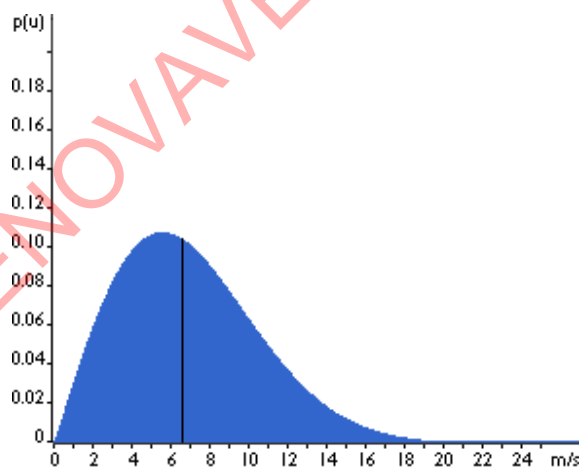


Energia produzida

Para a indústria eólica é muito importante a descrição da variação da velocidade do vento. Os projetistas de turbinas necessitam da informação para otimizar o desenho de seus geradores, assim como minimizar os custos de geração.

Distribuição de Weibull

Se medimos a velocidade do vento ao longo de um ano em que a maioria de fortes vendavais são raros, isso quer dizer que os ventos calmos e moderados são bastantes comuns. A variação do vento em uma localização típica sugere ser descrita pela chamada distribuição de Weibull.



© 1998 www.WINDPOWER.org

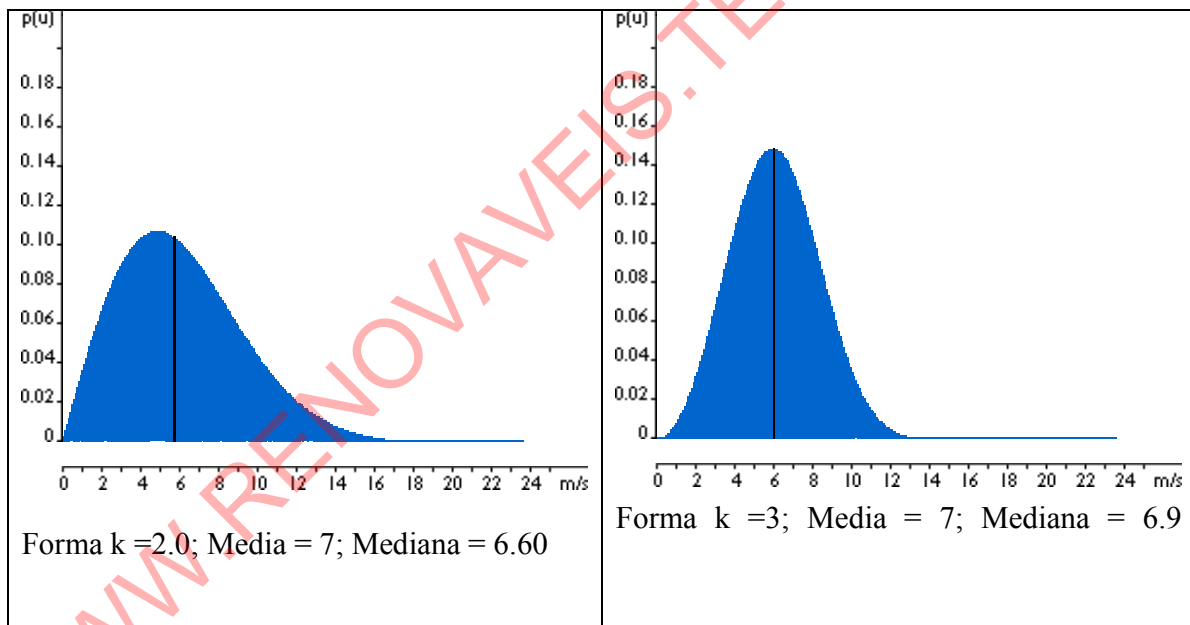
Esta localização particular tem uma velocidade média de vento de 7 m/s e a forma da curva está determinada por um parâmetro de forma k igual a 2.

Descrição estatística das velocidades do vento

Quem está familiarizado com estatística verá que o gráfico mostra uma distribuição de probabilidade. A área da curva vale exatamente 1 e que a probabilidade de que o vento sopre a qualquer das velocidades, incluindo o zero deve ser de 100%. A metade da área azul está a esquerda da linha preta vertical a 6,6 m/s. Os 6,6 m/s são a mediana da distribuição. Isto significa que a metade do tempo o vento soprará a menos de 6,6 m/s, a outra metade soprará a mais de 6,6 m/s. Podemos perguntar porque dizemos que a velocidade do vento média é de 7 m/s. A velocidade média é realmente a média das observações da velocidade do vento que teremos nessa localização. Como pode ver, a distribuição das velocidades do vento não é simétrica. As vezes terá velocidades de vento muito alta, porém são raras. Por outro lado, as velocidades de vento de 5,5 m/s são mais comuns. Os 5,5 m/s são chamados de valor modal da distribuição. Se multiplicarmos cada intervalo incremental da velocidade do vento pela probabilidade de tender essa velocidade particular, e somamos todos, obteremos a velocidade do vento médio. A distribuição estatística das velocidades do vento varia de um lugar a outro do globo, dependendo das condições climáticas locais, da paisagem e de sua superfície. Portanto, A distribuição de Weibull pode variar tanto em forma como em valor médio. Se o parâmetro de forma é 2, como o gráfico, a distribuição é conhecida como distribuição de Rayleigh. Os fabricantes de aerogeradores produzem gráficos de rendimento para suas máquinas usando a distribuição de Rayleigh.

Formas de curvas da distribuição de Weibull.

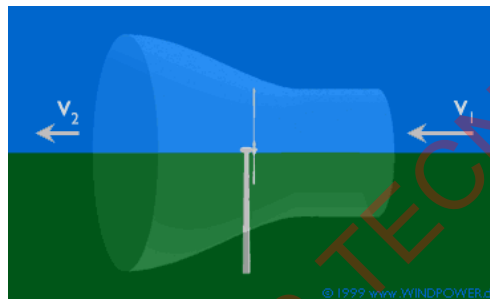
Teremos uma idéia das diferentes formas que adotam a distribuição de Weibull. A velocidade média do vento ou o parâmetro de escala sugere indicar de como é o vento, em média, na localização. O parâmetro de forma k indica como é pontiaguda a distribuição. Isso quer dizer que as velocidades do vento sempre tendem a estar próximas a um certo valor.



Lei de Betz (1926)

A lei de Betz diz que somente menos de 16/27 (59%) da energia cinética do vento pode ser convertida em energia mecânica usando um aerogerador.

Demonstração da lei de Betz



Consideremos que a velocidade média do vento através da área do rotor seja

$$v = (v_1 + v_2)/2$$

A massa da corrente de ar através do rotor durante um segundo é

$$m = \rho F (v_1 + v_2)/2$$

A potência do vento extraída pelo rotor é

$$P = (1/2) m (v_1^2 - v_2^2)$$

Substituindo a expressão de m nesta equação, teremos

$$P = (\rho/4) (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) F$$

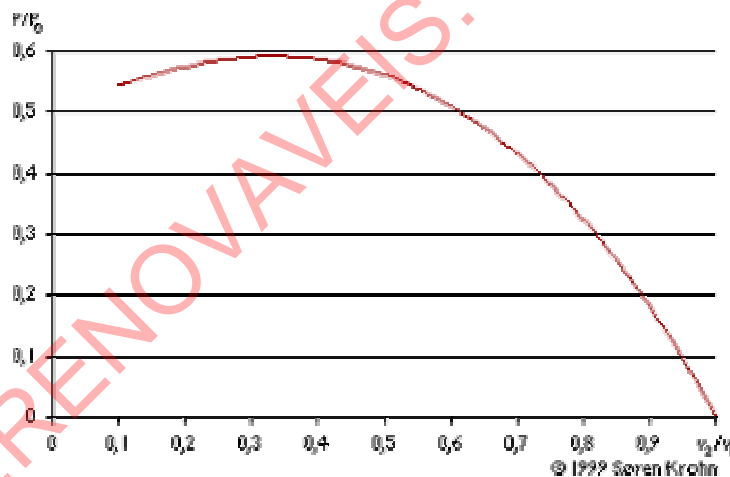
Agora comparemos esse resultado com a potência total de uma corrente de vento sem perturbação através da mesma área F . Chamemos essa potência de P_0 :

$$P_0 = (\rho/2) v_1^3 F$$

A razão entre a potência que extraímos do vento e a potência do vento sem perturbação é

$$(P/P_0) = (1/2) (1 - (v_2 / v_1)^2) (1 + (v_2 / v_1))$$

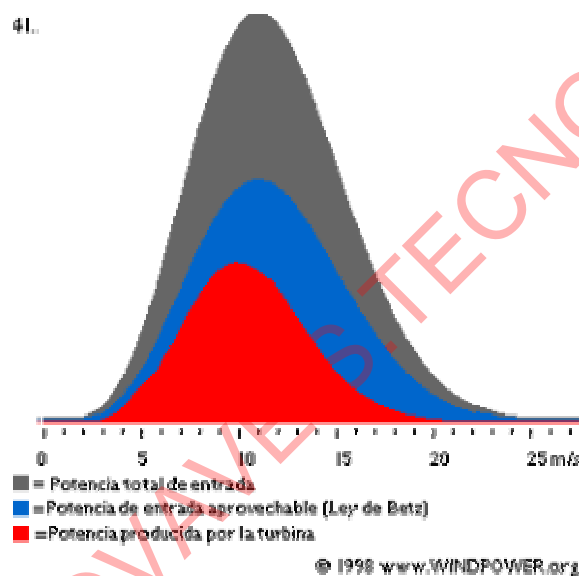
Podemos construir o gráfico de (P/P_0) em função de v_2/v_1



Podemos ver que a função alcança seu máximo para $(v_2/v_1 = 1/3)$ e que o valor máximo para a potência extraída do vento é de 0.59 vezes ou $16/27$ da potência total do vento.

Densidade de potência

Sabemos que o potencial de energia por segundo varia proporcionalmente com o cubo da velocidade do vento e proporcional a densidade do ar.



Se multiplicarmos a potência de cada velocidade do vento com a probabilidade de cada velocidade do gráfico de Weibull, teremos calculado a distribuição de energia eólica a diferentes velocidades, que é igual a densidade de potência. Observe que a curva de Weibull muda de forma devido a que as altas velocidades de vento têm a maior parte da potência.

Da densidade de potência à potência disponível

O gráfico anterior foi construído usando um programa de cálculo de potência de um aerogerador. A área abaixo da curva cinza nos dá a quantidade de potência eólica por metro quadrado de fluxo de vento que pode esperar-se nesta localização particular. Neste caso temos uma velocidade de vento média de 7 m/s e um $k=2$ (Weibull), para tal teremos 402 W/m². Observe que esta é quase o dobro da obtida quando o vento sopra constantemente a velocidade média.

A área da abaixo da curva azul indica que quantidade de potência pode ser teoricamente convertida em potência mecânica (lei de Betz).

A área da curva vermelha nos dá qual a potência elétrica que um aerogerador produzirá nesse local.

Mensagens importante do gráfico

O mais importante é observar que a maior parte da energia eólica se encontrará a velocidades em torno da velocidade média do vento na localização.

Velocidade de conexão (CUT IN)

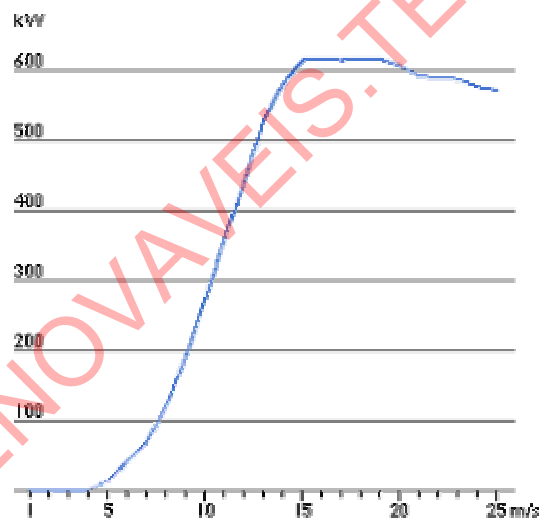
Normalmente os aerogeradores estão projetados para começar a girar a velocidades em torno de 3-5 m/s. É chamada de velocidade de conexão. A área da esquerda mostra a pequena quantidade de potência perdida devido ao fato da turbina começar a funcionar a partir de, digamos, 5 m/s.

Velocidade de corte (CUT OFF)

O aerogerador é programado para freiar as altas velocidades de vento, 25 m/s, para evitar possíveis danos a turbina ou em seu arredor. Essa velocidade é denominada de velocidade de corte. A pequena área em azul a direita representa a potência perdida.

Curva de potência de um aerogerador

A curva de potência de um aerogerador é um gráfico que indica qual será a potência elétrica disponível no aerogerador para diferentes velocidades de vento.



© 1998 www.WINDPOWER.org

O gráfico mostra uma curva de potência de um típico aerogerador Dinamarquês de 600 kW. As curvas de potência se obtêm a partir de medidas realizadas em campo, onde um anemômetro é colocado sobre um mastro perto do aerogerador. Se a velocidade do vento não está variando demasiadamente rápida, podem usar as velocidades do vento realizadas com o anemômetro e ler as potências elétricas disponíveis diretamente do aerogerador.

Incertezas em medições de curva de potência

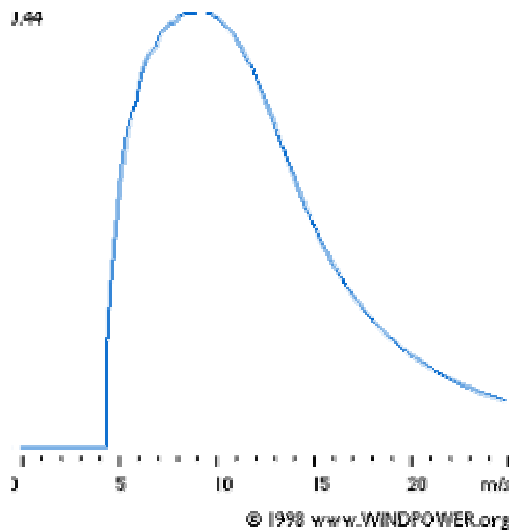
Pode-se ver que a curva não é bem definida. O motivo é que na prática a velocidade do vento sempre flutua e não se pode medir exatamente o vento que passa através do rotor do aerogerador. Assim, na prática, se deve tomar um valor médio das velocidades medidas para cada velocidade do vento e construir o gráfico com esses valores médios. Se há 3% de erros nas medições de velocidades, a energia do vento pode ser 9% superior ou inferior. Em consequência, podem existir erros de até 10% em curvas certificadas.

Riscos no uso das curvas de potência

Uma curva de potência não indicará quanta potência produzirá a uma certa velocidade média de vento. É muito importante a forma que se chegou a esse valor médio, que dizer, se os ventos variam muito ou se sopram a uma velocidade relativamente constante. Também, pode lembrar-se que a maior parte da energia eólica está disponível as velocidades de vento que são o dobro da velocidade de vento mais comum numa certa localização. Finalmente, deve ter-se em conta que a turbina pode não estar funcionando a temperatura e pressão padrão do ar, conseqüentemente, fazer correções na densidade do ar.

Coeficiente de potência

O coeficiente de potência indica com que eficiência o aerogerador converte a energia do vento em eletricidade.



Mede-se o coeficiente de potência, simplesmente dividindo a potência elétrica disponível pela potência eólica de entrada. Em outras palavras, tomamos a curva de potência e a dividimos pela área do rotor para obter a potência disponível por metro quadrado de área do rotor. Posteriormente, para cada velocidade de vento, dividimos o resultado pela quantidade de potência por metro quadrado.

Como pode observar, a eficiência mecânica maior do aerogerador, 44%, se dá na velocidade ao redor de 9 m/s. Este valor foi escolhido pelos engenheiros que projetaram a turbina. A eficiência interessa, sobretudo, na região de velocidades de vento onde se encontra a maior parte da energia.

Guia de cálculo da potência de um aerogerador

Utilização da curva de potência e da distribuição de Weibull

Para cada pequenos intervalos de 0.1 m/s (por exemplo) da velocidade de vento, multiplicamos a probabilidade desse intervalo de velocidade, da curva de Weibull, pelo valor obtido da curva de potência do aerogerador. Depois fazemos a soma de todas essas multiplicações para obter a potência disponível média (o valor médio). Se multiplicarmos a potência por 365,25 por 24 (número de horas em um ano) obtemos a energia disponível total em um ano.

Dados da localização

Temperatura=15°, altitude do local=0,0m,
densidade=1,225652Kg/m³.

Dados da distribuição do vento

Parâmetro de forma de Weibull k=2, velocidade média do vento=7m/s, altura de medição do vento=50m, comprimento da rugosidade==0,055m, classe de rugosidade=1,5.

Dados do aerogerador

Seleção da turbina: fabricante, potência=600kW. Velocidade de vento para conexão=5m/s, velocidade de corte=25m/s, diâmetro do rotor=43m e altura do cubo=50m.

Curva de potência do aerogerador

m/s...	...kW	m/s...	...kW	m/s...	...kW
1	0	11	444	21	592
2	0	12	533	22	590
3	2	13	584	23	580
4	17	14	618	24	575
5	45	15	619	25	570
6	72	16	618	26	0
7	124	17	619	27	0
8	196	18	620	28	0
9	277	19	610	29	0
10	364	20	594	30	0

Resultados

Resultado da potência de saída no local :

Potência de entrada = 402 W/m² de área de rotor

Máxima potência de entrada a 11,2 m/s

Velocidade média do vento na altura do cubo = 7 m/s

Resultado da potência de saída da turbina

Potência de saída = 123 W/m²

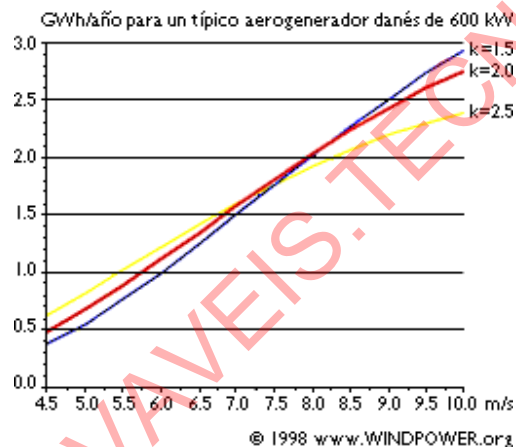
Energia produzida = 1078 kWh/m²/ano

Energia produzida = 1.565.789 kWh/ano

Fator de carga = 30 %

Energia anual disponível em um aerogerador

Agora estamos com condições de calcular a relação entre as velocidades de vento média e a energia anual disponível em um aerogerador.



Para cada um dos parâmetros de Weibull, 1,5 2,0 e 2,5, foi calculado a energia anual disponível a diferentes velocidades de vento médio a altura do cubo do aerogerador.

Como pode ver, a uma velocidade média de vento menor que 4,5 m/s, a energia disponível pode variar até 50% dependendo do fator de forma, enquanto que a uma velocidade acima de 10 m/s, pode variar em torno de 30%.

A saída varia com o cubo da velocidade do vento

Verifique a curva vermelha com $k=2$, que é a curva que os fabricantes normalmente mostra. Com a velocidade média do vento de 4,5 m/s a máquina gerará em torno de 500.000 kWh/ano. Com uma velocidade média de 9,0 m/s gerará 2.400.000 kWh/ano. Assim, ao dobrar a velocidade média do vento a produção de energia foi aumentada de 4,8 vezes.

Se em vez disso tivéssemos comparado 5 com 10 m/s obteríamos uma produção de quase 4 vezes maior.

A razão de não obtermos o mesmo resultado é que a eficiência dos aerogeradores varia com as velocidades do vento, como na curva de potência.

Fator de carga

Outra forma de conhecer a produção anual de energia de um aerogerador é verificar o fator de carga de uma turbina em sua localização particular. Com o fator de carga, queremos dizer a produção anual de energia dividida pela produção teórica máxima, se a máquina tiver funcionando com sua potência nominal máxima durante as 8766 horas do ano.

Exemplo: se uma turbina de 600 kW produz 1.500.000 de kWh no ano, seu fator de carga é $1.500.000 / (365,25 * 24 * 600) = 0.285$ ou 28,5%.

Os fatores de carga podem variar na teoria de 0 a 100%. Ainda que na prática a faixa de variação seja de 20 a 70%. O mais comum é em torno de 20 a 30%.