

PEA 2200

Energia, Meio Ambiente e Sustentabilidade

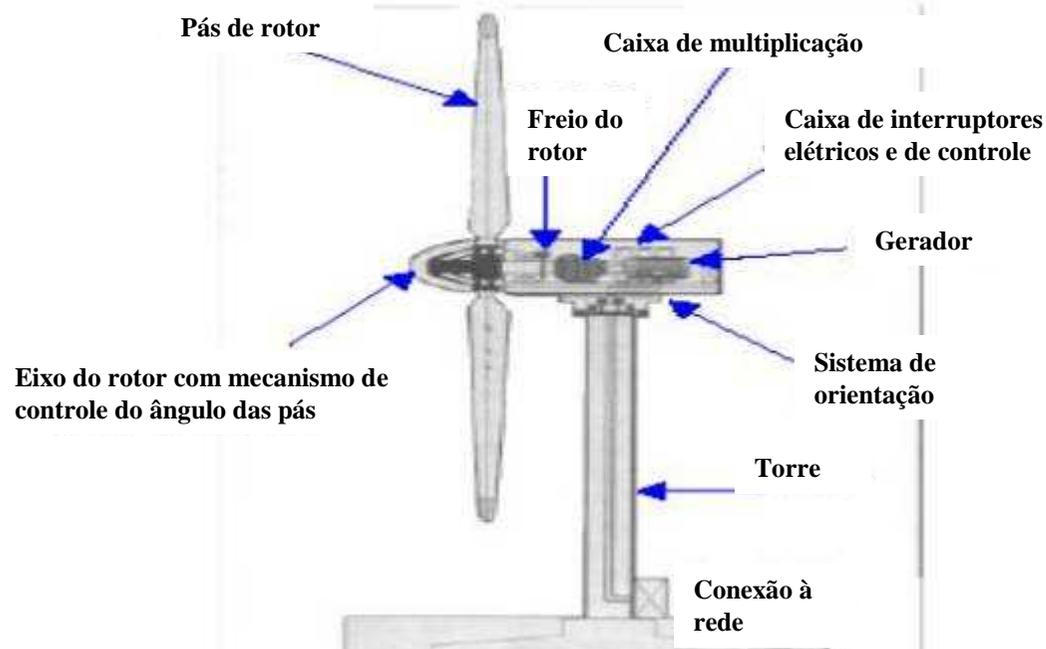
Energia Eólica

Profa. Eliane Fadigas

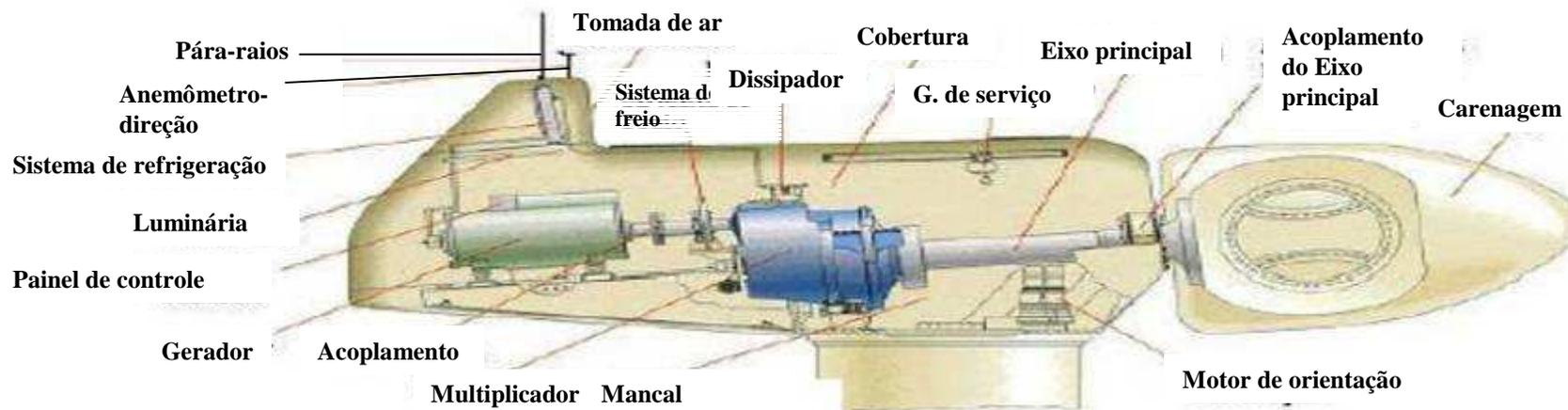
Prof. Alberto Bianchi



Detalhes de um aerogerador de eixo horizontal



Seção de uma turbina eólica típica conectada à rede.



Turbina de eixo horizontal

Material das pás

- madeira
- aço / alumínio
- fibra de vidro com epóxi ou poliéster

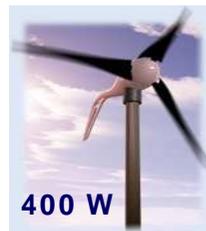


Classificação dos Aerogeradores

Tamanho	Diâmetro (m)	Área do Rotor (m ²)
Pequeno	Até 16 metros	Até 200
Médio	16m à 45m	200 à 1600
Grande	> 45 m	> 1600

Tamanho	Potência Instalada
Pequeno	Até 80 kW
Médio	De 81 a 500 kW
Grande	> 500 kW

**Pequeno
porte**

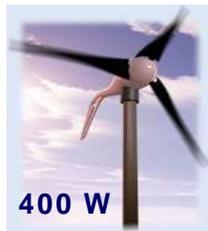
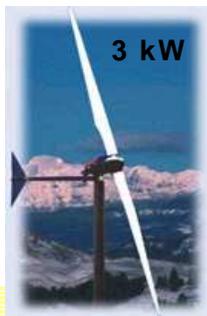


**Grande
porte**



Aplicações

- Alimentação de cargas isoladas
- Centrais de grande porte conectadas á rede instaladas em terra
- Centrais de grande porte conectadas à rede instaladas no mar

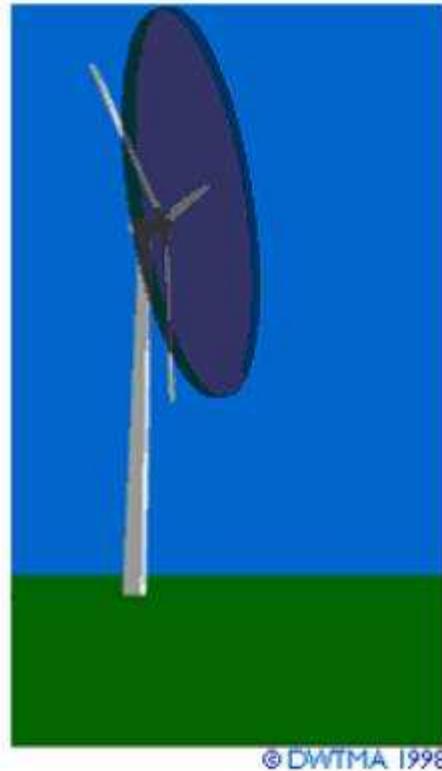


Características da tecnologia eólica

- Tecnologia altamente sofisticada
- Grandes desenvolvimentos na área de controle, aerodinâmica e materiais
- Alto crescimento no tamanho das pás e potência da turbina
- Materiais mais resistentes e menos ruidosos
- Aplicações em terra e no mar
- Significativa redução nos custos com políticas de incentivo
- Mais de oito fábricas instaladas no Brasil nos últimos 04 anos

Fundamentos: Potência Eólica

Potência eólica (P_v): $\rightarrow E = \frac{1}{2} \rho A v^3$ Joules/s



E/seg = Potência eólica = Watts

Potência por unidade de área:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \times \rho \times V^3 \quad \text{Watts / m}^2$$

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad D = \text{diâmetro do rotor}$$

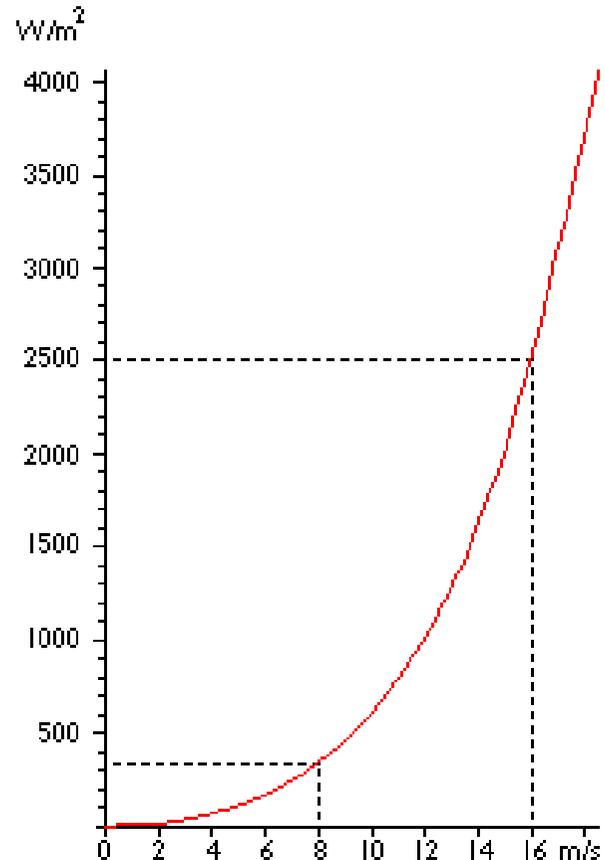
$$\text{Potência mecânica} = P_m = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p$$

$$\text{Potência Elétrica} = P_{el} = P_m \times \eta$$

Onde η = eficiência dos diversos componentes do sistema

Potência por unidade de área = Densidade de potência – Watts/m²

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \quad (\text{Watts}) \quad \longrightarrow \quad \frac{P}{A} = \frac{1}{2} \times \rho \times V^3 \quad (\text{Watts/m}^2)$$



$$\rho = 1,2256 \text{ kg/m}^3$$

$$V = 8 \text{ m/s} \quad P = 314 \text{ W / m}^2$$

$$V = 16 \text{ m/s} \quad P = 2509 \text{ W / m}^2$$

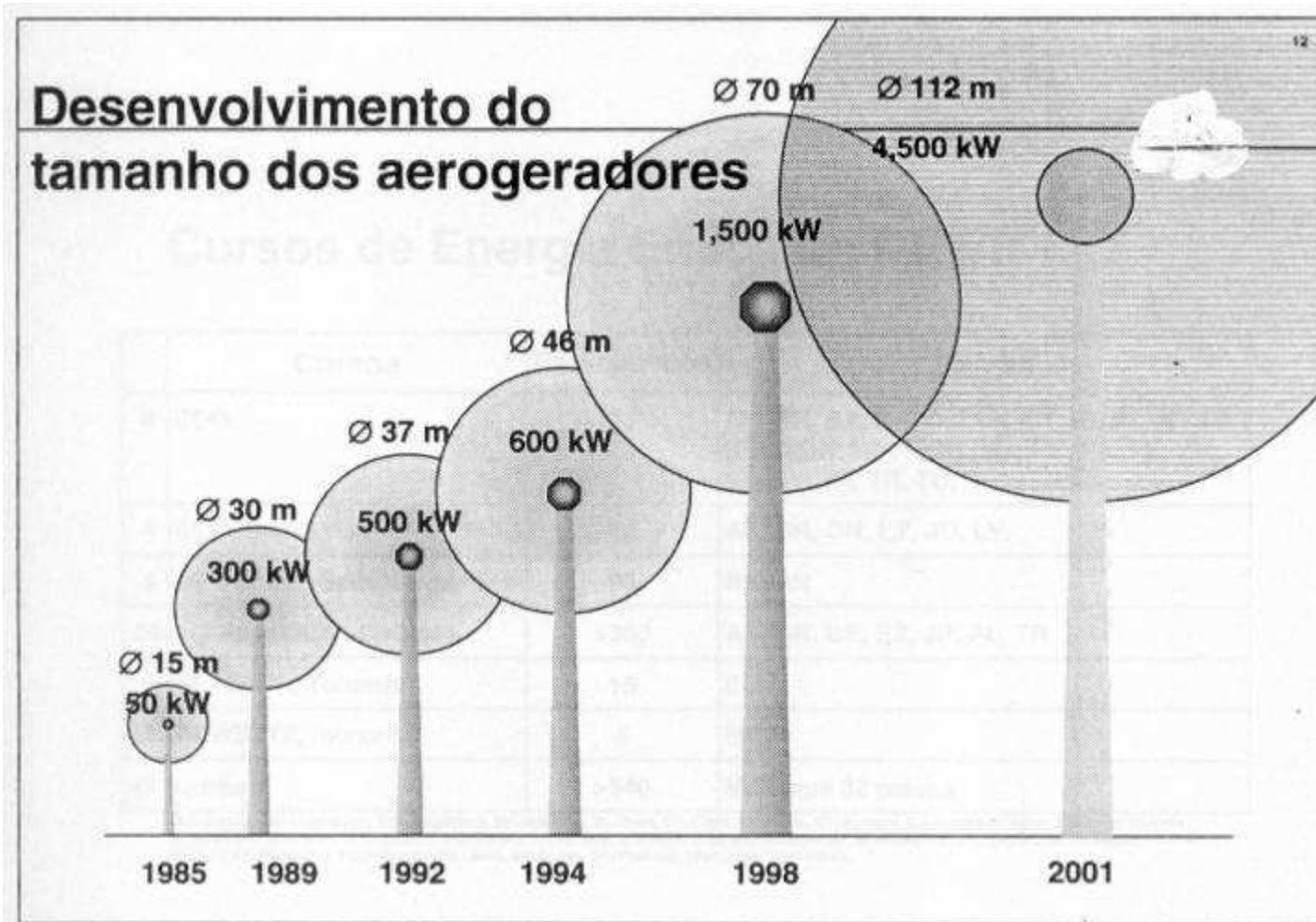
8 vezes mais potência

314Watts = 5 lâmpadas de 60 Watts

Curva da potência do vento em função da velocidade



Evolução Comercial das Turbinas de Grande Porte



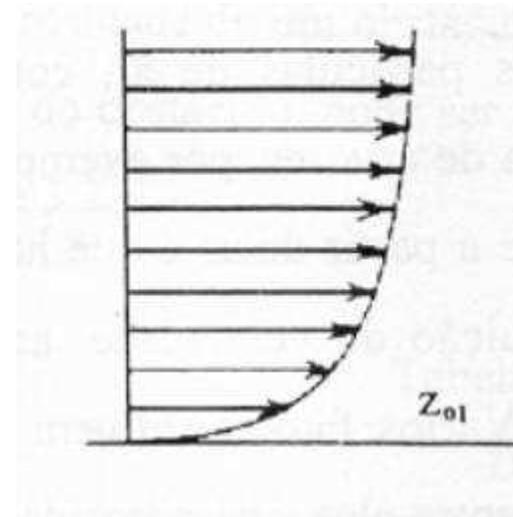
Distribuição da velocidade do vento com a altura

Lei da potência

V - velocidade na altura desejada
Vo - velocidade na altura conhecida
H - altura desejada
Ho - altura conhecida
n - fator de rugosidade do terreno

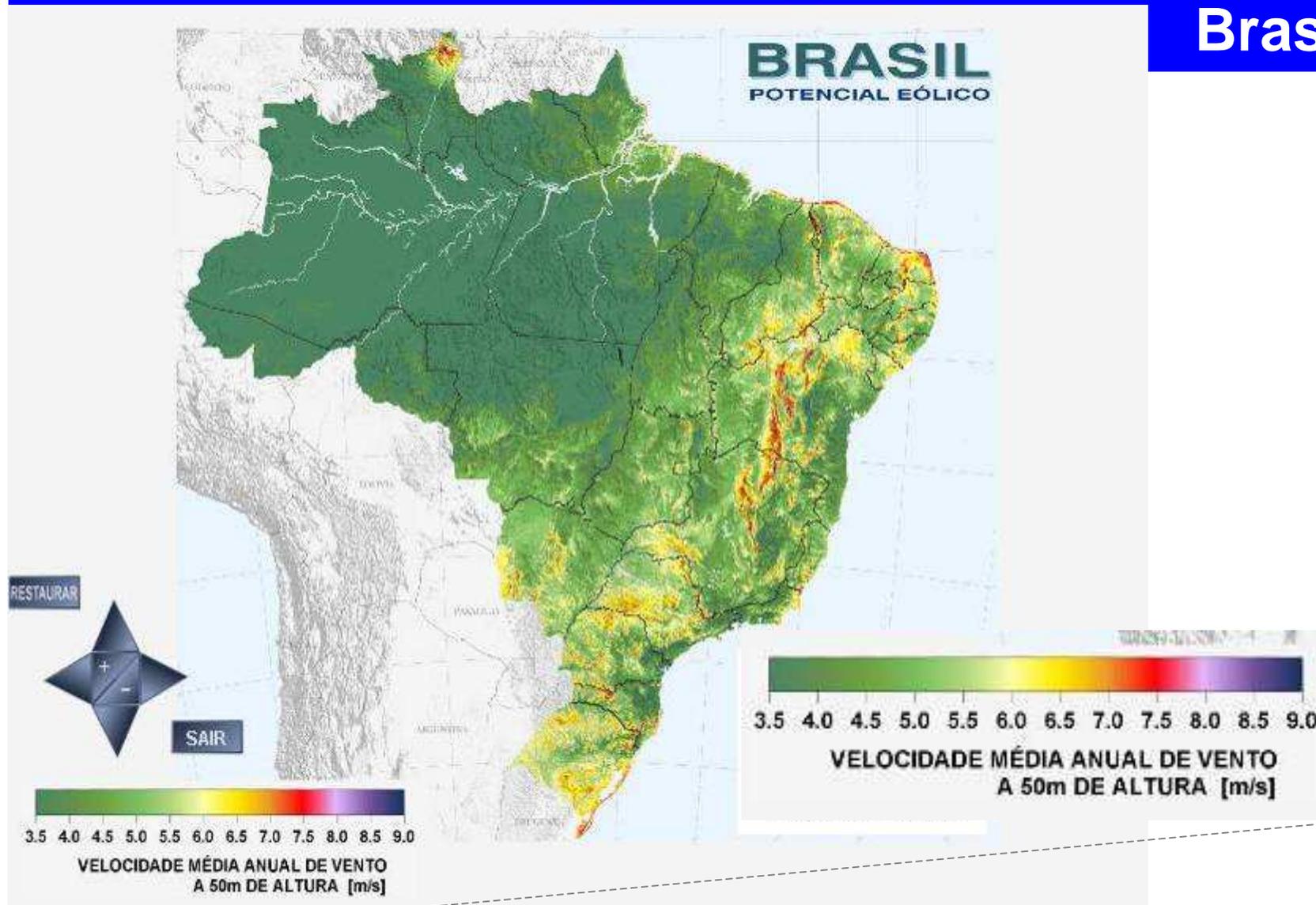
$$V = V_o \left(H / H_o \right)^n$$

CAMADA LIMITE



Descrição do terreno	n
Terreno sem vegetação	0,10
Terreno gramado	0,12
Terreno cultivado	0,19
Terreno com poucas árvores	0,23
Terreno com : muitas árvores, cerca viva ou poucas edificações	0,26
Florestas	0,28
Zonas urbanas sem edificações altas	0,32

Velocidade Média Anual – Atlas do Potencial Eólico Brasileiro

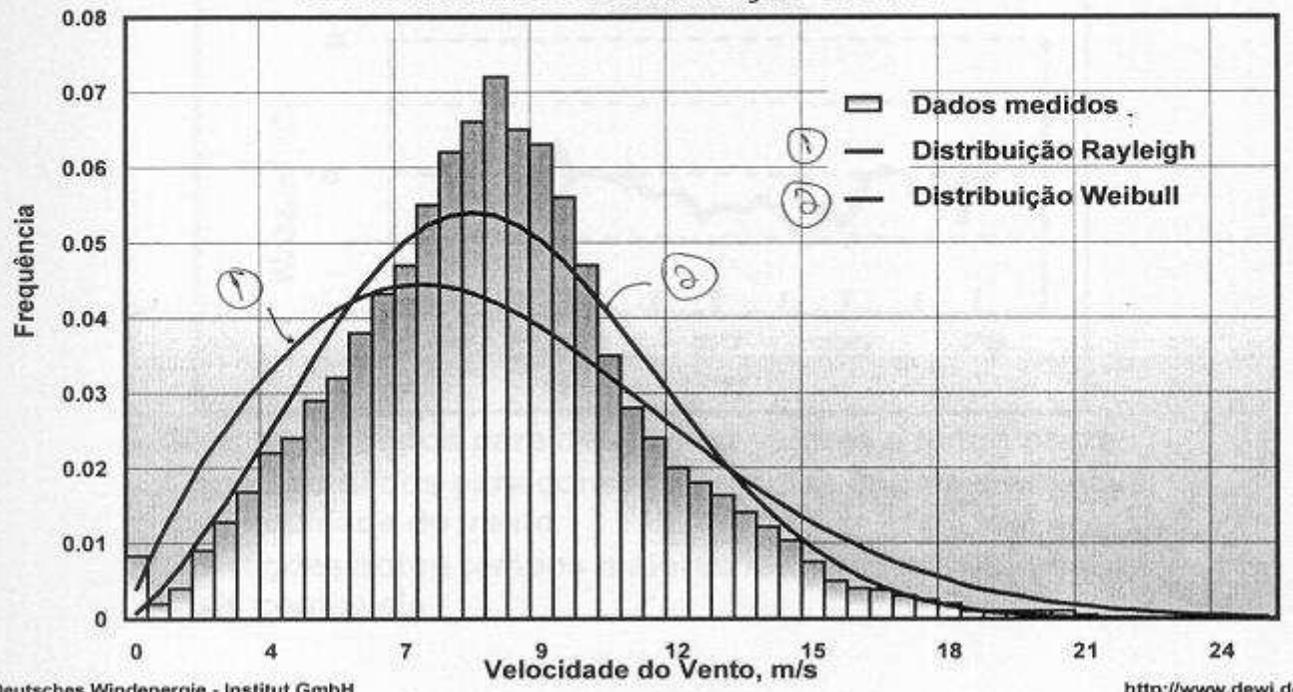


Fonte: Dutra, 2001



Distribuição de Frequências da Velocidade do Vento

Dados medidos e distribuição teórica



Deutsches Windenergie - Institut GmbH

<http://www.dewi.de>



Curva de potência de uma turbina eólica

A potência elétrica gerada é:

$$P_e = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \times \eta$$

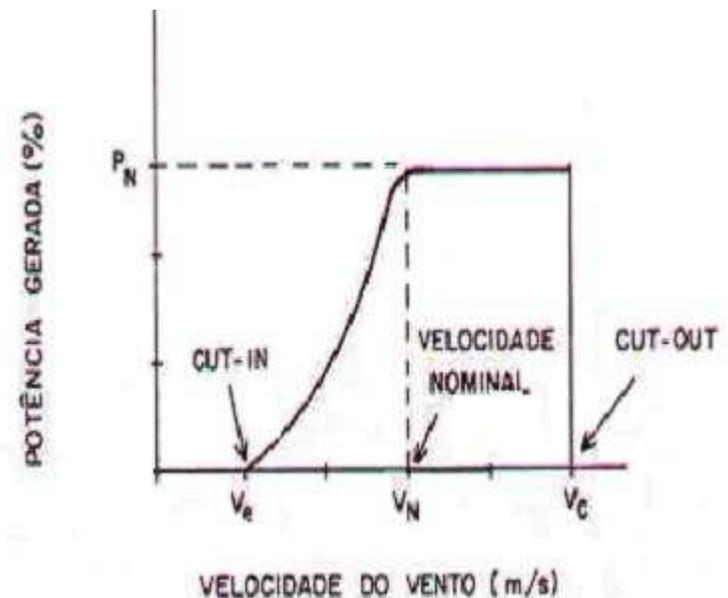
Na prática, a potência “Pe” fornecida por uma turbina eólica em função da velocidade do vento é determinada pela curva de potência da turbina

A curva de potência ilustra três importantes velocidades características:

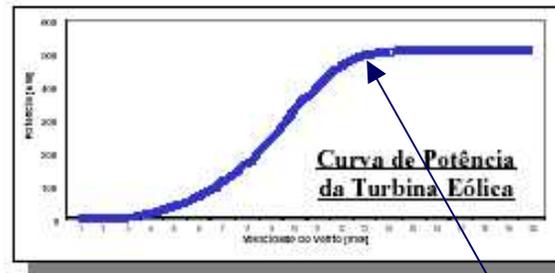
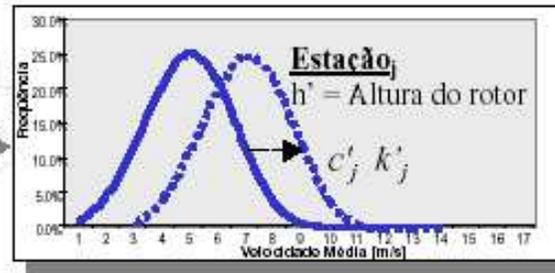
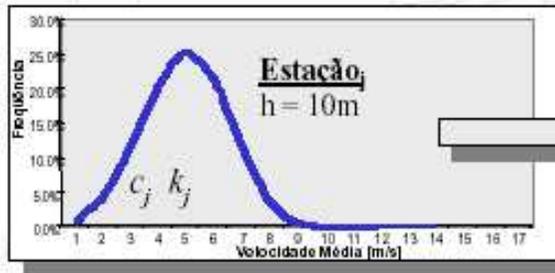
V_e – Velocidade a partir da qual a turbina começa produzir energia

V_n – Velocidade do vento em que a turbina atinge a sua potência nominal

V_c – velocidade do vento a partir da qual a turbina é desligada para evitar problemas estruturais



Cálculo da Energia Produzida



Energia
MWh/ano

$$f_{ri}(v) = \left[\frac{k}{c} \right] \times \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \times \exp \left[\left(- \frac{v}{c} \right)^k \right]$$

Ex: Distribuição de Weibull

$$EP(ano) = \sum f_{ri} \times P_i \times \Delta t$$

Potência nominal

Fator de capacidade

$$FC = \frac{Eg(ano)}{Pn \times 8760 \text{ horas}}$$

O FC representa um importante critério de decisão de escolha da viabilidade técnica e econômica da usina. É um indicador da produção energética e conseqüentemente do potencial de instalação de turbinas eólicas em um local. Diferentes locais (estações) usando o mesmo modelo de turbina apresenta diferentes fatores de capacidade, função da velocidade média dos ventos.

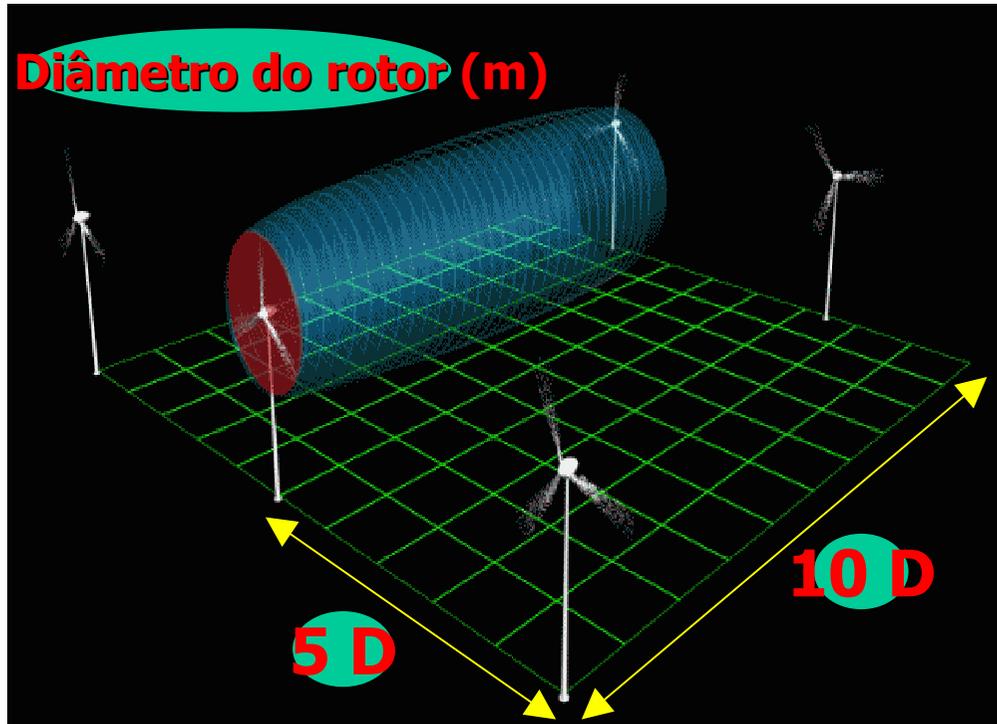
Valores típicos para locais que possuem um bom regime de vento: $35\% < FC < 45\%$



ENERGIA GERADA PELO PARQUE

Produção de energia bruta: considera apenas as perdas por interferência das esteiras entre rotores das turbinas.

D = Diâmetro do rotor (m)



Produção líquida :

Devem ser incluídas :

- Perdas elétricas: circuito interno + transmissão até o ponto de entrega
- Consumo próprio
- Perdas por indisponibilidade do sistema elétrico e dos aerogeradores (indisponibilidade forçada e programada)

Avaliação do efeito esteira provocado por turbinas eólicas adjacentes – Norma IEC 61400. Convém salientar que no caso de um espaçamento entre turbinas inferior a 3 diâmetros, o projeto deve ser melhor avaliado de acordo com a norma..

Energia anual gerada por uma turbina

$$EG(\text{ano}) = Pn \times FC \times FD \times 8760 / \text{ano}$$

Energia anual gerada por uma central eólica

$$EG(\text{ano})_{\text{central}} \neq \sum EG_n$$

nT = número de turbinas

Energia gerada por
cada turbina

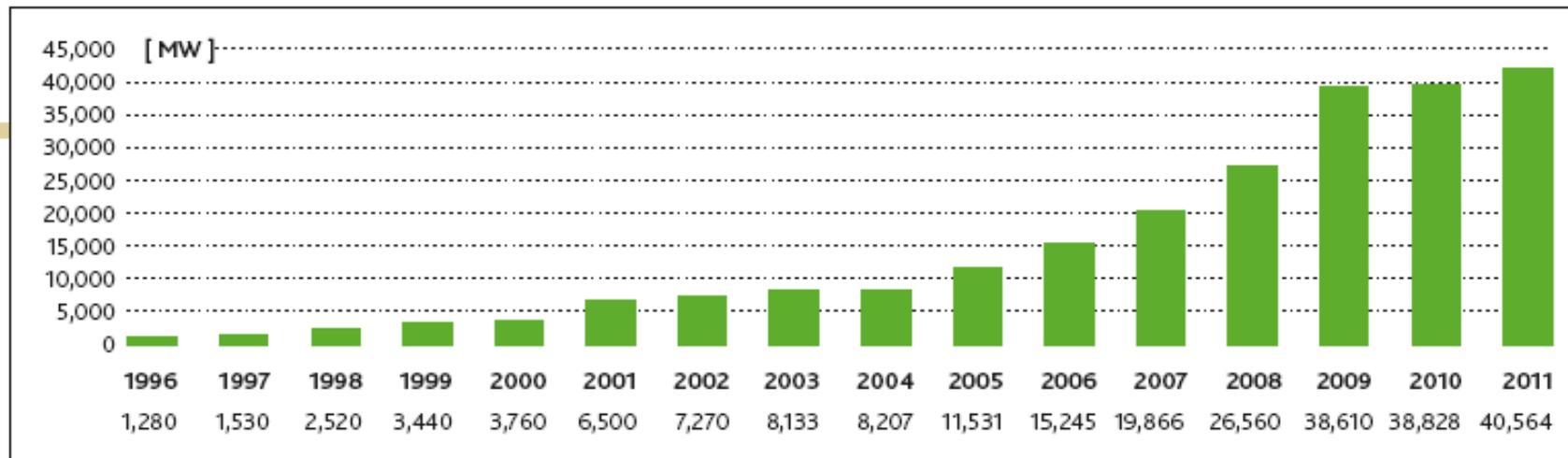
$$EG(\text{ano})_{\text{central}} = \sum_1^{nT} EG(\text{ano})_n \times (1 - \text{perdas})$$

Perdas na central



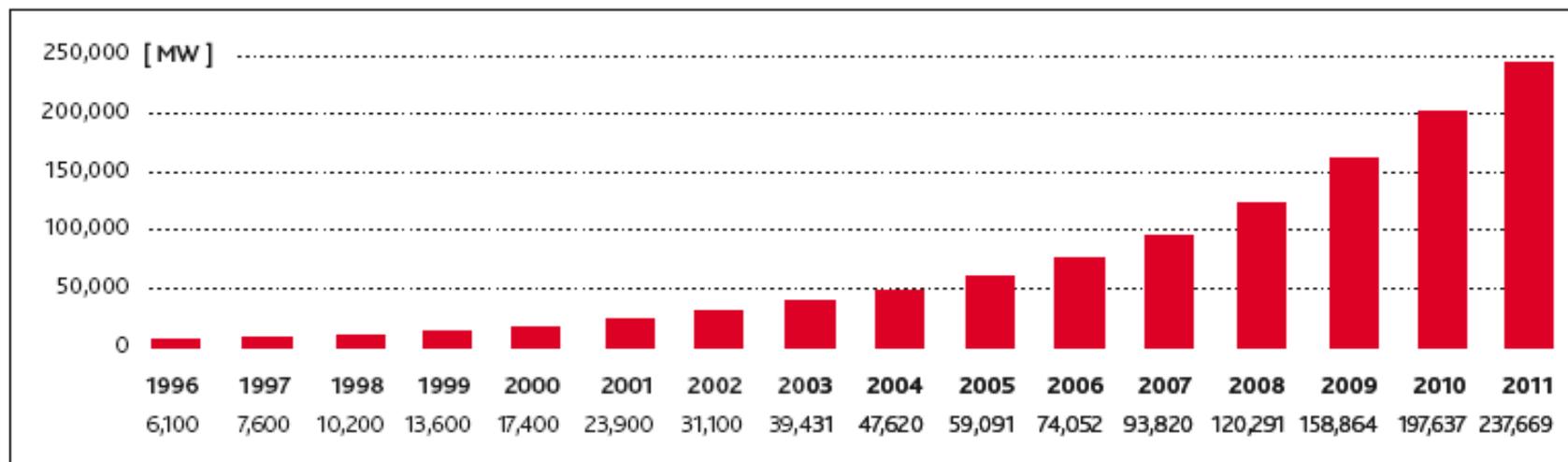
Evolução da capacidade instalada

Global Annual Installed Wind Capacity 1996-2011



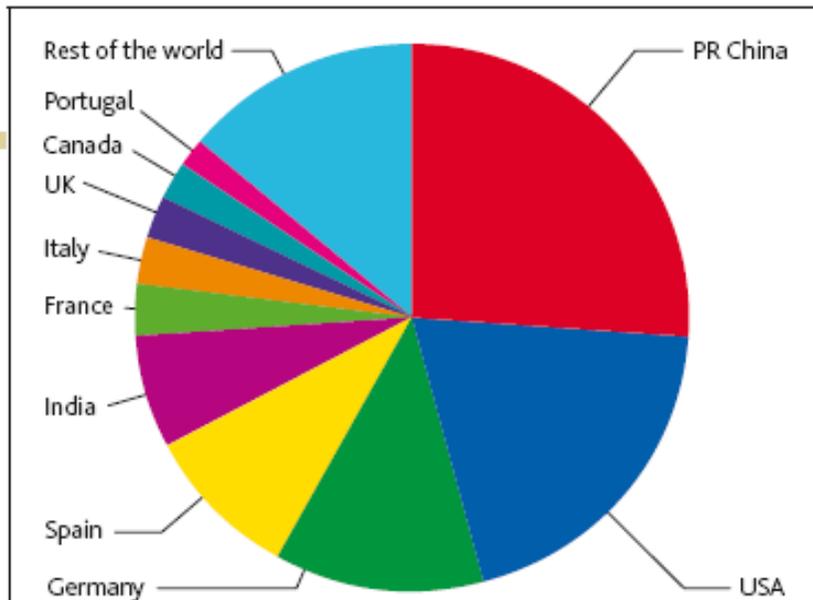
Source: GWEC

Global Cumulative Installed Wind Capacity 1996-2011



Source: GWEC

Top 10 cumulative capacity Dec 2011

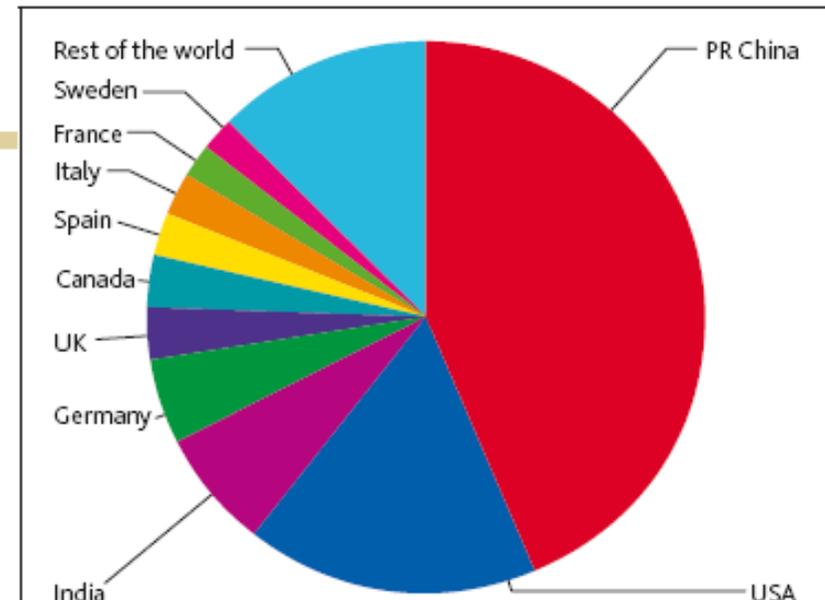


Country	MW	% SHARE
PR China	62,364	26.2
USA	46,919	19.7
Germany	29,060	12.2
Spain	21,674	9.1
India	16,084	6.8
France**	6,800	2.9
Italy	6,737	2.8
UK	6,540	2.7
Canada	5,265	2.2
Portugal	4,083	1.7
Rest of the world	32,143	13.5
Total TOP 10	205,526	86.5
World Total	237,669	100.0

** Provisional Figure

Source: GWEC

Top 10 new installed capacity Jan-Dec 2011



Country	MW	% SHARE
PR China	17,631	43
USA	6,810	17
India	3,019	7
Germany	2,086	5
UK	1,293	3.2
Canada	1,267	3.1
Spain	1,050	2.6
Italy	950	2.3
France**	830	2.0
Sweden	763	1.9
Rest of the world	4,865	12.0
Total TOP 10	35,699	88
World Total	40,564	100.0

** Provisional Figure

Source: GWEC

Usina Eólicas em Operação

Fonte: BIG - Aneel

- 88 Usinas
- Potência total instalada 1.934.528,20 kW
- Maior usina : Praia Formosa : 105 MW Camocim - CE

Eólicas produziram 560 MW médios mensais de energia em 2012 - Abeolica

Usinas em construção

- 80 Usinas
- Potência total instalada 1.989.096 kW
- Maior usina : 49600 kW

Reis dos ventos 1

Reis dos ventos 2

Localização: Galinhos – Rio Grande do Norte

Fonte: Abeolica





Algumas centrais em operação





Parque Eólico de Taíba - Suzlon

