



Departamento de Física

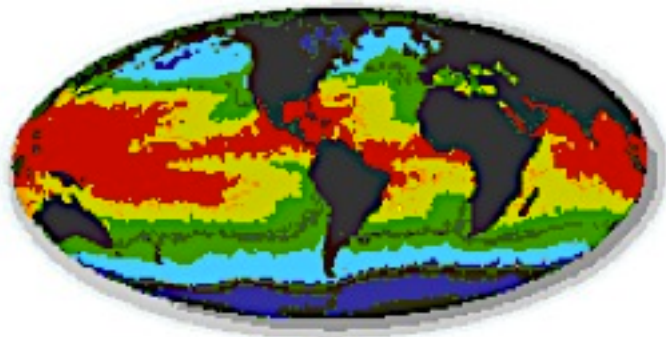
Energia Eólica



Energia – do carbono às renováveis
3º Ano da Licenciatura em Ciências do Ambiente

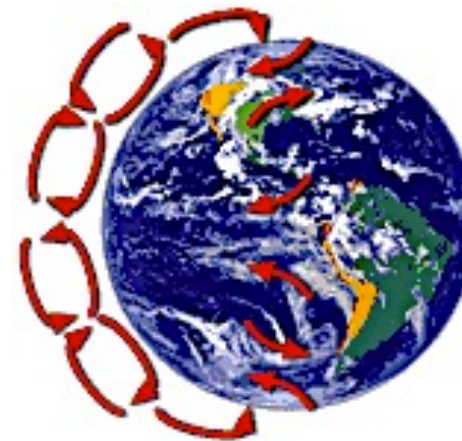


- A origem do vento está diretamente relacionada com as diferenças de temperatura em diferentes regiões do Globo. As regiões próximas do equador (i.e. a latitudes próximas de 0°) são muito mais aquecidas pelo sol do que todas as restantes zonas do planeta. A figura mostra a distribuição da temperatura do planeta medida pelo satélite NOAA – 7 da NASA.



- ✓ Nesta imagem por infravermelho, as regiões mais quentes estão indicadas pelas cores vermelho, laranja e amarelo, enquanto que as mais frias pelas cores verde, azul – claro e escuro.

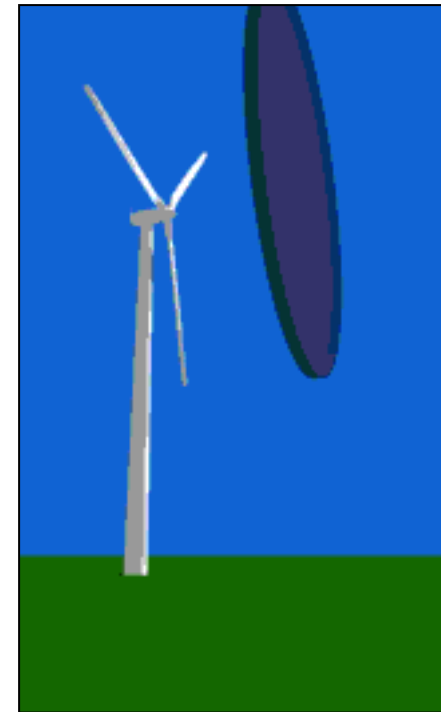
- O ar quente, sendo mais leve (menos denso) do que o ar frio, sobe através da atmosfera até a uma altitude de aproximadamente 10 km e em seguida espalha-se para os polos Norte e Sul. A deslocação do ar a partir de regiões próximas do equador (ar mais quente) cria zonas de baixa pressão; por consequência, estas regiões são “preenchidas” por ar mais frio oriundo dos polos onde existem regiões de altas pressões, devido ao arrefecimento do ar. É esta movimentação de massa de ar que origina o vento.



A Energia do Vento : Densidade do Ar e Área do Rotor

Energia Eólica

- A energia “motriz” de um aerogerador advém da sua capacidade em converter a força exercida pelo vento num momento de força (provoca movimento de rotação) que actua sobre as suas pás (lâminas). A quantidade de energia que o vento transfere em cada segundo para o rotor depende diretamente da **densidade do ar**, da **velocidade do vento** e da **área do rotor** (área de giro das lâminas). A figura mostra esquematicamente uma turbina eólica típica (1 MW), onde uma “fatia” cilíndrica de ar com 1m de espessura está a mover-se através do rotor com um diâmetro de 54 m (área de aproximadamente 2300 m²).



A Energia do Vento : Densidade do Ar e Área do Rotor

Energia Eólica

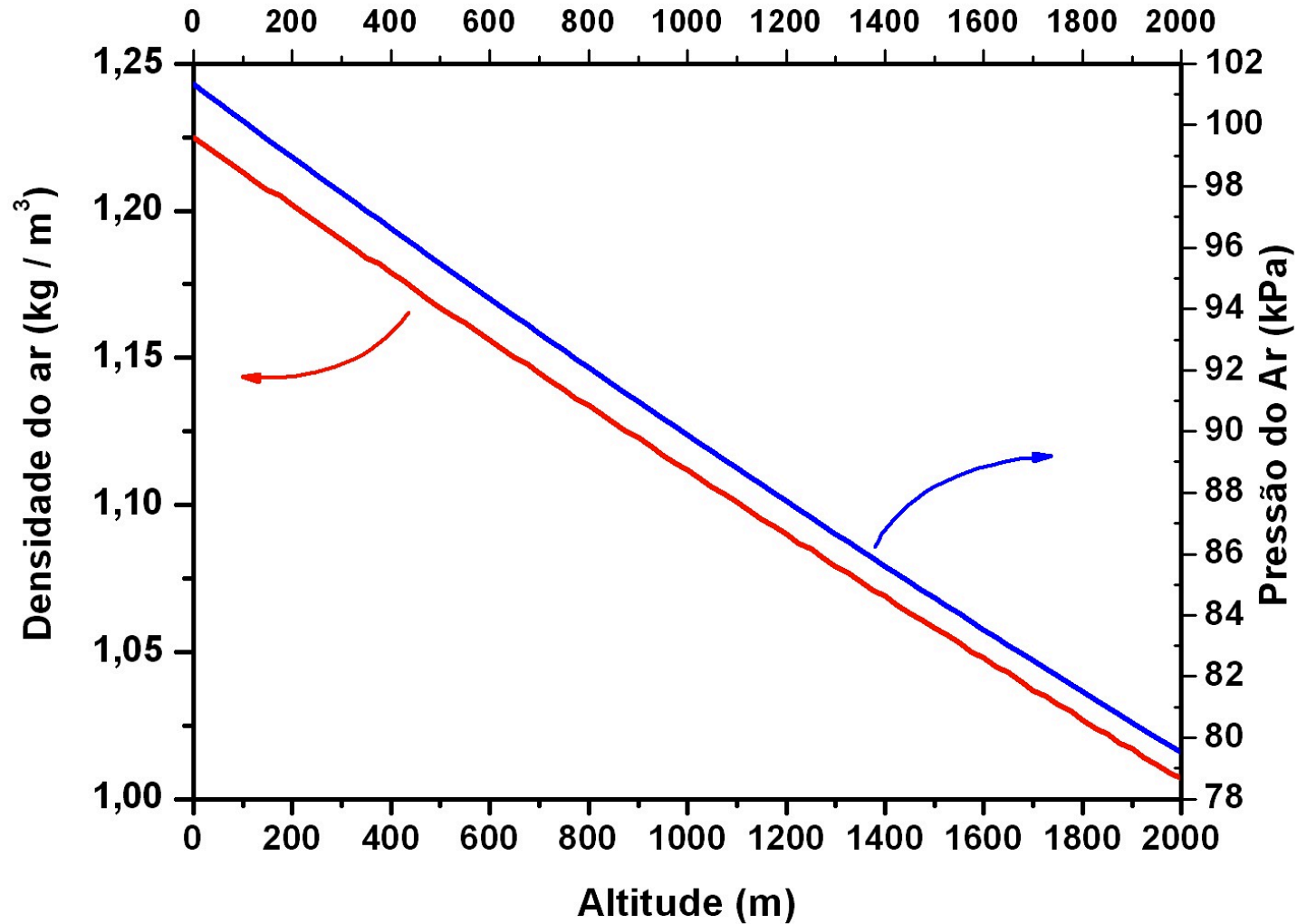
- A energia cinética de um corpo depende directamente da sua massa. Por isso, a energia cinética do vento depende directamente da densidade do ar (ou seja da massa por unidade de volume). Por outras palavras, quanto mais denso for o ar (mais pesado) maior será a energia cinética recebida pela turbina eólica.
- ✓ Por outro lado, a densidade do ar depende da pressão atmosférica e da temperatura do ar que por sua vez dependem da altitude o lugar. Para locais situados a grande altitude (montanhas) a pressão atmosférica é mais baixa e o ar é menos denso. Por exemplo, ao nível do mar (ou seja, altitude nula e pressão atmosférica normal ; 1 atm = 101,325 kPa) a temperatura do ar é de aproximadamente 15°C e a sua densidade é igual a 1,225 kg/m³. Deste modo, uma “fatia” cilíndrica de ar com 1m de espessura que se mova através de um rotor com um diâmetro de 54m tem uma massa, ***m*** aproximadamente igual a :

$$m = \rho \times A \times e = (1,225 \text{ kg / m}^3) \cdot [(\pi \times 54^2 / 4) \text{ m}^2] \cdot (1 \text{ m}) \approx 2,8 \text{ ton}$$



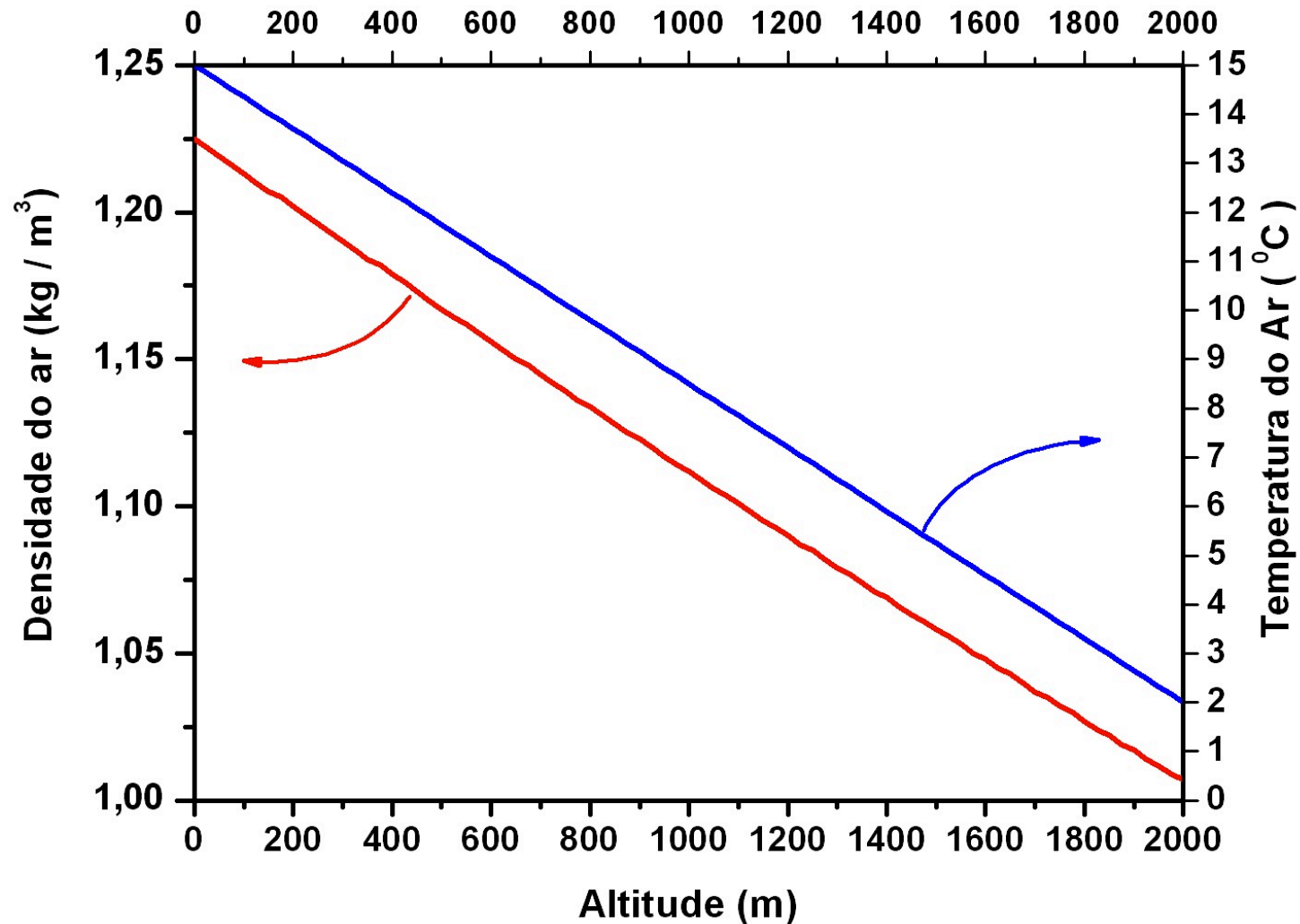
Variação da densidade e da pressão do Ar com a altitude

Energia Eólica



Variação da densidade e da temperatura do Ar com a altitude

Energia Eólica

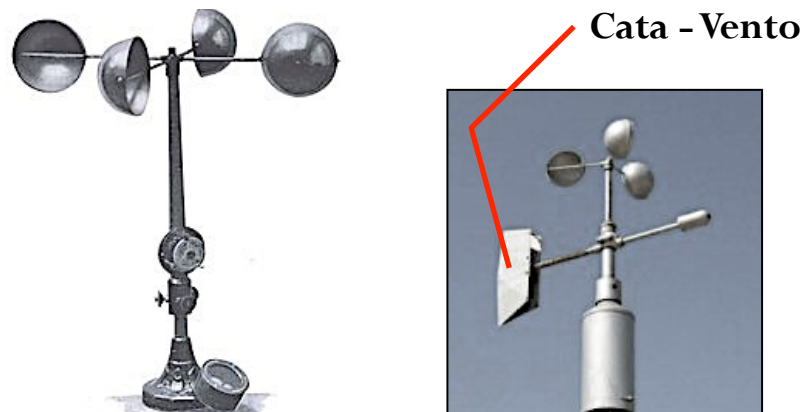


- ✓ A quantidade de energia que o vento transfere em cada segundo para o rotor é designada por potência do vento. A velocidade do vento, v é um parâmetro extremamente importante para determinar a quantidade de energia que uma turbina eólica consegue converter em energia eléctrica. A potência (extraída) do vento, P_v que atravessa uma área circular, A é calculada de acordo com a seguinte expressão:

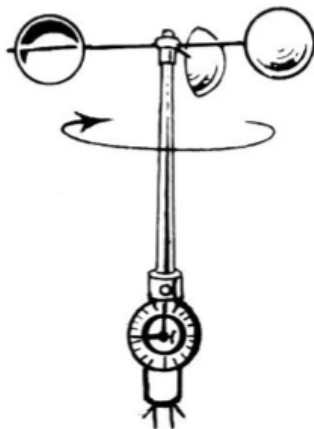
$$P_v = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad \Leftrightarrow \quad P_v = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) v^3$$

onde P_v é a potência extraída do vento medida em W (Watt), ρ é a densidade do ar medida em kg/m^3 , D representa o diâmetro do rotor medido em m (metros) e v corresponde à velocidade do vento medida em m/s .

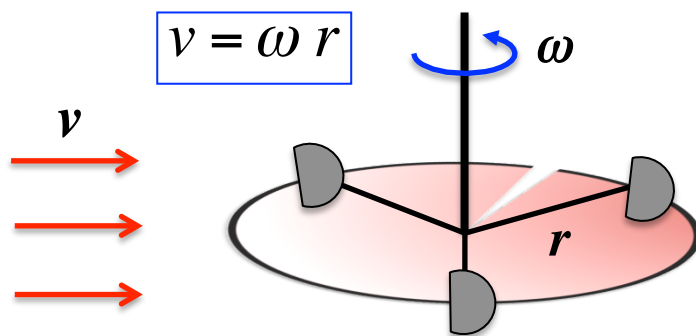
- ✓ A medida da velocidade do vento é habitualmente efectuada através de um anemómetro de copos, esquematicamente representado na figura.



- ✓ O anemómetro possui um eixo vertical de rotação e utiliza três ou quatro copos para capturar o vento. Além disso, este aparelho pode ainda incorporar um cata – vento que serve para determinar a direcção do vento. Na prática, a velocidade do vento v é calculada a partir da velocidade angular de rotação ω (em RPM).



- ✓ **Exemplo :** Um estudante, munido de um cronómetro, verificou que ao fim de 1 minuto o anemómetro executou 250 rotações. Sabendo que $r = 20$ cm, calcule a velocidade do vento.

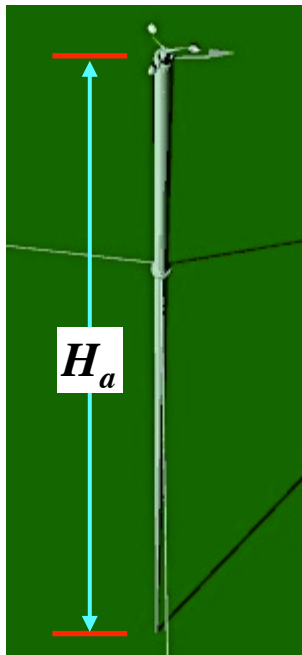


$$1 \text{ rotação} = 2\pi \text{ rad} \quad ; \quad 1 \text{ min} = 60 \text{ s}$$

$$\omega = 250 \text{ rpm} \quad \Leftrightarrow \quad \omega = \frac{250 \times 2\pi}{60} \text{ rad/s}$$

$$v = \left(\frac{250 \times 2\pi}{60} \text{ rad/s} \right) \cdot (0,2 \text{ m}) \approx 5,24 \text{ m/s}$$

- ✓ Na prática, a melhor maneira de se medir a velocidade do vento consiste em colocar o anemómetro no topo de um mastro que tenha uma altura (altura do anemómetro, H_a) igual à altura da turbina eólica H .



- ✓ Este procedimento, evita a necessidade de se ter que efectuar um cálculo adicional que consiste em determinar a velocidade média do vento à altura da turbina eólica, V_H a partir da velocidade média do vento medida à altura do anemómetro (\bar{v}). Contudo, nem sempre é possível realizar este procedimento, já que turbinas eólicas de grande potência (2 MW) integram torres de elevada dimensão ($H = 75$ m). Nestas situações, a velocidade média do vento à altura da turbina eólica é calculada de acordo com a seguinte expressão :

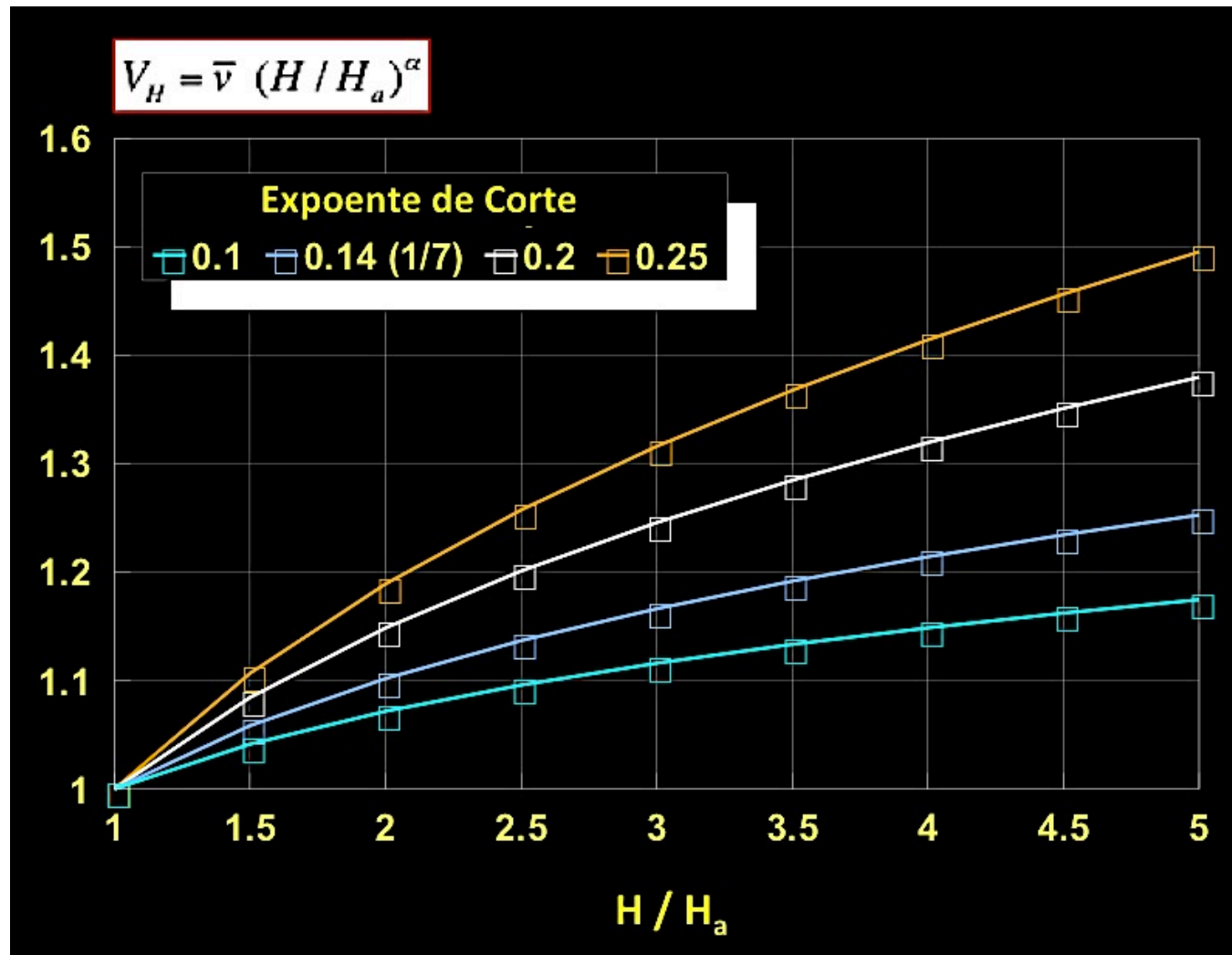
$$V_H = \bar{v} \left(\frac{H}{H_a} \right)^\alpha$$

- onde α é o denominado expoente de corte do vento (do inglês : ‘Wind Shear Exponent’). O expoente α está diretamente relacionado com a rugosidade do terreno onde está implantada a turbina eólica. Normalmente, adopta-se para α o valor de “1/7”. Para terrenos acidentados ou de elevada turbulência, usa-se o valor de “1/5”.
Para terrenos relativamente planos usa-se o valor de “1/100”. Por outro lado, na eventualidade de se desconhecer a altura do anemómetro, isto é a altura para a qual se avaliou a velocidade média do vento, então deve-se considerar $H_a = 10$ m.











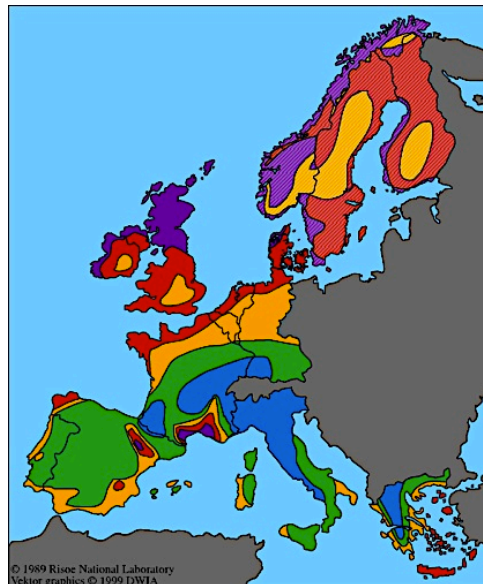
Variação da velocidade do vento com a altura

Energia Eólica



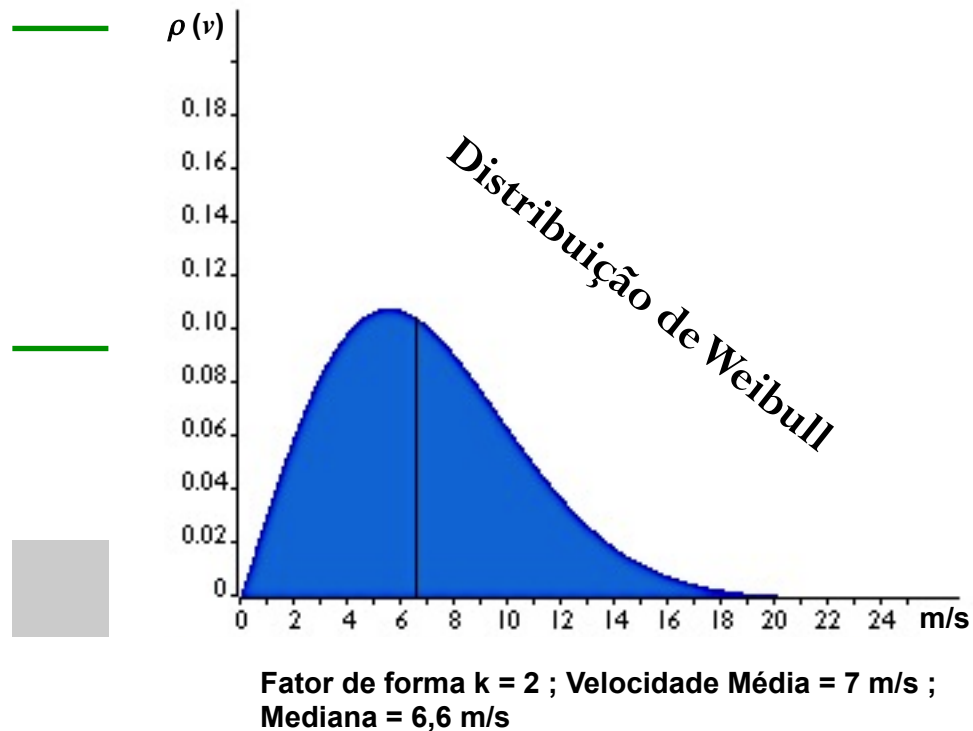
Wind Resources at 50 (45) m Above Ground Level

Colour	Sheltered terrain		Open plain		At a sea coast		Open sea		Hills and ridges	
	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²
	>6.0	>250	>7.5	>500	>8.5	>700	>9.0	>800	>11.5	>1800
	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
	4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0-8.5	400-700
	<3.5	<50	<4.5	<100	<5.0	<150	<5.5	<200	<7.0	<400
			>7.5							
			5.5-7.5							
			<5.5							



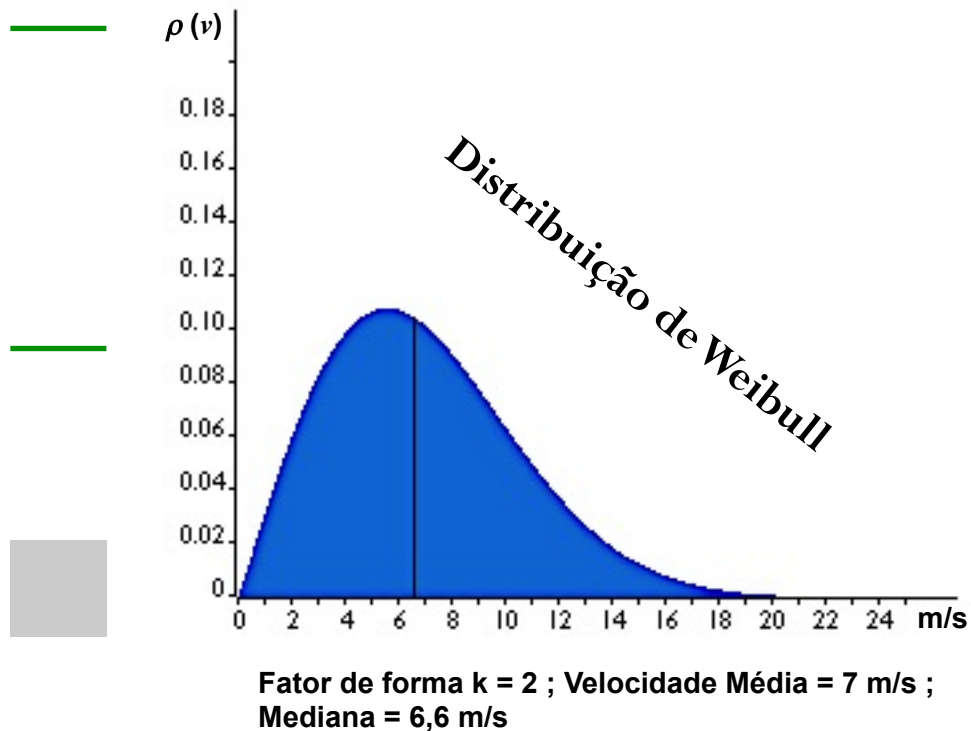
- A descrição da variação da velocidade do vento é um aspecto muito importante para os operadores da indústria eólica. Na verdade, os projetistas de turbinas eólicas precisam de recorrer a esta informação afim de optimizarem o projeto das turbinas e deste modo, conseguirem minimizar os custos de produção de energia eléctrica.
- Se ao longo do ano efetuarmos medidas da velocidade do vento, rapidamente podemo-nos aperceber que para a maioria dos locais é muito raro detetar a ocorrência de ventos muito fortes (tipo vendaval). Pelo contrário, é muito comum a ocorrência de ventos com velocidade moderada. Para um determinado local, a descrição da variação da velocidade do vento é efectuada através da designada **distribuição de Weibull**, conforme mostrado na figura.

- Quem esteja familiarizado com a estatística facilmente reconhece que este gráfico mostra uma distribuição de densidade de probabilidade.



- A área abaixo da curva é exatamente igual a 1, já que a probabilidade total de o vento soprar a qualquer velocidade compreendida no intervalo considerado (incluindo zero) deve ser 100%. Note-se que metade da área da curva está concentrada no lado esquerdo da linha vertical a 6,6 m/s. Esta velocidade é denominada por mediana da distribuição.

- A mediana significa que em metade do tempo, o vento soprará com uma velocidade inferior a 6,6 m/s, e na outra metade soprará com uma velocidade superior a 6,6 m/s.



- Na verdade, o valor médio da velocidade do vento corresponde à média das velocidades observadas para um determinado local. Isto não significa que por exemplo, num determinado momento não possamos ter velocidades de 16 m/s ; contudo este valor ocorre muito raramente. Se multiplicarmos cada velocidade do vento, pela probabilidade da ocorrência desse valor particular de velocidade e somarmos tudo, então obtém-se a velocidade média do vento.

- Se o **fator de forma, k** for igual a 2, como acontece para a distribuição mostrada na figura da página anterior, então a distribuição é designada por distribuição de Rayleigh.
- A função de densidade de probabilidade de Weibull representa a probabilidade $\rho(v)$ de ocorrer ao longo do ano uma determinada velocidade de vento v . Esta função, é calculada de acordo com a seguinte equação:

$$\rho(v) = \left(\frac{k}{C}\right) \left(\frac{v}{C}\right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{v}{C}\right)^k \right]$$

- ✓ Esta expressão é válida para $k > 1$, $v \geq 0$ e $C > 0$. Por outro lado, o factor de forma **k** é designado pelo utilizador. Este factor, é tipicamente escolhido num intervalo de valores entre 1 a 3, onde para a maioria das aplicações, o valor adoptado é 2. Para uma dada velocidade do vento, um factor de forma pequeno indica uma distribuição relativamente larga das velocidades do vento em torno da velocidade média, enquanto que um factor de forma elevado indica o contrário.

- Entretanto, C representa o **parâmetro de escala** que é calculado a partir da seguinte equação :

$$C = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1+1/k)}$$

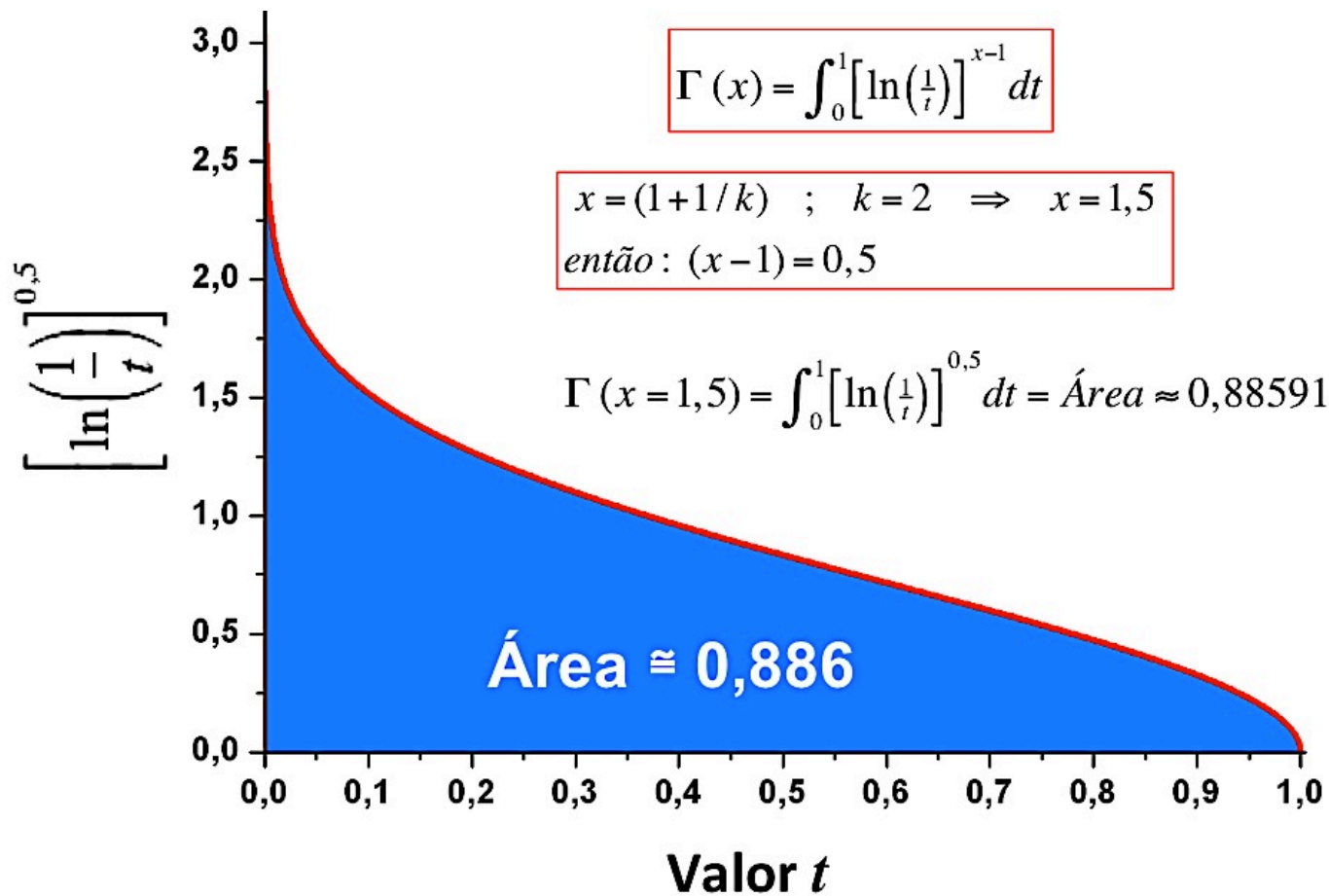
- Onde \bar{v} representa a velocidade média do vento medida à altura do anemómetro, ou então, a velocidade média do vento calculada à altura do rotor (determinada a partir da velocidade média do vento medida à altura do anemómetro, conforme a equação da página 11).

- Por outro lado, Γ representa a função **gamma** que é calculada conforme a seguinte expressão :

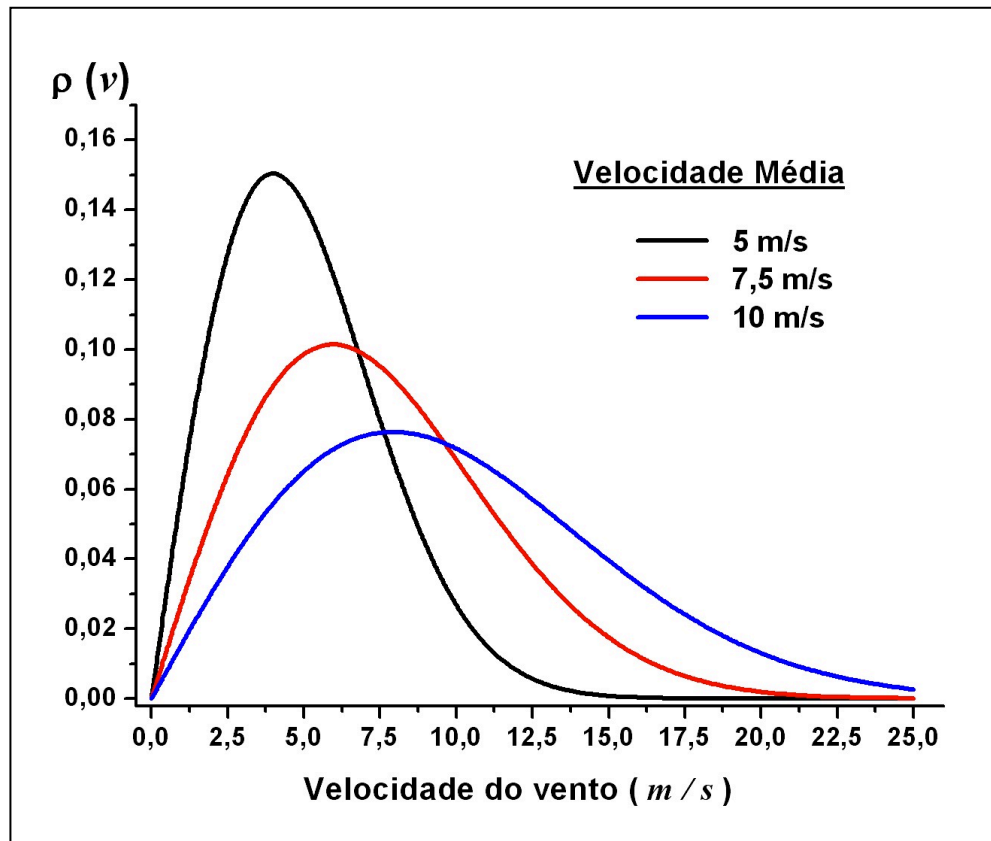
$$\Gamma(x) = \int_0^1 \left[\ln\left(\frac{1}{t}\right) \right]^{x-1} dt$$

✓ onde neste caso : $x = (1+1/k)$

- Por exemplo, a figura mostra a função Γ para o caso em que $k = 2$.



- A figura mostra a **distribuição de Weibull** (caso em que $k = 2$) para diferentes velocidades médias do vento.

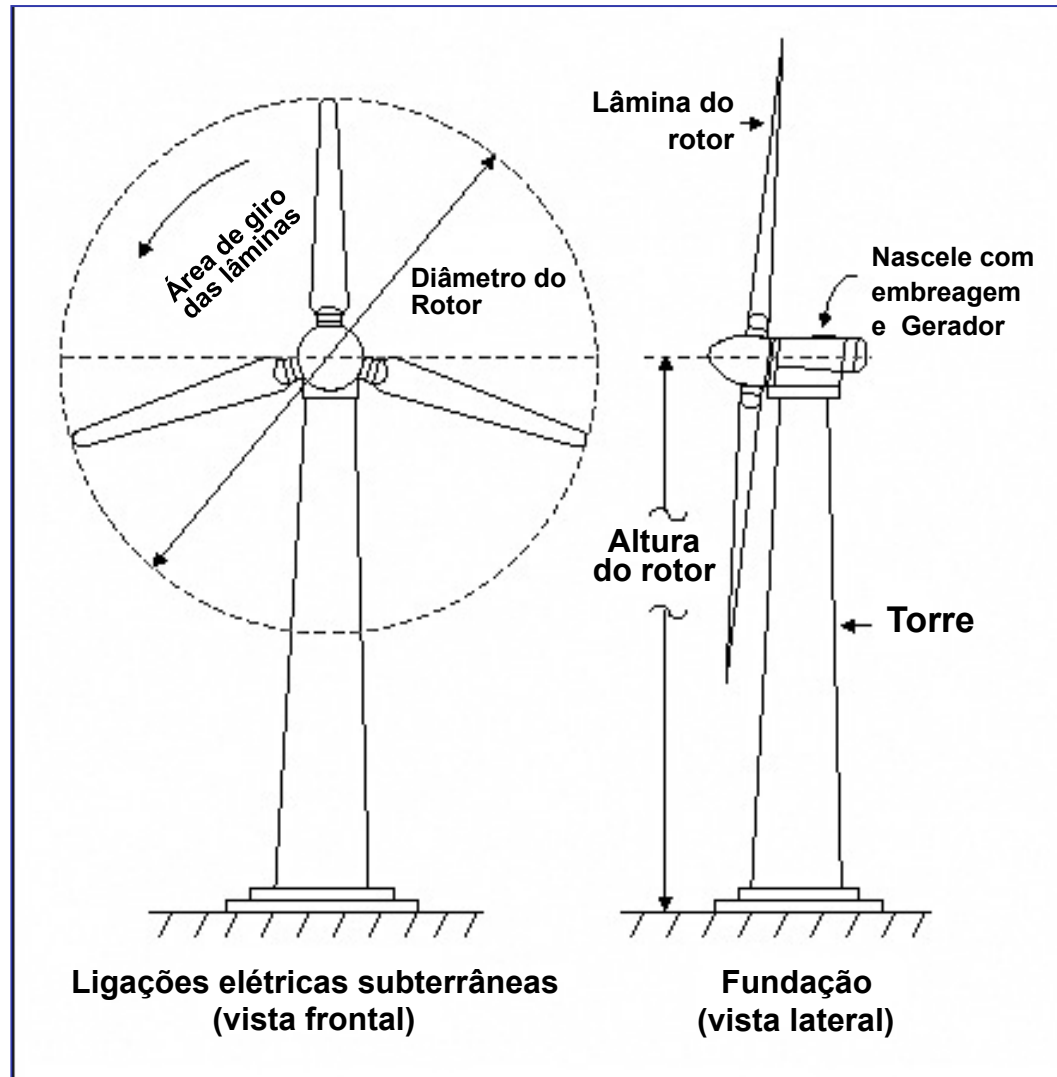


$$\rho(v) = \left(\frac{k}{C}\right) \left(\frac{v}{C}\right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{v}{C}\right)^k \right]$$



Descrição da Turbina Eólica

Energia Eólica



- **Componentes**

- Rotor
- Embreagem
- Torre
- Fundação
- Lâminas
- Gerador

- **Tipos**

- Eixo horizontal
 - Mais comum
 - Controles movimentam o rotor contra o vento

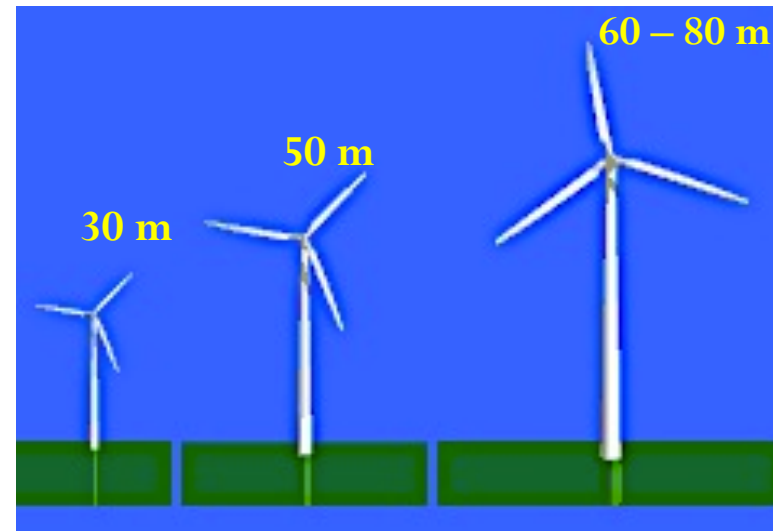


A torre da turbina eólica suporta o nascele e o rotor. Geralmente, é vantajoso usar uma torre alta, uma vez que a velocidade do vento aumenta com a distância ao solo. Uma turbina moderna de 1 MW tem uma torre com 50 a 80 metros (corresponde à altura de um edifício com cerca de 17 – 27 andares)



- ✓ As torres podem ser tubulares (tal como as mostradas nas figuras) ou torres em treliça. As torres tubulares são mais seguras para os técnicos que efetuam a manutenção das turbinas, já que podem utilizar uma escada interior para alcançar o seu topo.

Torres eólicas tubulares



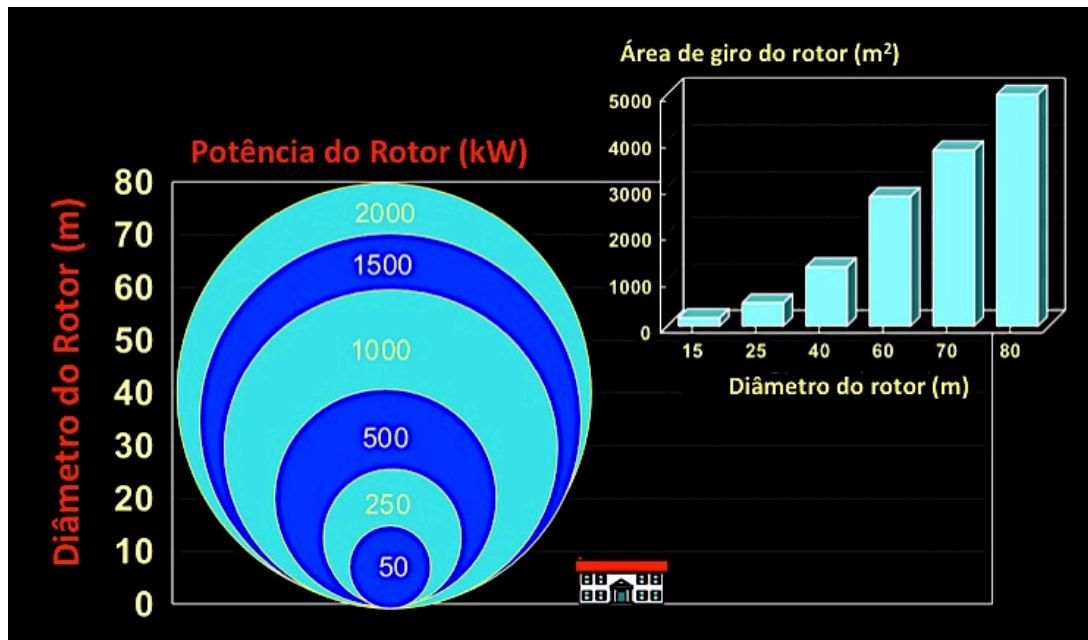
Componentes da Turbina Eólica

Energia Eólica

O tamanho das turbinas eólicas

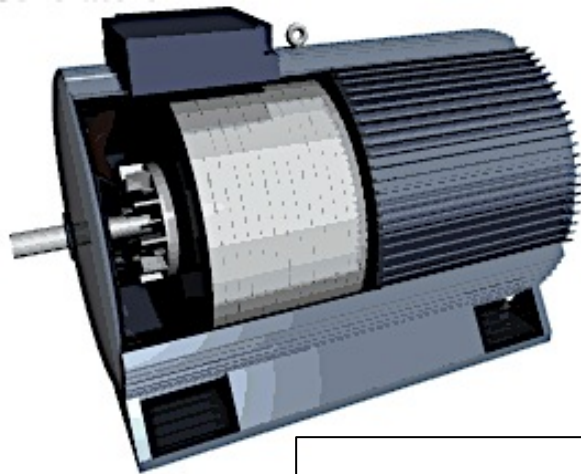


Sistema mecânico de travagem

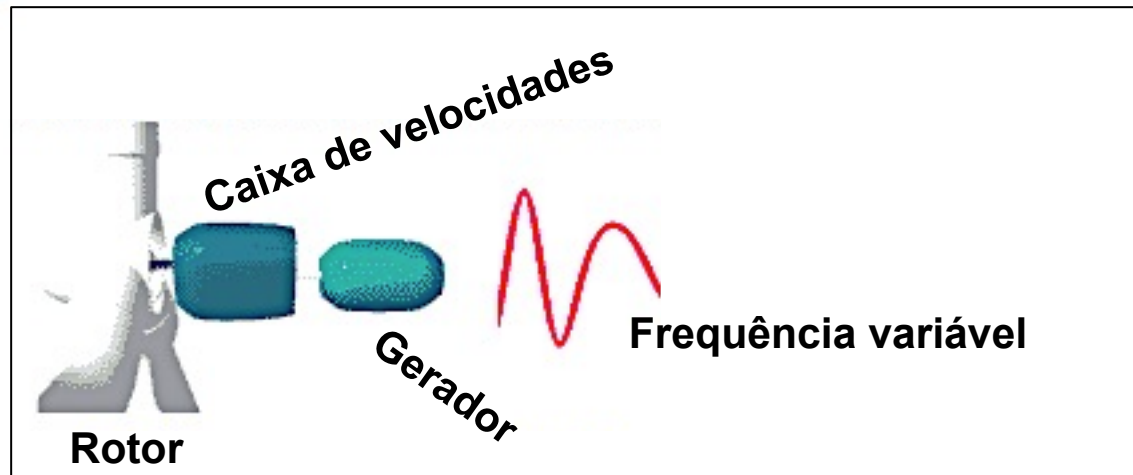


Relação entre a potência e o diâmetro do rotor

O gerador eléctrico das turbinas eólicas



- ✓ O gerador da turbina eólica converte a energia mecânica em energia eléctrica. Os geradores para turbinas eólicas não são muito comuns, quando comparados com outras unidades geradoras ligadas à rede eléctrica. A razão deve-se ao facto do gerador ter de utilizar uma fonte de energia (o rotor da turbina) que fornece energia mecânica muito variável (torque).

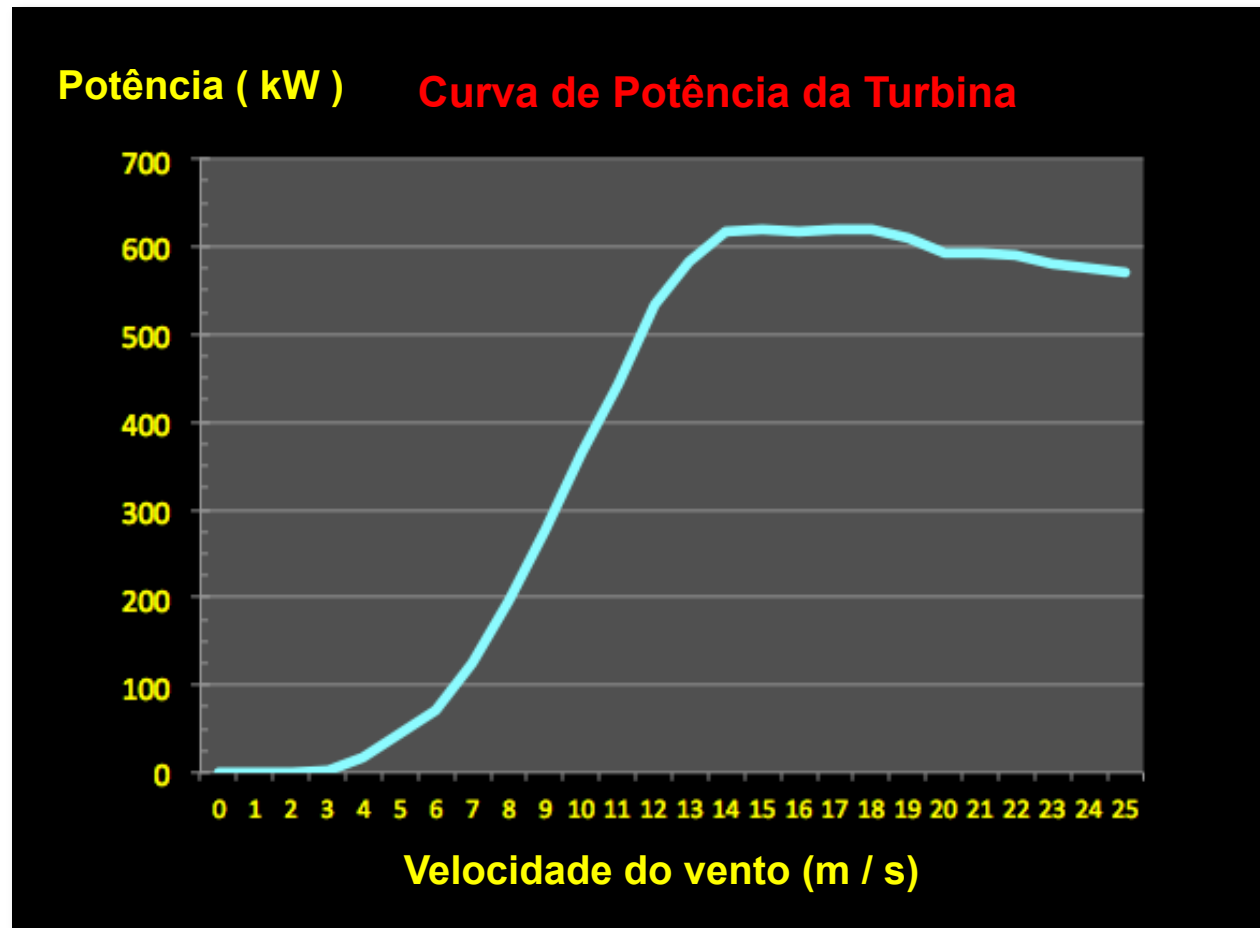


Vista panorâmica de uma fábrica de turbinas eólicas



- A curva de potência de uma turbina eólica consiste numa representação gráfica da variação da potência eléctrica, P_T fornecida pela turbina (quantidade de energia por segundo) com a velocidade do vento. As curvas de potência de uma determinada turbina eólica são fornecidas pelos fabricantes. Na verdade, o procedimento experimental consiste em sujeitar a turbina eólica (ligada electricamente a uma carga exterior conhecida) à acção do vento. Para cada valor da velocidade do vento, o fabricante mede a queda de potencial U e a intensidade da corrente eléctrica I que atravessa essa carga externa. A potência P_T é igual ao produto da queda de potencial U pela intensidade da corrente eléctrica I que atravessa essa carga externa : $P_T = U \times I$.

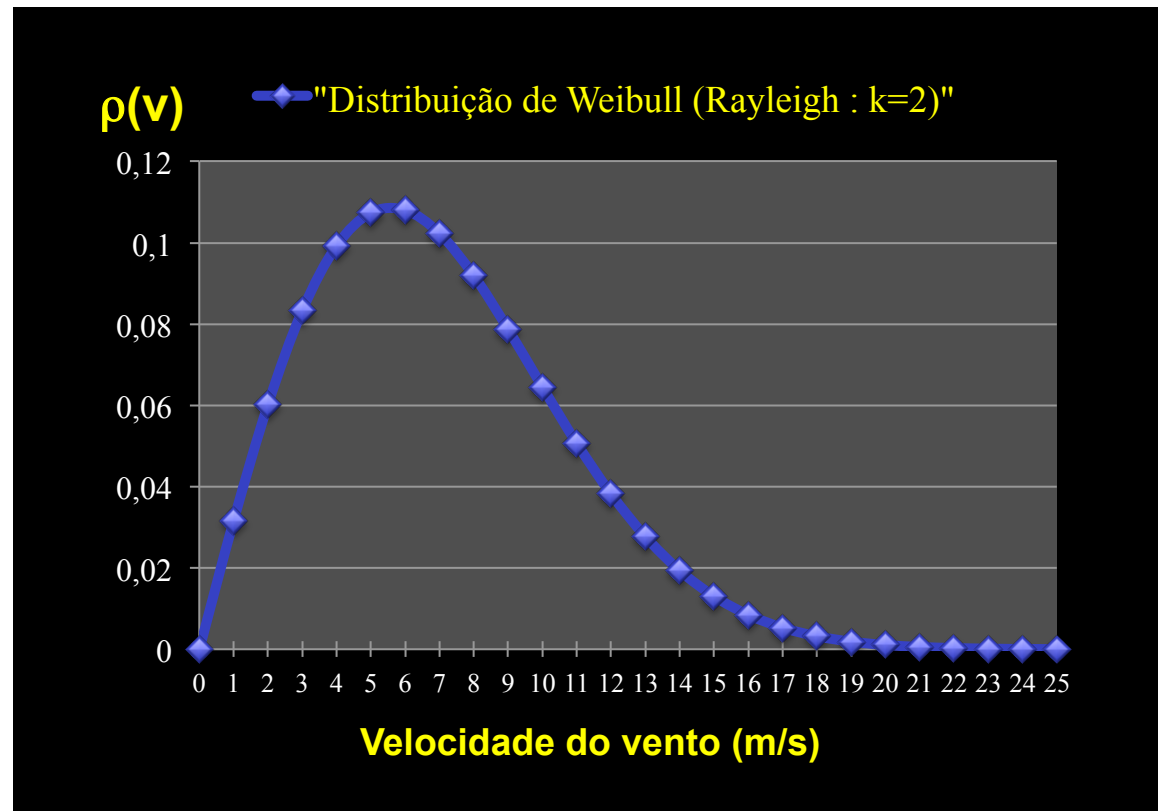
- A figura mostra a curva de potência de uma turbina eólica (*potência nominal* = 600 kW) com altura de 50 m e cujo diâmetro do rotor é igual a 43 m (área de giro $\cong 1452,2 \text{ m}^2$).



- A curva de potência foi obtida através da medição da velocidade do vento utilizando-se um anemómetro colocado à altura de 50 m (ou seja à mesma altura do rotor). A essa altura, a temperatura do ar é de 14,675°C e a pressão e densidade do ar têm respectivamente os valores de 100,726 kPa e 1,219 kg/m³. Por outro lado, a velocidade média do vento registada à altura de 50 m foi de **7 m/s**.
- Considerando o fator de forma $k = 2$ (distribuição de Rayleigh) a função gamma é aquela representada na página 20 e tem o valor $\Gamma \cong 0,886$. Deste modo, o parâmetro de escala C tem o seguinte valor :

$$C = \frac{\bar{v}}{\Gamma (1+1/k)} = \frac{7,0}{0,886} = 7,9$$

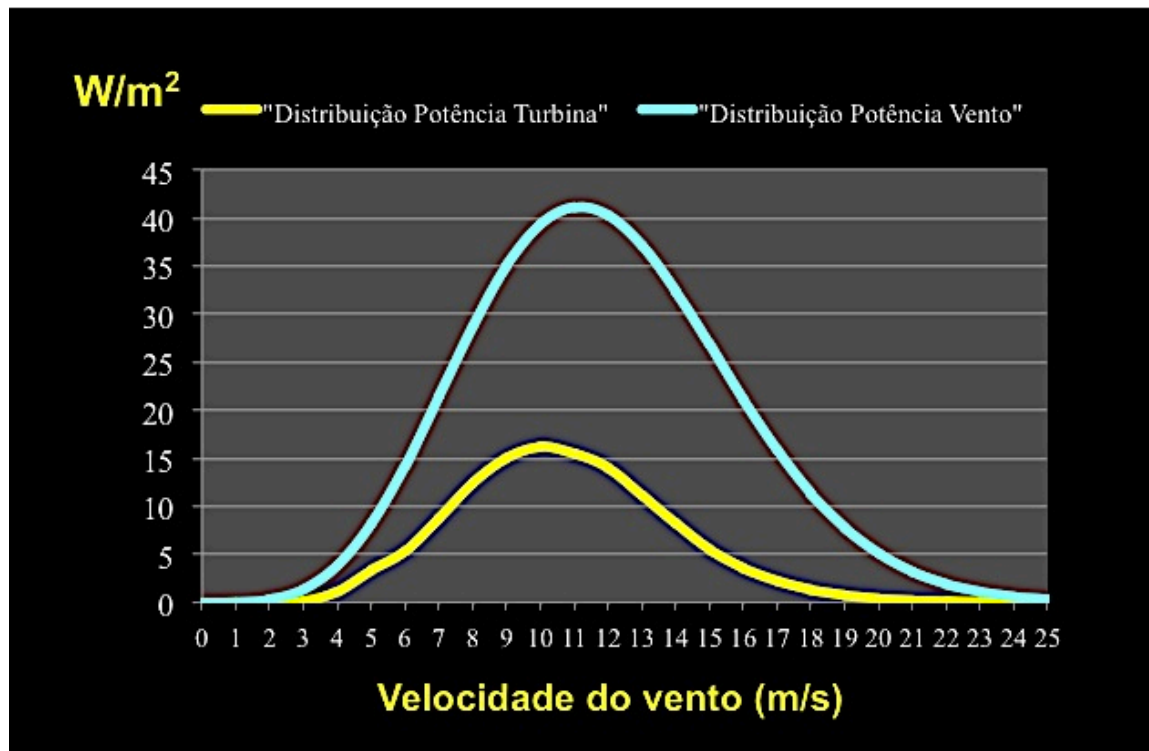
- Para esta turbina eólica, a distribuição de Weibull, calculada através da equação da página 18, está representada na figura seguinte :



- Se multiplicarmos a potência da turbina P_T (correspondente a cada velocidade do vento) pela probabilidade da ocorrência dessa velocidade (distribuição de Weibull), estaremos a calcular a *curva da distribuição de potência* da turbina, DP a diferentes velocidades. O mesmo procedimento pode ser efectuado para a potência extraída do vento P_V (ou seja, o recurso eólico). A figura da página seguinte compara a distribuição de potência (**por m²**) da turbina eólica com a distribuição de potência (**por m²**) do vento.
- Para isso, basta dividir a potência (da turbina e também a do fluxo de vento) pela área de giro do rotor (1452,2 m²).
- Note-se que a a potência extraída do vento deve ser calculada de acordo com a equação da página 8 :

$$P_V = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad \Leftrightarrow \quad P_V = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) v^3$$

$$\left[\frac{(P_{vento} / A_{giro}) \times \underbrace{\rho(v)}_{\text{distribuição de Weibull}}}{\frac{P_{turbina}}{A_{giro}} \times \rho(v)} \right] = [(\frac{1}{2} \rho_{Ar} v^3) \times \rho(v)]$$



- A área sob a curva azul corresponde à quantidade de energia por segundo (Watt) e por metro quadrado de fluxo de vento que podemos esperar neste local particular. Para este caso (velocidade média de 7 m/s e uma distribuição de Weibull com $k = 2$), a área sob a curva azul é aproximadamente igual a **400 W/m²**.
- Note-se que este valor é quase duas vezes superior ao valor que seria obtido se fosse considerado que o vento soprava com uma velocidade sempre constante, e igual à velocidade média do vento que foi considerada (7 m/s).

$$\frac{P_{vento}}{A_{giro}} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{P_{vento}}{A_{giro}} = 0,5 \times (1,219 \text{ kg / m}^3) \times 7^3 \approx 209 \text{ W / m}^2$$

- A área sob a curva azul diz-nos quanto da energia do vento que pode, **teoricamente**, ser convertida em energia mecânica (para a turbina, e por consequência em energia eléctrica). A área sob a curva amarela ($\approx 125,7 \text{ W/m}^2$) informa-nos sob a quantidade de energia eléctrica que a turbina produzirá nesse local particular.

- ✓ Anteriormente foi referido que a curva distribuição de potência da turbina, DP a diferentes velocidades, é obtida a partir da multiplicação da potência da turbina [correspondente a cada velocidade de vento, $P_T(v)$] pela probabilidade da ocorrência dessa velocidade ($\rho(v)$ – distribuição de Weibull) :

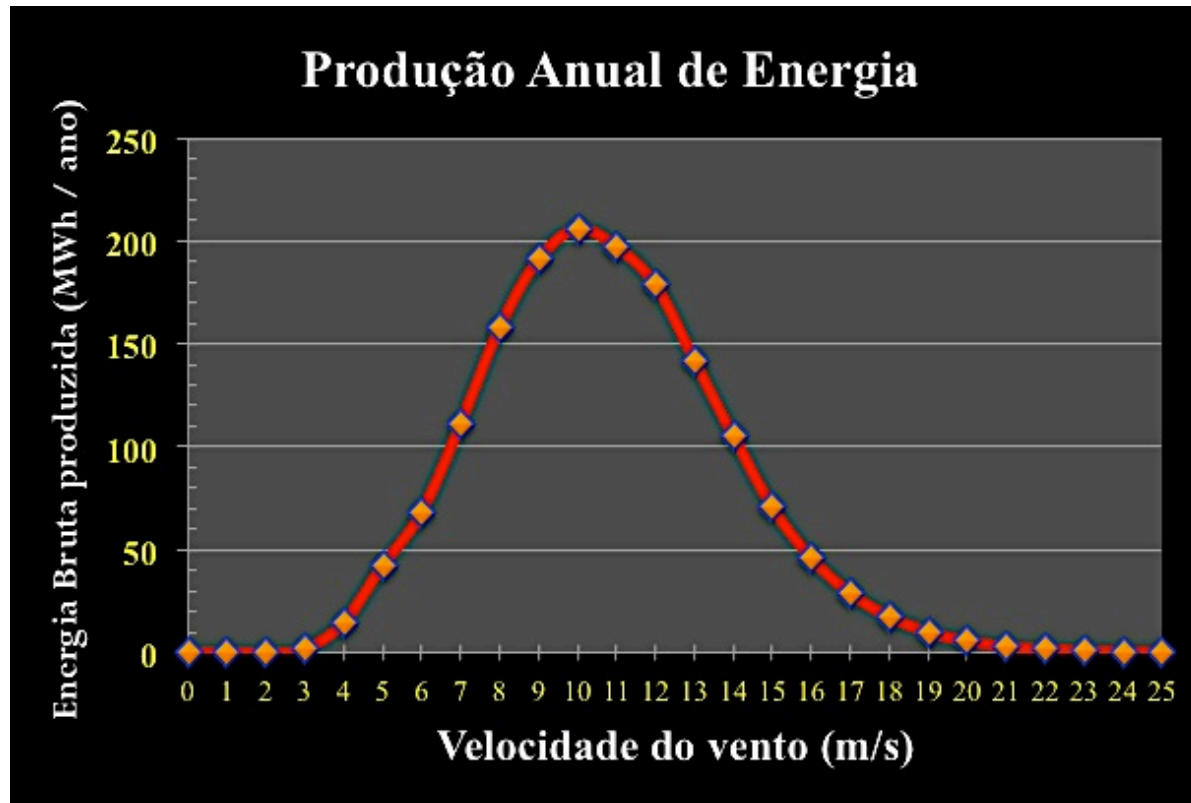
$$DP = \sum_{v=0}^{25} P_T(v) \cdot \rho(v)$$

- ✓ onde $P_T(v)$ é a potência da turbina à velocidade do vento, v e $\rho(v)$ é a função densidade de probabilidade de Weibull (distribuição de Weibull, calculada à velocidade \bar{v}) para uma velocidade do vento v .

- ✓ A curva de energia bruta E_B (Wh/ano) produzida pela turbina ao fim de um ano, obtém-se através da multiplicação da distribuição de potência da turbina pelo número total de horas de um ano ($8760 = 24 \times 365$), admitindo que a turbina opera sem interrupções (situação ideal) e que não ocorram quaisquer outro tipo de perdas, incluindo aquelas que decorrem da pressão atmosférica e da temperatura do ar do local onde se instala a turbina eólica.

$$E_B = 8760 \sum_{v=0}^{25} P_T(v) \cdot \rho(v)$$

- ✓ A figura da página seguinte mostra a energia bruta produzida anualmente pela turbina eólica que está a ser considerada (ou seja, caracterizada pela curva de potência mostrada na página 29).



$$E_B = 8760 \sum_{v=0}^{25} P_T(v) \cdot \rho(v)$$

- ✓ O somatório de todos os pontos da curva é aproximadamente igual a $E_B = 1599,1 \text{ MWh/ano}$.

- ✓ Afim de se contemplar o efeito da pressão atmosférica e da temperatura do ar onde se situa a turbina eólica, o valor da energia bruta deve ser corrigido através da multiplicação de coeficientes de ajuste. Deste modo, a energia bruta corrigida $E_{B,C}$ (Wh/ano) tendo em consideração o efeito da pressão e temperatura, é obtida através da seguinte expressão :

$$E_{B,C} = E_B \times C_P \times C_T$$

- ✓ onde C_P e C_T são, respectivamente, os coeficientes de ajuste de pressão e temperatura. C_P e C_T são calculados de acordo com as seguintes equações :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_P = \frac{P}{P_0} \\ C_T = \frac{T_0}{T} \end{array} \right.$$

✓ onde P representa a pressão atmosférica média anual do local onde está instalada a turbina (i.e. a altura onde se mede a velocidade do vento), P_0 é a pressão atmosférica padrão (1atm = 101,325 kPa), T é a temperatura absoluta (em grau Kelvin) média anual do local e T_0 é a temperatura absoluta padrão (i.e, ao nível do mar \rightarrow altura = 0 m), e cujo valor é igual a 288,15 K (= 15°C).

✓ Deste modo, a energia bruta corrigida $E_{B,C}$ (Wh/ano) pode ser reescrita de acordo com a seguinte expressão :

$$E_{B,C} = E_B \left(\frac{P}{P_0} \right) \left(\frac{T_0}{T} \right)$$

- Para a turbina eólica que tem vindo a ser considerada, o anemómetro (medidor da velocidade do vento) foi colocado à altura de 50 m (ou seja à mesma altura do rotor). A essa altura, a temperatura e a pressão do ar têm respectivamente os valores de 14,675°C e 100,726 kPa.
- Por isso, a energia bruta corrigida $E_{B,C}$ (MWh/ano) tem o seguinte valor :

$$E_{B,C} = (1599,1 \text{ MWh / ano}) \times \left[\frac{(100,726 \text{ kPa})}{(101,325 \text{ kPa})} \right] \times \left[\frac{(15 + 273,15) \text{ K}}{(14,675 + 273,15) \text{ K}} \right]$$

$$E_{B,C} = (1599,1 \text{ MWh / ano}) \times (0,9941) \times \left(\frac{288,15}{287,825} \right) \approx 1591,46 \text{ MWh / ano}$$

- A energia líquida produzida, E_L representa a energia efetivamente produzida pela turbina eólica, na medida em que para além de levar em consideração o efeito da temperatura e da pressão atmosférica no local, contempla ainda um conjunto de outras perdas.

$$E_L = E_{B,C} (1 - \lambda_a) (1 - \lambda_{i,s}) (1 - \lambda_d) (1 - \lambda_m)$$

- onde λ_a é o coeficiente de perdas do sistema (*array losses*), $\lambda_{i,s}$ é o coeficiente de perdas devido à formação de gelo e acumulação de sujidade na superfície do rotor (*icing and airfoil soiling losses*), λ_d é o coeficiente de perdas devido aos tempos de paragem (*downtime losses*) e λ_m representa um coeficiente de perdas diversas (*miscellaneous losses*).

- Para a turbina eólica que tem vindo a ser estudada admitamos que os coeficientes de perdas são aqueles que constam na tabela seguinte.

Coeficiente de Perda			
λ_a (%)	$\lambda_{i,s}$ (%)	λ_d (%)	λ_m (%)
1	0	1	0,1

- Para este cenário, a energia líquida produzida E_L (MWh/ano) tem o seguinte valor :

$$E_L = (1591,46 \text{ MWh / ano}) \times [(1 - 0,01) \cdot (1 - 0) \cdot (1 - 0,01) \cdot (1 - 0,001)]$$

$$E_L = (1591,46 \text{ MWh / ano}) \times 0,979 \approx 1558,04 \text{ MWh / ano}$$

- Outra forma de interpretar a produção anual de energia de uma turbina eólica é através do denominado *fator de carga* da turbina FC , referente ao local onde está instalada.
- Define-se por fator de carga de uma turbina eólica, o quociente entre a produção de energia líquida anual E_L e a energia que a turbina teoricamente produziria se operasse constantemente com a sua potência nominal P_N (máxima), durante as 8760 horas do ano. A turbina eólica que tem vindo a ser estudada tem uma potência nominal $P_N = 600$ kW.
- Para este caso, o fator de carga da turbina eólica tem o seguinte valor :

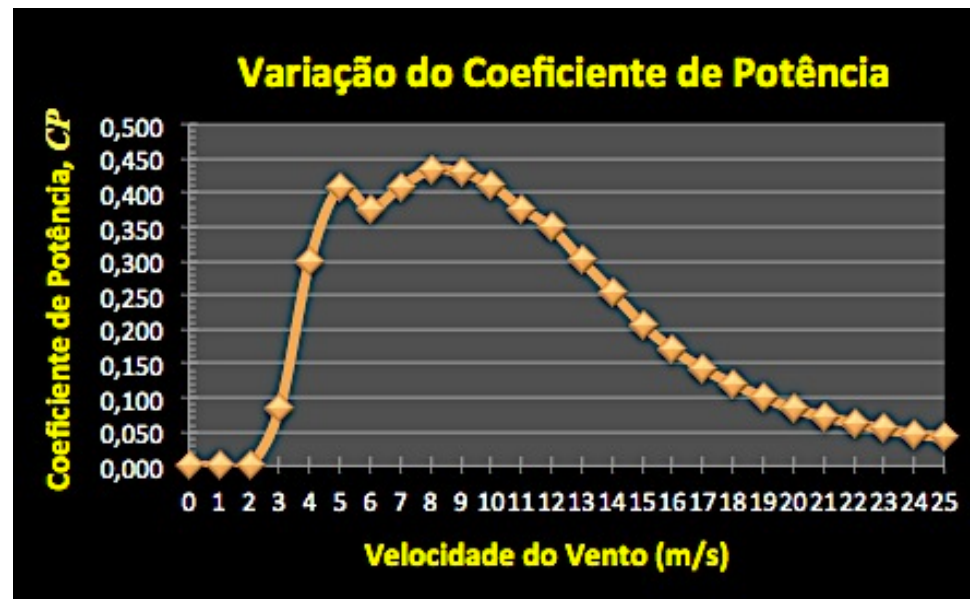
$$FC = \frac{E_L}{8760 \times P_N} = \frac{1558,04 \times 10^3 \text{ kWh / ano}}{(8760 \text{ h}) \times (600 \text{ kW})} \approx 0,296 = 29,6\%$$

- ✓ Nas situações correntes, o fator de carga varia entre os **25% – 35%**.

- Uma maneira de avaliar a eficiência mecânica de uma turbina eólica é através do denominado **coeficiente de potência**, CP . O coeficiente de potência avalia a eficiência técnica de uma turbina em conseguir aproveitar a energia do vento e transformá-la em energia mecânica (rotação das lâminas). O coeficiente de potência é obtido, para cada valor da velocidade do vento, através do quociente entre a potência da turbina P_T (energia/segundo) e a potência do vento P_V (energia/segundo).
- A tabela apresentada na página seguinte mostra os valores do coeficiente de potência calculados a diferentes velocidade do vento.

Velocidade do Vento (m/s)	Potência Turbina (kW)	Potência Vento (kW)	Coeficiente de Potência
0	0	0,0	0,000
1	0	0,9	0,000
2	0	7,1	0,000
3	2	23,9	0,084
4	17	56,7	0,300
5	45	110,7	0,407
6	72	191,2	0,377
7	124	303,6	0,408
8	196	453,2	0,432
9	277	645,3	0,429
10	364	885,2	0,411
11	444	1178,2	0,377
12	533	1529,7	0,348
13	584	1944,8	0,300
14	618	2429,0	0,254
15	619	2987,6	0,207
16	618	3625,8	0,170
17	619	4349,1	0,142
18	620	5162,6	0,120
19	610	6071,7	0,100
20	594	7081,7	0,084
21	592	8198,0	0,072
22	590	9425,8	0,063
23	580	10770,4	0,054
24	575	12237,2	0,047
25	570	13831,5	0,041

- A figura corresponde à representação gráfica da evolução do coeficiente de potência para diferentes valores de velocidade do vento.



- Observa-se que a eficiência mecânica máxima da turbina (43,2%) ocorre para uma velocidade do vento igual a 8 m/s. A baixas velocidades de vento, a eficiência não é tão importante, porque não há muita energia para capturar do vento.

✧ Endereço electrónico a visitar :

http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/en/tour/wres/guidep.htm

O Exemplo de cálculo anteriormente analisado refere-se à turbina eólica : **Danish wind turbine**