pela Terra é convertida em energia cinética dos ventos. Este percentual, embora pareça pequeno, representa centena de vezes a potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo.

Os ventos que sopram em escala global e aqueles que se manifestam em pequena escala são influenciados por diferentes aspectos entre os quais destacam-se a altura, a rugosidade, os obstáculos e o relevo.

A seguir serão descritos os mecanismos de geração dos ventos e os principais fatores de influência no regime dos ventos de uma região.

## 1.1. Mecanismos de Geração dos Ventos

A energia eólica pode ser considerada como uma das formas em que se manifesta a energia proveniente do Sol, isto porque os ventos são causados pelo aquecimento diferenciado da atmosfera. Essa não uniformidade no aquecimento da atmosfera deve ser creditada, entre outros fatores, à orientação dos raios solares e aos movimentos da Terra.

As regiões tropicais, que recebem os raios solares quase que perpendicularmente, são mais aquecidas do que as regiões polares. Consequentemente, o ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar mais frio que se desloca das regiões polares. O deslocamento de massas de ar determina a formação dos ventos. A Figura 1 a seguir apresenta esse mecanismo.

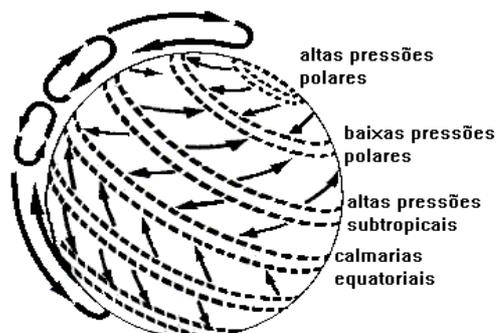


Figura 1 - Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar.

Existem locais no globo terrestre nos quais os ventos jamais cessam de “soprar” pois os mecanismos que os produzem (aquecimento no Equador e resfriamento nos pólos) estão sempre presentes na natureza. São chamados de ventos planetários ou constantes e podem ser classificados em:

- Alísios: ventos que sopram dos trópicos para o Equador, em baixas altitudes.
- Contra-Alísios: ventos que sopram do Equador para os pólos, em altas altitudes.
- Ventos do Oeste: ventos que sopram dos trópicos para os pólos.

- Polares: ventos frios que sopram dos pólos para as zonas temperadas.

Tendo em vista que o eixo da Terra está inclinado de  $23,5^\circ$  em relação ao plano de sua órbita em torno do Sol, variações sazonais na distribuição de radiação recebida na superfície da Terra resultam em variações sazonais na intensidade e duração dos ventos, em qualquer local da superfície terrestre. Como resultado surgem os ventos continentais ou periódicos e compreendem as monções e as brisas.

As monções são ventos periódicos que mudam de direção a cada seis meses aproximadamente. Em geral, as monções sopram em determinada direção em uma estação do ano e em sentido contrário em outra estação.

Em função das diferentes capacidades de refletir, absorver e emitir o calor recebido do Sol inerentes à cada tipo de superfície (tais como mares e continentes) surgem as brisas que caracterizam-se por serem ventos periódicos que sopram do mar para o continente e vice-versa. No período diurno, devido à maior capacidade da terra de refletir os raios solares, a temperatura do ar aumenta e, como consequência, forma-se uma corrente de ar que sopra do mar para a terra (brisa marítima). À noite, a temperatura da terra cai mais rapidamente do que a temperatura da água e, assim, ocorre a brisa terrestre que sopra da terra para o mar. Normalmente, a intensidade da brisa terrestre é menor do que a da brisa marítima devido à menor diferença de temperatura que ocorre no período noturno.

Sobreposto ao sistema de geração dos ventos descrito acima encontram-se os *ventos locais*, que são originados por outros mecanismos mais específicos. São ventos que sopram em determinadas regiões e são resultantes das condições locais, que os tornam bastante individualizados. A mais conhecida manifestação local dos ventos é observada nos vales e montanhas. Durante o dia, o ar quente nas encostas da montanha se eleva e o ar mais frio desce sobre o vale para substituir o ar que subiu. No período noturno, a direção em que sopram os ventos é novamente revertida e o ar frio das montanhas desce e se acumula nos vales.

## 1.2. Movimento das Massas de Ar

De uma forma geral, os movimentos das massas de ar na atmosfera (vento) processam-se em regime turbulento. Sendo assim, a velocidade instantânea do vento é descrita simplificada como um valor médio acrescido de um desvio a partir da média (flutuação), tal que:

$$V = \bar{V} + v' \quad ,$$

onde  $\bar{V}$  é a velocidade média do vento e  $v'$  é a flutuação. Na prática, para algumas aplicações, leva-se em consideração apenas a intensidade da velocidade média  $\bar{V}$ . A maioria dos instrumentos de medição, devido a sua configuração, “filtra” as flutuações e fornece somente o valor da velocidade média.

A direção do vento também é um importante parâmetro a ser analisado pois mudanças de direção frequentes indicam situações de rajadas de vento. Além disso, a medida da direção do vento auxilia na determinação da localização das turbinas em um parque eólico. Devido à existência do problema de “sombra”, isto é, a interferência das esteiras das turbinas, é fundamental o conhecimento da direção predominante.



Do ponto de vista do aproveitamento da energia eólica, é importante distinguir os vários tipos de variações temporais da velocidade dos ventos, a saber: variações anuais, sazonais, diárias e de curta duração.

**Variações Anuais** - Para se obter um bom conhecimento do regime dos ventos não é suficiente basear-se na análise de dados de vento de apenas um ano; o ideal é dispor de dados referentes a vários anos. À medida que uma maior quantidade de dados anuais é coletada, as características levantadas do regime local dos ventos tornam-se mais confiáveis.

**Variações Sazonais** - O aquecimento não uniforme da superfície terrestre resulta em significativas variações no regime dos ventos, resultando na existência de diferentes estações do ano. Considerando que, em função da relação cúbica entre a potência disponível e a velocidade do vento (na altura do eixo da turbina), em algumas faixas de potência, uma pequena variação na velocidade implica numa grande variação na potência. Sendo assim, a utilização de médias anuais (ao invés de médias sazonais) pode levar a resultados que se afastam da realidade.

**Variações Diárias** - As variações diárias na velocidade do vento (brisas marítimas e terrestres, por exemplo) também são causadas pelo aquecimento não uniforme da superfície da Terra. Essas variações são importantes quando, após a escolha de uma região, procura-se o local mais adequado para a instalação do sistema eólico dentro dessa área. Ao comparar a evolução da velocidade média ao longo do dia percebe-se que há uma significativa variação de um mês para os outros. Com esse tipo de informação pode-se projetar melhor o sistema eólico. Por exemplo, nos locais em que os ventos no período do dia são mais fortes do que os ventos no período da noite e a carga de pico ocorre durante o dia, a carga base pode ser fornecida pelo sistema existente e a carga adicional pelo sistema eólico. Entretanto, se a carga de pico ocorre durante a noite, provavelmente a demanda será maior que o disponível e um sistema de estocagem pode se fazer necessário.

**Variações de Curta Duração** - As variações de curta duração estão associadas tanto às pequenas flutuações quanto às rajadas de vento. Num primeiro momento, essas variações não são consideradas na análise do potencial eólico de uma região, desde que não assumam grandes proporções. As flutuações e a turbulência do vento podem afetar a integridade estrutural do sistema eólico, devido à fadiga que ocorre especialmente nas pás da turbina. Por outro lado, as rajadas, caracterizadas por aumentos bruscos de curta duração da velocidade do vento, geralmente acompanhadas por mudanças de direção, merecem maior atenção.

## 2. COMPONENTES DE UM SISTEMA EÓLICO

Um sistema eólico é constituído por vários componentes que devem trabalhar em harmonia de forma a propiciar um maior rendimento final. Para efeito de estudo global da conversão eólica devem ser considerados os seguintes componentes:

- Vento: Disponibilidade energética do local destinado à instalação do sistema eólico.
- Rotor: Responsável por transformar a energia cinética do vento em energia mecânica de rotação.
- Transmissão e Caixa Multiplicadora: Responsável por transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até a carga. Alguns geradores não utilizam este componente; neste caso, o eixo do rotor é acoplado diretamente à carga.



- Gerador Elétrico: Responsável pela conversão da energia mecânica em energia elétrica.
- Mecanismo de Controle: Responsável pela orientação do rotor, controle de velocidade, controle da carga, etc.
- Torre: Responsável por sustentar e posicionar o rotor na altura conveniente.
- Sistema de Armazenamento: Responsável por armazenar a energia para produção de *energia firme* a partir de uma fonte intermitente.
- Transformador: Responsável pelo acoplamento elétrico entre o aerogerador e a rede elétrica.
- Acessórios: São os componentes periféricos.

A Figura 2 apresenta as diversas partes constituintes de um sistema eólico.

O rendimento global do sistema eólico relaciona a potência disponível do vento com a potência final que é entregue pelo sistema. Os rotores eólicos ao extraírem a energia do vento reduzem a sua velocidade; ou seja, a velocidade do vento frontal ao rotor (velocidade não perturbada) é maior do que a velocidade do vento atrás do rotor (na esteira do rotor). Uma redução muito grande da velocidade do vento faz com que o ar circule em volta do rotor, ao invés de passar através dele.

A condição de máxima extração de energia verifica-se para uma velocidade na esteira do rotor igual a 1/3 da velocidade não perturbada. Em condições ideais, o valor máximo da energia captada por um rotor eólico é limitado pela eficiência de Betz dada pelo fator 16/27 ou 0,593. Em outras palavras, 59,3% da energia contida no fluxo de ar pode ser teoricamente extraída por uma turbina eólica. Na prática, entretanto, o rendimento aerodinâmico das pás reduz ainda mais este valor. Para um sistema eólico, existem ainda outras perdas, relacionadas com cada componente (rotor, transmissão, caixa multiplicadora e gerador). Além disso, o fato do rotor eólico funcionar em uma faixa limitada de velocidade de vento também irá contribuir para reduzir a energia por ele captada.

Todo sistema eólico somente começa a funcionar a partir de uma certa velocidade, chamada de velocidade de entrada, que é necessária para vencer algumas perdas. Quando o sistema atinge a chamada velocidade de corte um mecanismo de proteção é acionado com a finalidade de não causar riscos ao rotor e à estrutura.

Para os sistemas eólicos, a velocidade de rotação ótima do rotor varia com a velocidade do vento. Um sistema eólico tem o seu rendimento máximo a uma dada velocidade do vento (chamada de velocidade de projeto ou velocidade nominal) e diminui para velocidades diferentes desta.

Projetar um sistema eólico, para um determinado tamanho de rotor e para uma carga pré-fixada, supõe trabalhar no intervalo ótimo de rendimento do sistema com relação a curva de potência disponível do vento local. Isto requer encontrar uma relação de multiplicação, de maneira que se tenha um bom acoplamento rotor/carga. É necessário também, ter mecanismos de controle apropriados para melhorar o rendimento em outras velocidades de vento e aumentar o intervalo de funcionamento do sistema eólico.

Um exemplo de mecanismo de controle é a utilização de rotores com ângulo de passo variável. Com este controle, a medida que a velocidade do vento varia, as pás mudam de posição, variando o rendimento do rotor. Com isto, pode-se aumentar o intervalo de funcionamento do sistema eólico e ainda manter uma determinada velocidade de rotação, que corresponde a eficiência máxima do gerador.

Como uma primeira aproximação, o rendimento global de um sistema eólico simples pode ser estimado em 20%.



- 1- Cubo do rotor
- 2- Pás do rotor
- 3- Sistema hidráulico
- 4- Sistema de posicionamento da nacelle
- 5- Engrenagem de posicionamento
- 6- Caixa multiplicadora de rotação
- 7- Disco de freio
- 8- Acoplamento do gerador elétrico
- 9- Gerador elétrico
- 10- Sensor de vibração
- 11- Anemômetro
- 12- Sensor de direção
- 13- Nacelle, parte inferior
- 14- Nacelle, parte superior
- 15- Rolamento do posicionamento
- 16- Disco de freio do posicionamento
- 17- Pastilhas de freio
- 18- Suporte do cabo de força
- 19- Torre

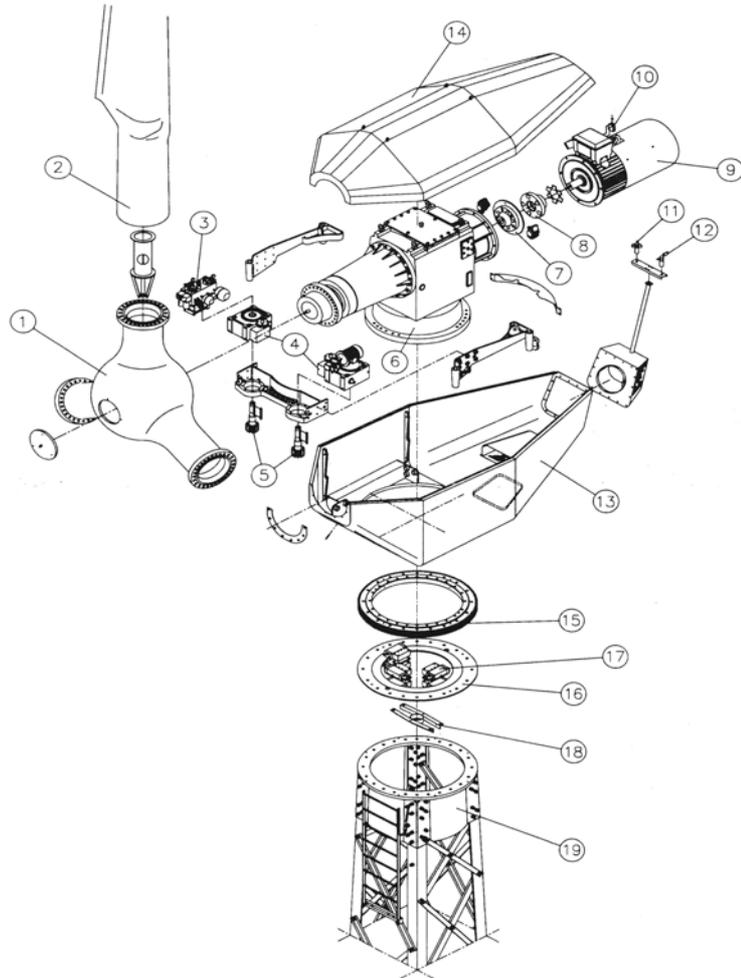


Figura 2 - Apresentação das diversas partes constituintes de um sistema eólico.

## 2.1. Rotor Eólico

O rotor é o componente do sistema eólico responsável por captar a energia cinética dos ventos e transformá-la em energia mecânica de rotação. É o componente mais característico de um sistema eólico. Por este motivo, a configuração do rotor influenciará diretamente no rendimento global do sistema.

Os rotores eólicos podem ser classificados segundo vários critérios e o mais importante é aquele que utiliza a orientação do eixo como fator de classificação. Assim, tem-se os rotores de eixo horizontal e os rotores de eixo vertical.

### Rotores de Eixo Horizontal

Os rotores de eixo horizontal são os mais comuns e grande parte da experiência mundial está voltada para a sua utilização. São movidos por forças aerodinâmicas chamadas de forças de sustentação (*lift*) e forças de arrasto (*drag*). Um corpo que obstrui o movimento do vento sofre a ação de forças que atuam perpendicularmente ao escoamento (forças de sustentação) e de forças que atuam na direção do escoamento (forças de arrasto). Ambas são proporcionais ao quadrado da velocidade relativa do vento. Adicionalmente, as forças de sustentação

dependem da geometria do corpo e do ângulo de ataque (formado entre a velocidade relativa do vento e o eixo do corpo).

Os rotores que giram predominantemente sob o efeito de forças de sustentação permitem liberar muito mais potência do que aqueles que giram sob efeito de forças de arrasto, para uma mesma velocidade de vento.

Os rotores de eixo horizontal ao longo do vento (aerogeradores convencionais) são predominantemente movidos por forças de sustentação e devem possuir mecanismos capazes de permitir que o disco varrido pelas pás esteja sempre em posição perpendicular ao vento. Tais rotores podem ser constituídos de uma pá e contrapeso, duas pás, três pás ou múltiplas pás (*multivane fans*). Construtivamente, as pás podem ter as mais variadas formas e empregar os mais variados materiais. Em geral, utilizam-se pás rígidas de madeira, alumínio ou fibra de vidro reforçada.

Quanto à posição do rotor em relação à torre, o disco varrido pelas pás pode estar a jusante do vento (*down wind*) ou a montante do vento (*up wind*). No primeiro caso, a “sombra” da torre provoca vibrações nas pás. No segundo caso, a “sombra” das pás provoca esforços vibratórios na torre. Sistemas a montante do vento necessitam de mecanismos de orientação do rotor com o fluxo de vento, enquanto nos sistemas a jusante do vento, a orientação realiza-se automaticamente.

Os rotores mais utilizados para geração de energia elétrica são os de eixo horizontal do tipo hélice, normalmente compostos de 3 pás ou em alguns casos (velocidades médias muito altas e possibilidade de geração de maior ruído acústico) 1 ou 2 pás. A Figura 3 ilustra as pás de uma turbina eólica de grande porte.

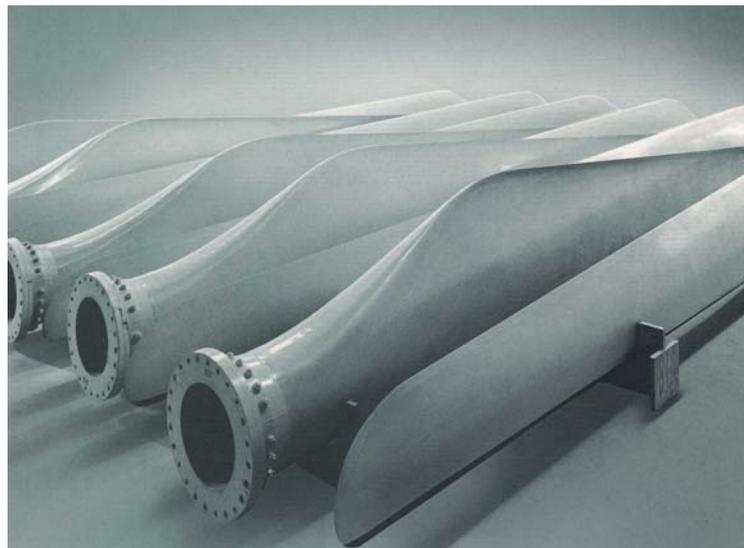


Figura 3 – Ilustração das pás de uma turbina eólica de grande porte.

### **Rotores de Eixo Vertical**

Em geral, os rotores de eixo vertical têm a vantagem de não necessitarem de mecanismos de acompanhamento para variações da direção do vento, o que reduz a complexidade do projeto e os esforços devidos as forças de *Coriolis*.

Os rotores de eixo vertical também podem ser movidos por forças de sustentação (*lift*) e por forças de arrasto (*drag*). Os principais tipos de rotores de eixo vertical são *Darrieus*, *Savonius* e turbinas com torre de vórtices.

Os rotores do tipo *Darrieus* são movidos por forças de sustentação e constituem-se de lâminas curvas (duas ou três) de perfil aerodinâmico, atadas pelas duas pontas ao eixo vertical.

## 2.2. 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. É composta por eixos, mancais, engrenagens de transmissão e acoplamentos. A Figura 2 apresenta a localização da caixa multiplicadora dentro do sistema de geração eólica.

O projeto tradicional de uma turbina eólica consiste em colocar a caixa de transmissão mecânica entre o rotor e o gerador de forma a adaptar a baixa velocidade do rotor à velocidade de rotação mais elevada dos geradores convencionais.

A velocidade angular dos rotores geralmente varia na faixa de 20 a 150 RPM, devido às restrições de velocidade na ponta da pá (*tip speed*). Entretanto, geradores (sobretudo geradores síncronos) trabalham a rotações muito mais elevadas (em geral, entre 1200 a 1800 RPM), tornando necessário a instalação de um sistema de multiplicação entre os eixos.

Mais recentemente, alguns fabricantes desenvolveram com sucesso aerogeradores sem a caixa multiplicadora e abandonaram a forma tradicional de construir turbinas eólicas. Assim, ao invés de utilizar a caixa de engrenagens com alta relação de transmissão, necessária para alcançar a elevada rotação dos geradores, utilizam-se geradores multipolos de baixa velocidade e grandes dimensões.

Os dois tipos de projetos possuem vantagens e desvantagens e a decisão de utilizar o multiplicador ou fabricar um aerogerador sem caixa de transmissão é antes de tudo uma questão de filosofia do fabricante.

## 2.3. Mecanismos de Controle

Os mecanismos de controle destinam-se à orientação do rotor, ao controle de velocidade, ao controle de carga, etc. Pela variedade de controles, existe uma enorme variedade de mecanismos que podem ser mecânicos (velocidade, passo, freio), aerodinâmicos (posicionamento do rotor) ou eletrônicos (controle da carga).

Devido a atuação das forças aerodinâmicas nas pás do rotor, uma turbina eólica converte a energia cinética do vento em energia mecânica rotacional. Estas forças aerodinâmicas são geradas ao longo das pás do rotor que necessitam de perfis especialmente projetados e que são muito similares àqueles usados para asas de aviões. Com a velocidade do fluxo de ar aumentando, as forças de sustentação aerodinâmica aumentam com a segunda potência e a energia extraída da turbina com a terceira potência da velocidade do vento, uma situação que necessita de um controle de potência do rotor muito efetivo e rápido de modo a evitar sobrecarregamento elétrico e mecânico no sistema de transmissão.

Os modernos aerogeradores utilizam dois diferentes princípios de controle aerodinâmico para limitar a extração de potência à potência nominal do aerogerador. São chamados de controle estol (*stall*) e controle de passo (*pitch*). No passado, a maioria dos aerogeradores usavam o controle estol simples; atualmente, entretanto, com o aumento do tamanho das máquinas, os fabricantes estão optando pelo sistema de controle de passo que oferece maior flexibilidade na operação das turbinas eólicas.



### 2.3.1. Controle de Passo

O controle de passo é um sistema ativo que normalmente necessita de uma informação vinda do controlador do sistema. Sempre que a potência nominal do gerador é ultrapassada, devido à um aumento da velocidade do vento, as pás do rotor giram em torno do seu eixo longitudinal; em outras palavras, as pás mudam o seu ângulo de passo para reduzir o ângulo de ataque. Esta redução do ângulo de ataque diminui as forças aerodinâmicas atuantes e, conseqüentemente, a extração de potência. Para todas as velocidades do vento superiores à velocidade nominal, o ângulo é escolhido de forma que a turbina produza apenas a potência nominal. Sob todas as condições de vento, o escoamento em torno dos perfis das pás do rotor é bastante aderente à superfície produzindo sustentação aerodinâmica e pequenas forças de arrasto.

Sob todas as condições de vento, o fluxo em torno dos perfis da pá do rotor é bem aderente à superfície (veja Figura 4), produzindo, portanto, sustentação aerodinâmica a pequenas forças de arrasto.

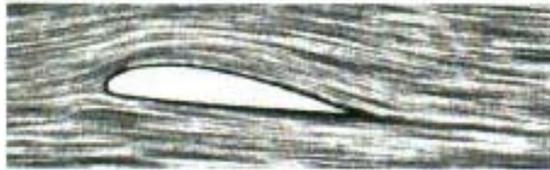


Figura 4 - Fluxo aderente ao perfil (Fonte: DEWI).

Turbinas com controle de passo são mais sofisticadas do que as de passo fixo, controladas por estol porque estas necessitam de um sistema de variação de passo. Por outro lado, elas possuem certas vantagens:

- permitem controle de potência ativo sob todas as condições de vento, também sob potências parciais;
- alcançam a potência nominal mesmo sob condições de baixa massa específica do ar (grandes altitudes dos sítios, altas temperaturas);
- maior produção de energia sob as mesmas condições (sem diminuição da eficiência na adaptação ao estol da pá);
- partida simples do rotor pela mudança do passo;
- fortes freios desnecessários para paradas de emergência do rotor;
- cargas das pás do rotor decrescentes com ventos aumentando acima da potência nominal;
- posição de embandeiramento das pás do rotor para cargas pequenas em ventos extremos;
- massas das pás do rotor menores levam a massas menores dos aerogeradores.

Na Alemanha cerca de 50% de todos os aerogeradores instalados são do tipo controle de passo porque dois dos maiores fabricantes preferem este tipo de controle de aerogeradores. Na nova geração de turbinas da classe de megawatt, muitos fabricantes mudaram para sistemas de controle de passo.

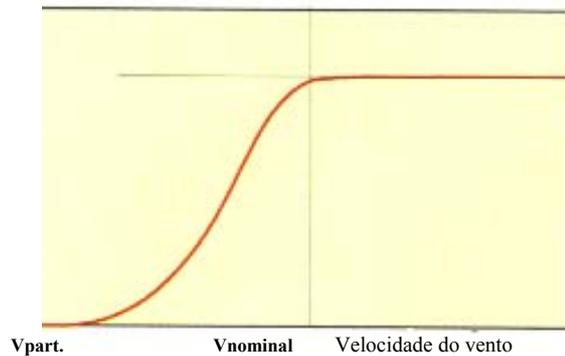


Figura 5 - Curva de potência típica de um aerogerador com controle de passo (Fonte: DEWI).

### 2.3.2. Controle Estol

O controle estol é um sistema passivo que reage à velocidade do vento. As pás do rotor são fixas em seu ângulo de passo e não podem girar em torno de seu eixo longitudinal. O ângulo de passo é escolhido de forma que, para velocidades de vento superiores a velocidade nominal, o escoamento em torno do perfil da pá do rotor descola da superfície da pá (estol), reduzindo as forças de sustentação e aumentando as forças de arrasto. Sob todas as condições de ventos, superiores à velocidade nominal, o escoamento em torno dos perfis das pás do rotor é, pelo menos parcialmente, descolado da superfície produzindo menores forças de sustentação e elevadas forças de arrasto. Menores sustentações e maiores arrastos atuam contra um aumento da potência do rotor. Para evitar que o efeito estol ocorra em todas as posições radiais das pás ao mesmo tempo, o que reduziria significativamente a potência do rotor, as pás possuem uma pequena torção longitudinal que as levam a um suave desenvolvimento deste efeito.

Sob todas as condições de ventos superiores à velocidade nominal o fluxo em torno dos perfis das pás do rotor é, pelo menos, parcialmente descolado da superfície (veja Figura 6), produzindo, portanto sustentações menores e forças de arrasto muito mais elevadas.



Figura 6 - Fluxo separado (estol) em volta do perfil (Fonte: DEWI).

Turbinas com controle estol são mais simples do que as de controle de passo porque elas não necessitam de um sistema de mudança de passo. Os aerogeradores com controle estol, em comparação com os aerogeradores com controle de passo possuem, em princípio, as seguintes vantagens:

- inexistência de sistema de controle de passo;
- estrutura de cubo do rotor simples;
- menor manutenção devido a um número menor de peças móveis;
- auto-confiabilidade do controle de potência.

Em termos mundiais, o conceito de controle através de estol domina. A maioria dos fabricantes utiliza esta possibilidade simples de controle de potência, que sempre necessita de uma velocidade constante do rotor, geralmente dada pelo gerador de indução diretamente acoplado à rede.

Mais recentemente surgiu uma concepção que mistura os mecanismos de controle por estol e de passo (denominada “estol ativo”). Neste caso, o passo da pá do rotor gira na direção do estol e não na direção da posição de embandeiramento (menor sustentação), como é feito em sistemas de passo normais. As vantagens deste sistema são:

- necessidade de reduzidas mudanças no ângulo do passo;
- possibilidade de controle da potência sob condições de potência parcial (baixas velocidades de vento);
- a posição de embandeiramento das pás do rotor para cargas pequenas em situação de altas velocidades de vento.

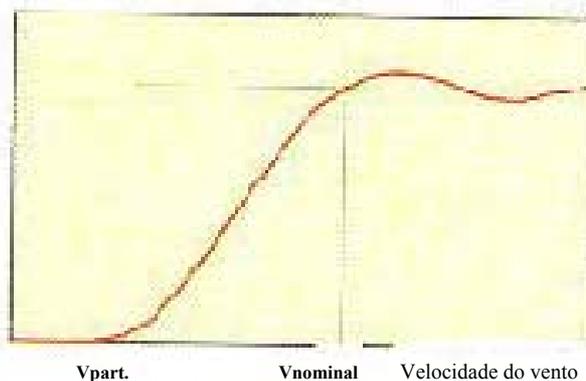


Figura 7 - Curva de potência típica de um aerogerador com controle estol (Fonte: DEWI).

## 2.4. Gerador

A transformação da energia mecânica de rotação em energia elétrica através de equipamentos de conversão eletro-mecânica é um problema tecnologicamente dominado e, portanto, encontram-se vários fabricantes de geradores disponíveis no mercado.

Entretanto, a integração de geradores a sistemas de conversão eólica constitui-se em um grande problema, que envolve principalmente:

- variações na velocidade do vento (extensa faixa de rotações por minuto para a geração);
- variações do torque de entrada (uma vez que variações na velocidade do vento induzem variações de potência disponível no eixo);
- exigência de frequência e tensão constante na energia final produzida;

- facilidade de instalação, operação e manutenção devido ao isolamento geográfico de tais sistemas, sobretudo em caso de pequena escala de produção (isto é, necessitam ter alta confiabilidade).

Atualmente, existem várias alternativas de conjuntos moto-geradores, entre eles: geradores de corrente contínua, geradores síncronos, geradores assíncronos, geradores de comutador de corrente alternada. Cada uma delas apresenta vantagens e desvantagens que devem ser analisadas com cuidado na sua incorporação a sistemas de conversão de energia eólica.

## **2.5. Torre**

As torres são necessárias para sustentar e posicionar o rotor a uma altura conveniente para o seu funcionamento. É um item estrutural de grande porte e de elevada contribuição no custo inicial do sistema. Em geral, as torres são fabricadas de metal (treliça ou tubular) ou de concreto e podem ser ou não sustentadas por cabos tensores.

## **2.6. Sistema de Armazenamento de Energia**

Como o comportamento do vento muda ao longo do tempo, pode ser necessário a utilização de um sistema de armazenamento de energia que garanta o fornecimento adequado à demanda.

Nos casos em que a energia eólica é utilizada para complementar a produção de energia convencional, a energia gerada é injetada diretamente na rede elétrica, não sendo necessário o armazenamento de energia, bastando que o sistema elétrico convencional de base esteja dimensionado para atender à demanda durante os períodos de calmaria.

Quando a energia eólica é utilizada como fonte primária de energia, uma forma de armazenamento se faz necessária para adaptar o perfil aleatório de produção energética ao perfil de consumo, guardando o excesso de energia durante os períodos de ventos de alta velocidade, para usá-la quando o consumo não puder ser atendido por insuficiência de vento.

As formas mais conhecidas de armazenamento de energia eólica são através de baterias e sob a forma de energia potencial gravitacional.

## **2.7. Acessórios**

Os acessórios englobam todos os itens de apoio necessários ao funcionamento do sistema eólico. Incluem-se transmissões, freios, embreagens, eixos, acoplamentos e mancais que não apresentam nenhum problema tecnológico aos sistemas eólicos.



### 3. APLICAÇÕES DOS SISTEMAS EÓLICOS

Um sistema eólico pode ser utilizado em três aplicações distintas: sistemas isolados, sistemas híbridos e sistemas interligados à rede. Os sistemas obedecem a uma configuração básica, necessitam de uma unidade de controle de potência e, em determinados casos, conforme a aplicação, de uma unidade de armazenamento.

#### 3.1. *Sistemas Isolados*

Os sistemas isolados de pequeno porte, em geral, utilizam alguma forma de armazenamento de energia. Este armazenamento pode ser feito através de baterias ou na forma de energia potencial gravitacional com a finalidade de armazenar a água bombeada em reservatórios elevados para posterior utilização. Alguns sistemas isolados não necessitam de armazenamento, como no caso dos sistemas para irrigação onde toda a água bombeada é diretamente consumida.

Os sistemas que armazenam energia em baterias necessitam de um dispositivo para controlar a carga e a descarga da bateria. O *controlador de carga* tem como principal objetivo não deixar que haja danos ao sistema de bateria por sobrecargas ou descargas profundas.

Para alimentação de equipamentos que operam com corrente alternada (CA) é necessário a utilização de um *inversor*. Este inversor pode ser de estado sólido (eletrônico) ou rotativo (mecânico).

#### 3.2. *Sistemas Híbridos*

Os sistemas híbridos são aqueles que apresentam mais de uma fonte de energia como, por exemplo, turbinas eólicas, geradores Diesel, módulos fotovoltaicos, entre outras. A utilização de várias formas de geração de energia elétrica aumenta a complexidade do sistema e exige a otimização do uso de cada uma das fontes. Nesses casos, é necessário realizar um controle de todas as fontes para que haja máxima eficiência e otimização dos fluxos energéticos na entrega da energia para o usuário.

Em geral, os sistemas híbridos são empregados em sistemas de médio porte destinados a atender um número maior de usuários. Por trabalhar com cargas em corrente alternada, o sistema híbrido também necessita de um inversor. Devido à grande complexidade de arranjos e multiplicidade de opções, a forma de otimização do sistema torna-se um estudo particular a cada caso.

#### 3.3. *Sistemas Interligados à Rede*

Os sistemas interligados à rede não necessitam de sistemas de armazenamento de energia pois toda a geração é entregue diretamente à rede elétrica. Estes sistemas representam uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual estão interligados.



Os sistemas eólicos interligados à rede apresentam as vantagens inerentes aos sistemas de geração distribuída tais como: a redução de perdas, o custo evitado de expansão de rede e a geração na hora de ponta quando o regime dos ventos coincide com o pico da curva de carga.



## 4. PROJETOS IMPLEMENTADOS NO BRASIL

Estado	Local	Geradores	Capacidade Instalada	Produção Anual Prevista	Estado Atual
Ceará	Taíba	ENERCON	5 MW	17.500 MWh	Operação
	Prainha	ENERCON	10 MW	35.000 MWh	Operação
	Mucuripe	TAKE	1,2 MW	3.800 MWh	Operação
	Paracurú	-	30 MW	-	Estudo
	Camocim	-	30 MW	-	Estudo
Minas Gerais	Morro do Camelinho	TAKE	1,0 MW	800 MWh	Operação
Pará	Vila Joanes	BERGEY	40 KW	-	Operação
	Costa NE	-	100 MW	-	Estudo
Paraná	Palmas I	ENERCON	2,5 MW	7.000 MWh	Operação
	Palmas II	ENERCON	9,5 MW	-	Estudo
	Palmas III	ENERCON	75 MW	-	Estudo
Pernambuco	F. Noronha	FOLKCENTER	75 KW	-	Operação
Rio de Janeiro	Cabo Frio	-	10 MW	-	Estudo