

PEA 2200

Energia, Meio Ambiente e Sustentabilidade

## Energia Eólica

Profa. Eliane Fadigas

Prof. Alberto Bianchi



## Potencial energético do vento

**Energia Cinética:** ocasionada pelo movimento de massas de ar

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \text{ joules} \longrightarrow \frac{E}{\text{seg}} = \frac{1}{2} \frac{m}{\text{seg}} v^2$$

**Fluxo de massa**

**Massa = kg      V = metros / s**

$$\dot{m} = m / \text{seg}$$

**Potência disponível no vento**

$$\frac{E}{\text{seg}} = P \quad \text{Joules/seg} = \text{Watts}$$

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} v^2$$



# Potência eólica

$$\rho = \frac{m}{V} \longrightarrow \text{volume}$$

Massa específica do ar = kg/m<sup>3</sup>

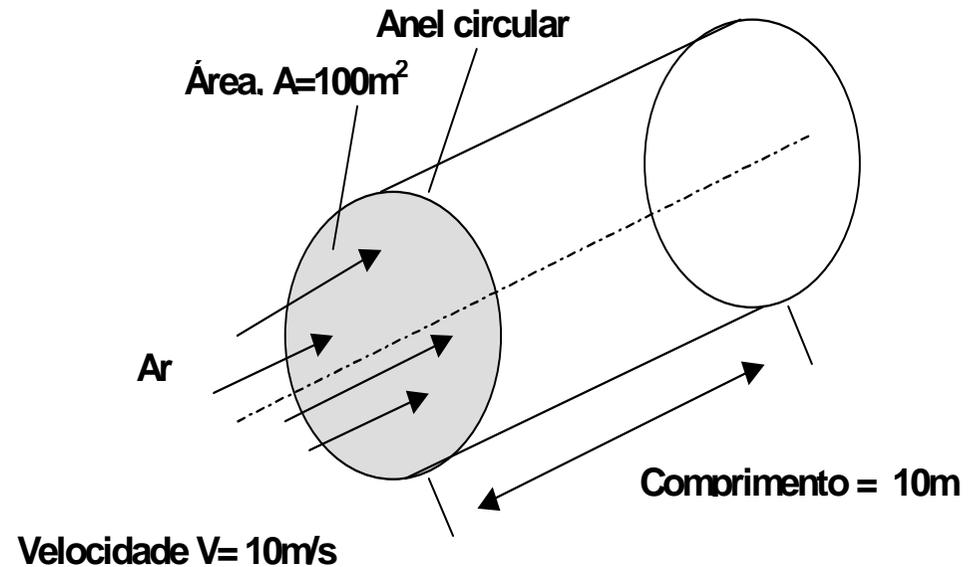
$$\dot{m} = \rho \frac{V}{\text{seg}} = \rho \frac{C}{\text{seg}} A$$

A = área

C = distância percorrida (m)

C/seg = v = velocidade de escoamento do ar

$$\dot{m} = \rho A v \qquad P = \frac{1}{2} \dot{m} v^2$$



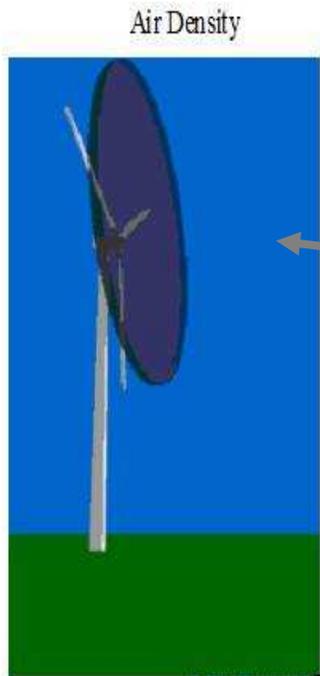
## Potência eólica

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad \text{Watts}$$

## Densidade de Potência

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

**D= diâmetro do rotor**



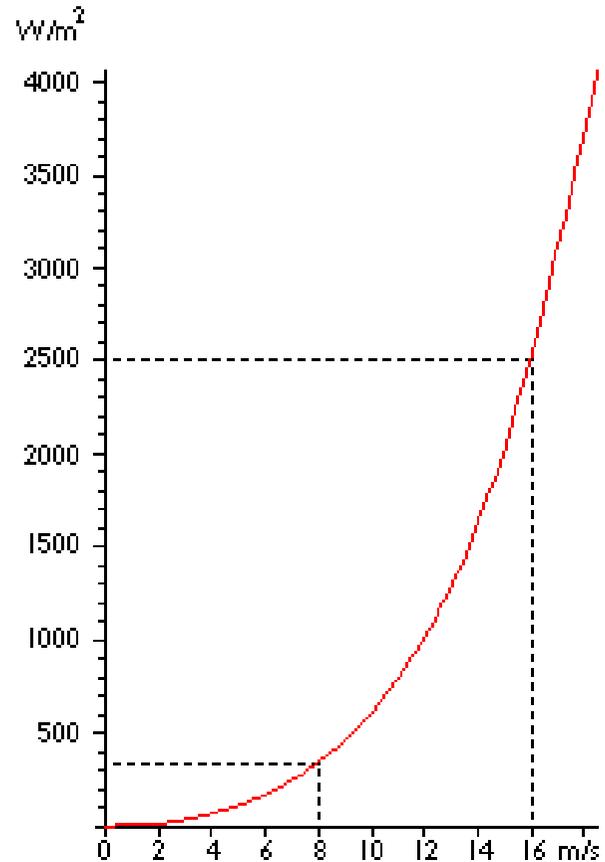
$$A = \frac{\pi}{4} D^2$$



**A= 2/3 × ( largura máxima do rotor até o centro ) × ( altura do rotor )**

# Potência por unidade de área = Densidade de potência – Watts/m<sup>2</sup>

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



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

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

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

8 vezes mais potência

**314Watts = 5 lâmpadas de 60 Watts**

Curva da potência do vento em função da velocidade



# Curva de potência de um aerogerador

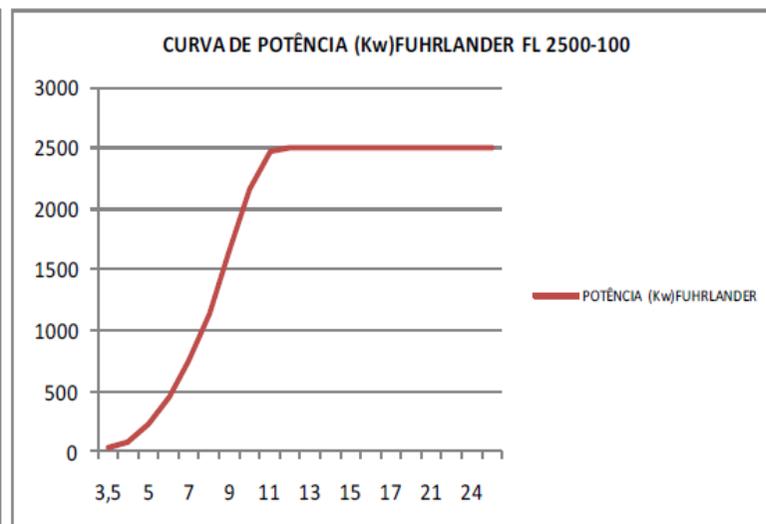
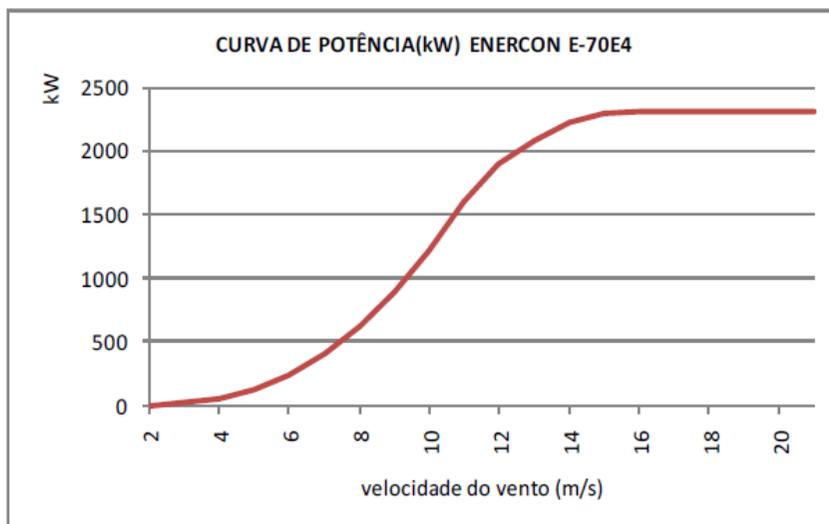
$$P_g = \eta \cdot \frac{1}{2} \rho V^3 A$$
, onde:

$\eta$  é o rendimento total do sistema

$\rho$  é a massa específica do ar (kg/m<sup>3</sup>)

$V$  é a velocidade do vento (m/s)

$A$  é a área varrida pelas pás (m<sup>2</sup>).



## Curva de potência de uma turbina eólica

A potência elétrica gerada é:

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

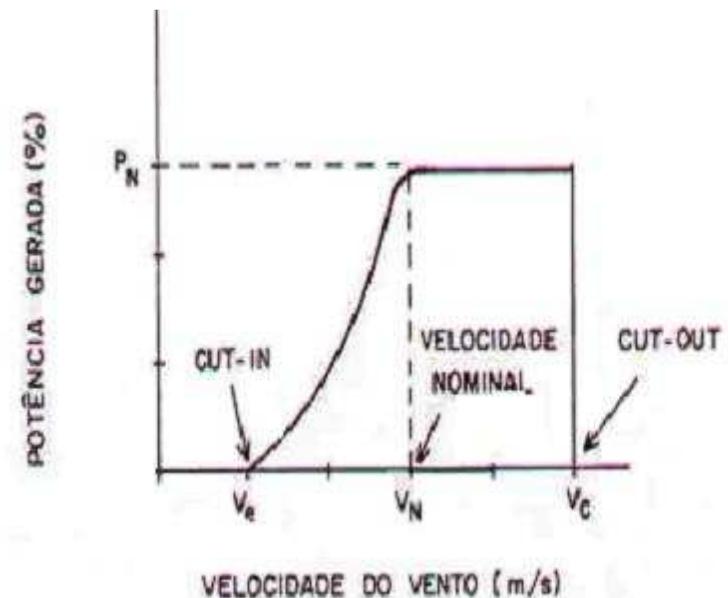
Na prática, a potência “ $P_e$ ” fornecida por uma turbina eólica em função da velocidade do vento é determinada pela curva de potência da turbina

A curva de potência ilustra três importantes velocidades características:

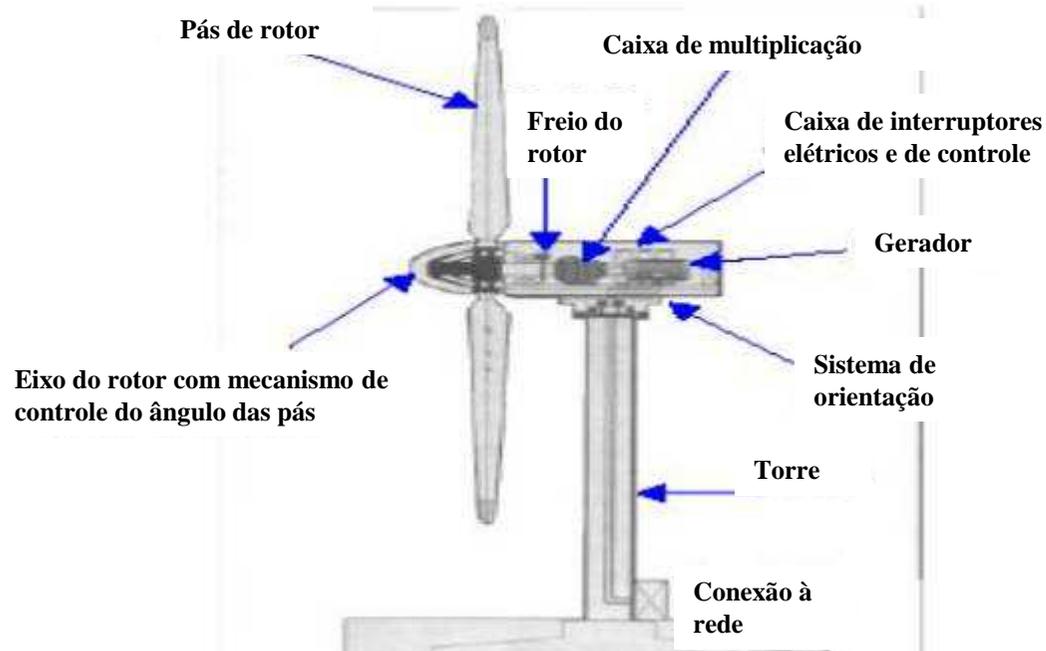
$V_e$  – Velocidade a partir da qual a turbina começa produzir energia

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

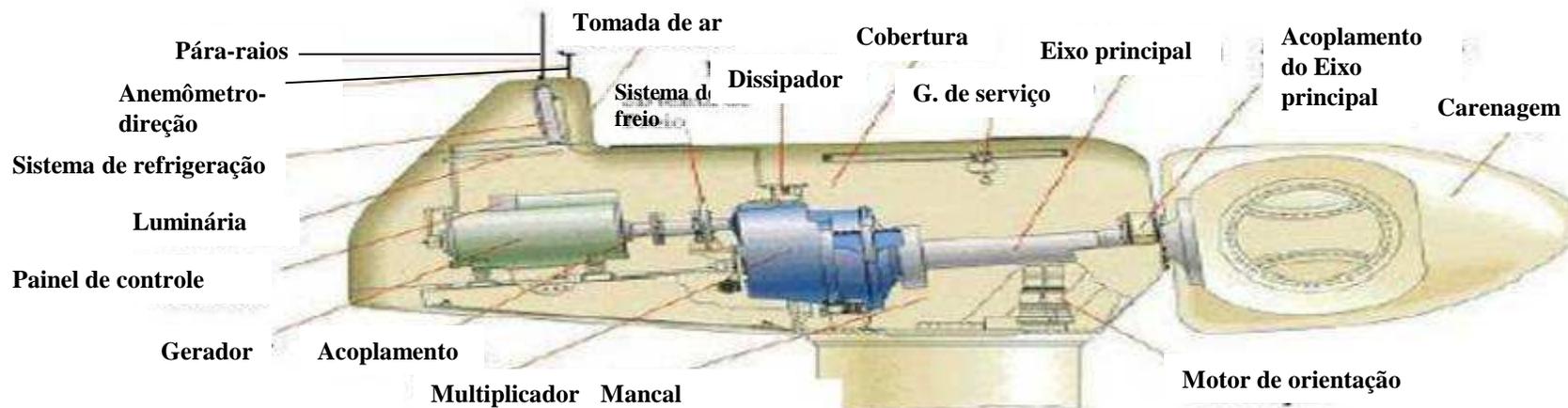
$V_c$  – velocidade do vento a partir da qual a turbina é desligada para evitar problemas estruturais



# 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

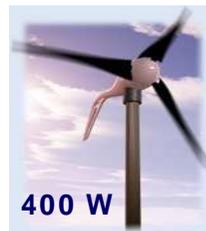


# Classificação dos Aerogeradores

| Tamanho | Diâmetro (m)  | Área do Rotor ( m <sup>2</sup> ) |
|---------|---------------|----------------------------------|
| 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**

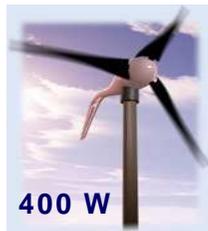


**Grande  
porte**



# 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

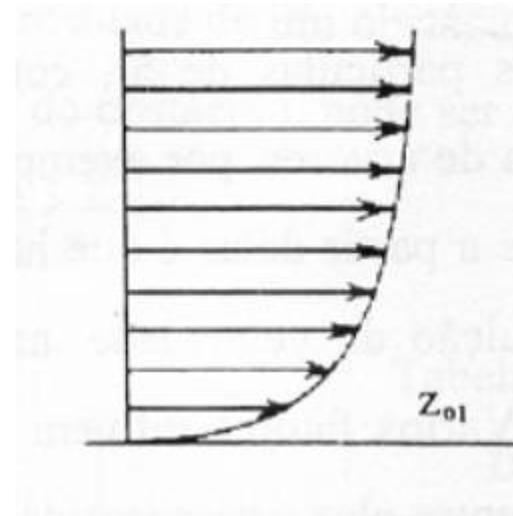
# Distribuição da velocidade do vento com a altura

## 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

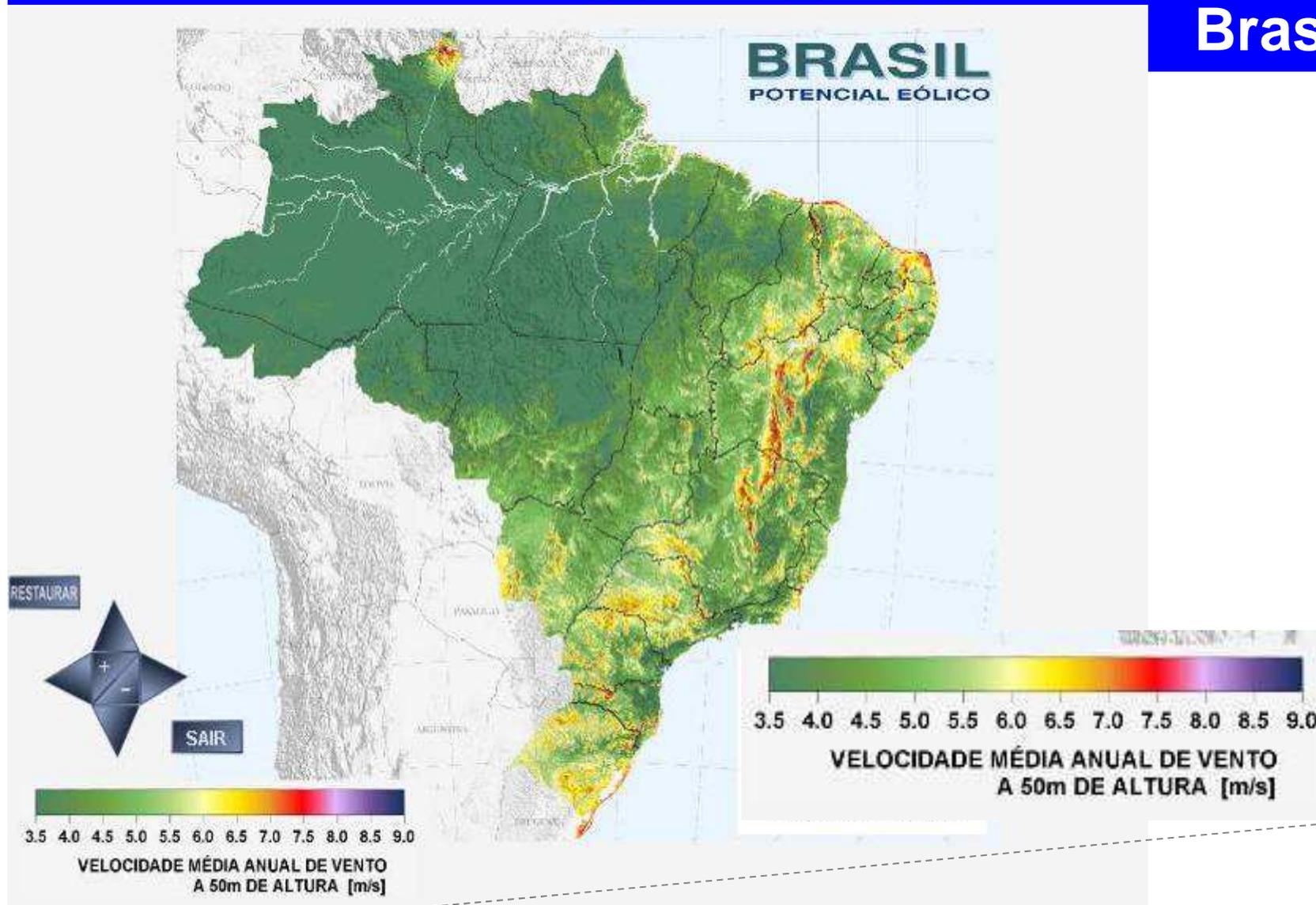
$$V = V_o \left( H / H_o \right)^n$$

## 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

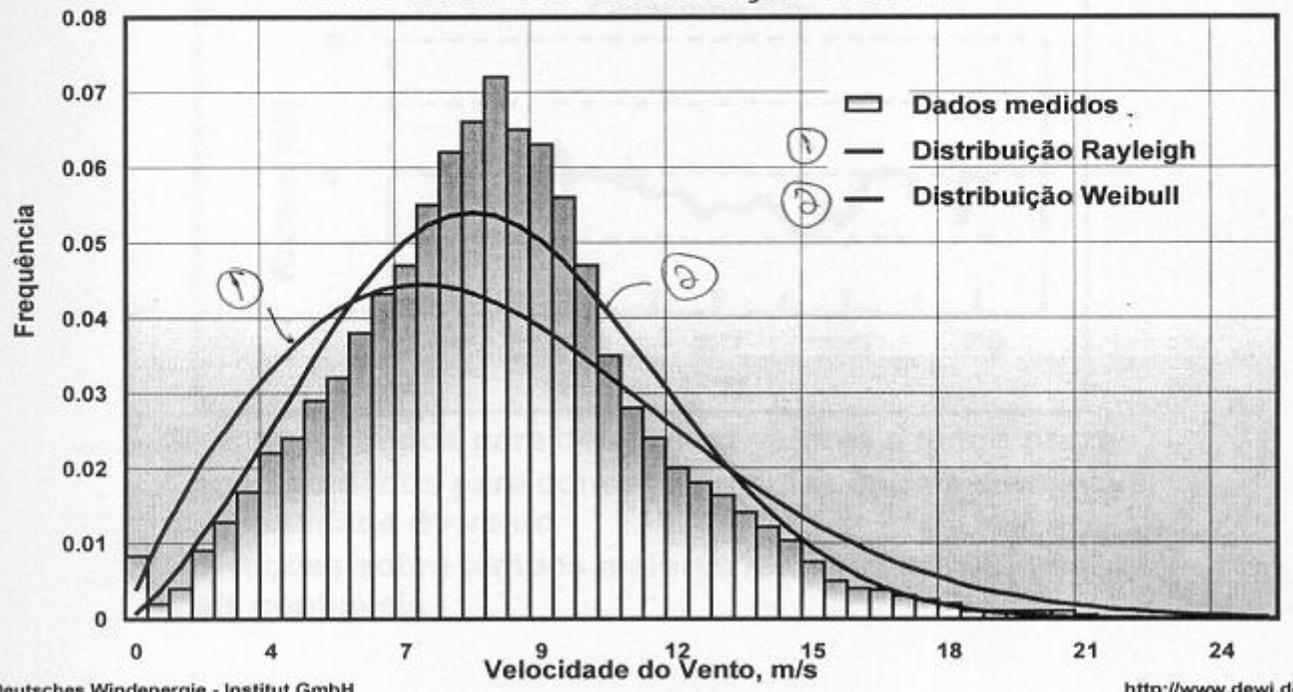


Fonte: Dutra, 2001

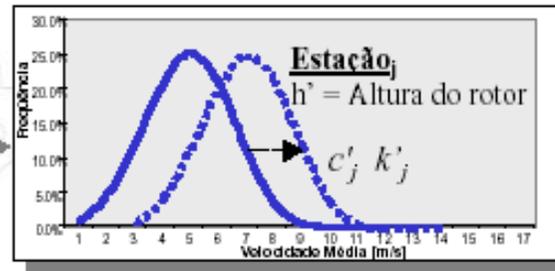
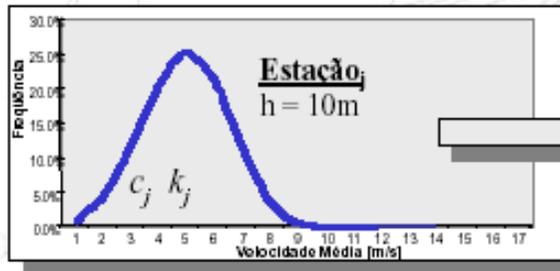


## Distribuição de Frequências da Velocidade do Vento

Dados medidos e distribuição teórica

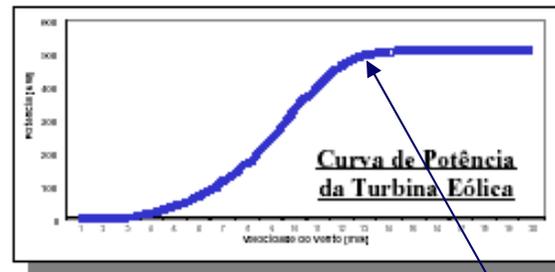


# Cálculo da Energia Produzida



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

Ex: Distribuição de Weibull



Energia  
MWh/ano

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

Potência nominal

## Variações na velocidade do vento

| Velocidade do vento (m/s) | Frequencia de ocorrencia (%) | Potencia do aerogerador (KW) | F(v).P(v) |
|---------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------|
| 1                         | 0,474                        | 0                            | 0,0       |
| 2                         | 1,436                        | 2                            | 0,0       |
| 3                         | 4,017                        | 16                           | 0,7       |
| 4                         | 7,149                        | 56                           | 4,0       |
| 5                         | 10,466                       | 127                          | 13,3      |
| 6                         | 12,855                       | 240                          | 30,9      |
| 7                         | 13,617                       | 400                          | 54,5      |
| 8                         | 13,040                       | 626                          | 81,6      |
| 9                         | 11,597                       | 892                          | 103,4     |
| 10                        | 8,097                        | 1223                         | 108,9     |
| 11                        | 6,144                        | 1590                         | 97,7      |
| 12                        | 3,942                        | 1830                         | 72,1      |
| 13                        | 2,797                        | 1950                         | 54,5      |
| 14                        | 1,674                        | 2050                         | 34,3      |
| 15                        | 0,885                        | 2050                         | 18,1      |
| 16                        | 0,453                        | 2050                         | 9,3       |
| 17                        | 0,268                        | 2050                         | 5,5       |
| 18                        | 0,153                        | 2050                         | 3,1       |
| 19                        | 0,091                        | 2050                         | 1,9       |
| 20                        | 0,022                        | 2050                         | 0,5       |
| 21                        | 0,002                        | 2050                         | 0,0       |
| 22                        | 0,002                        | 2050                         | 0,0       |
| 23                        | 0,004                        | 2050                         | 0,1       |
| 24                        | 0,000                        | 2050                         | 0,0       |
| 25                        | 0,000                        | 2050                         | 0,0       |
| Total                     |                              |                              | 694,6     |

$$EP(ano) = \sum fr_i \times P_i \times \Delta t$$

$$EP(ano) = 694,6 \\ \times 8760h/ano$$

$$= 6085 \text{ MWh}$$



## 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.

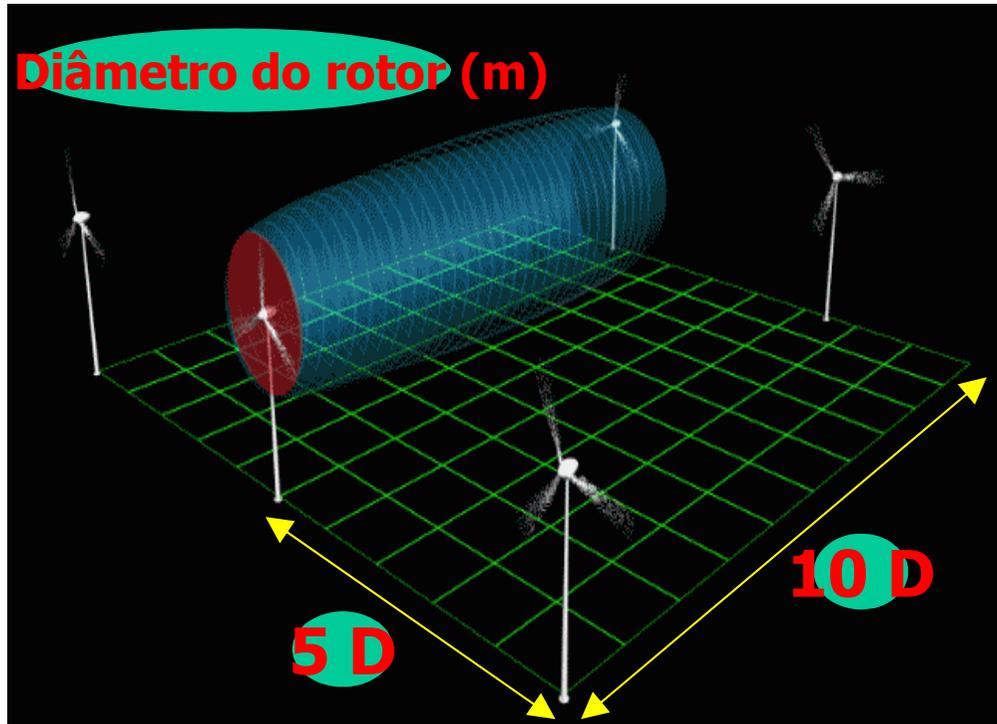
**Valores típicos para locais que possuem um bom regime de vento:  $35\% < FC < 45\%$**



# 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

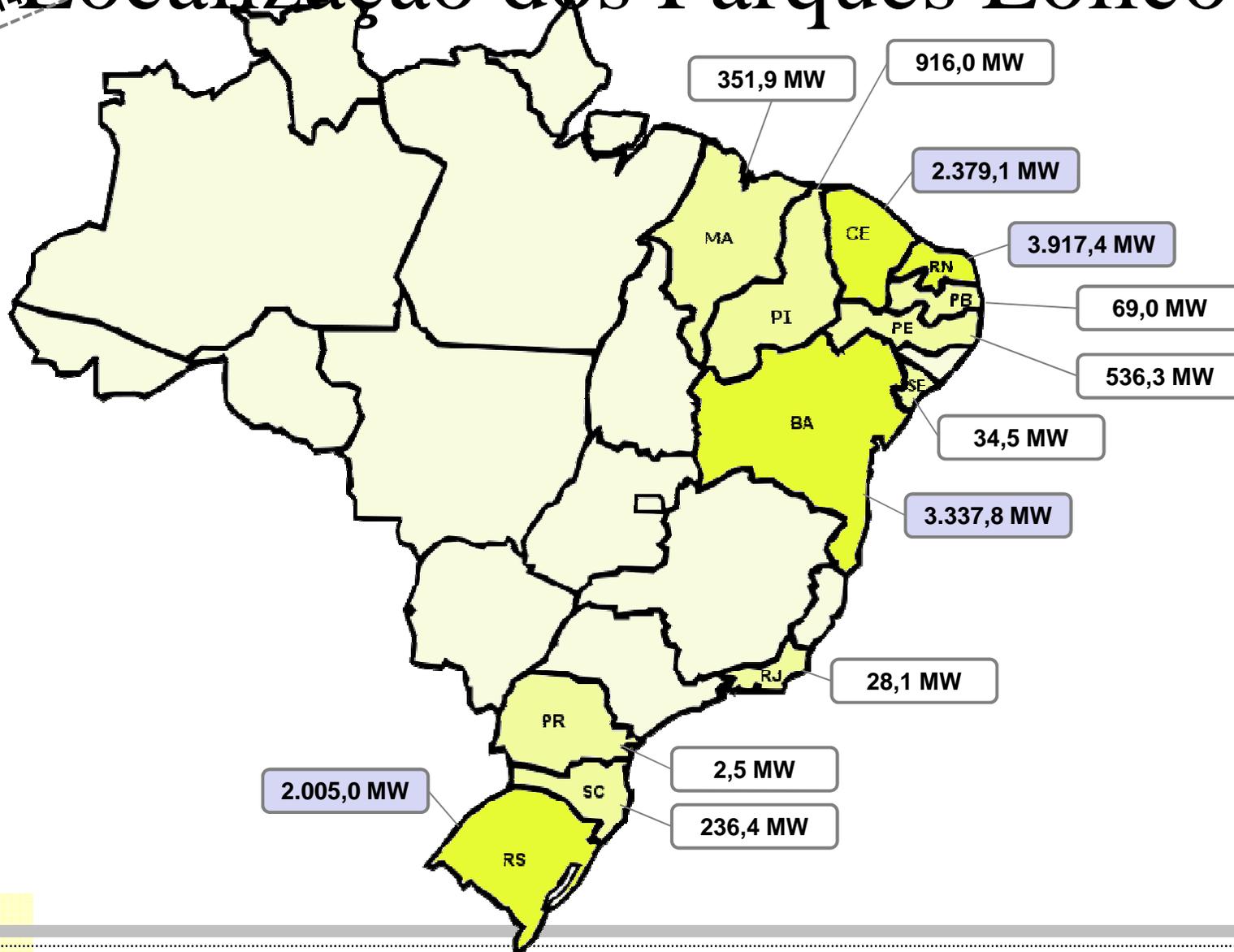
$$EG(\text{ano})_{\text{central}} = \sum_1^{nT} EG(\text{ano})_n \times (1 - \text{perdas})$$

Perdas na central

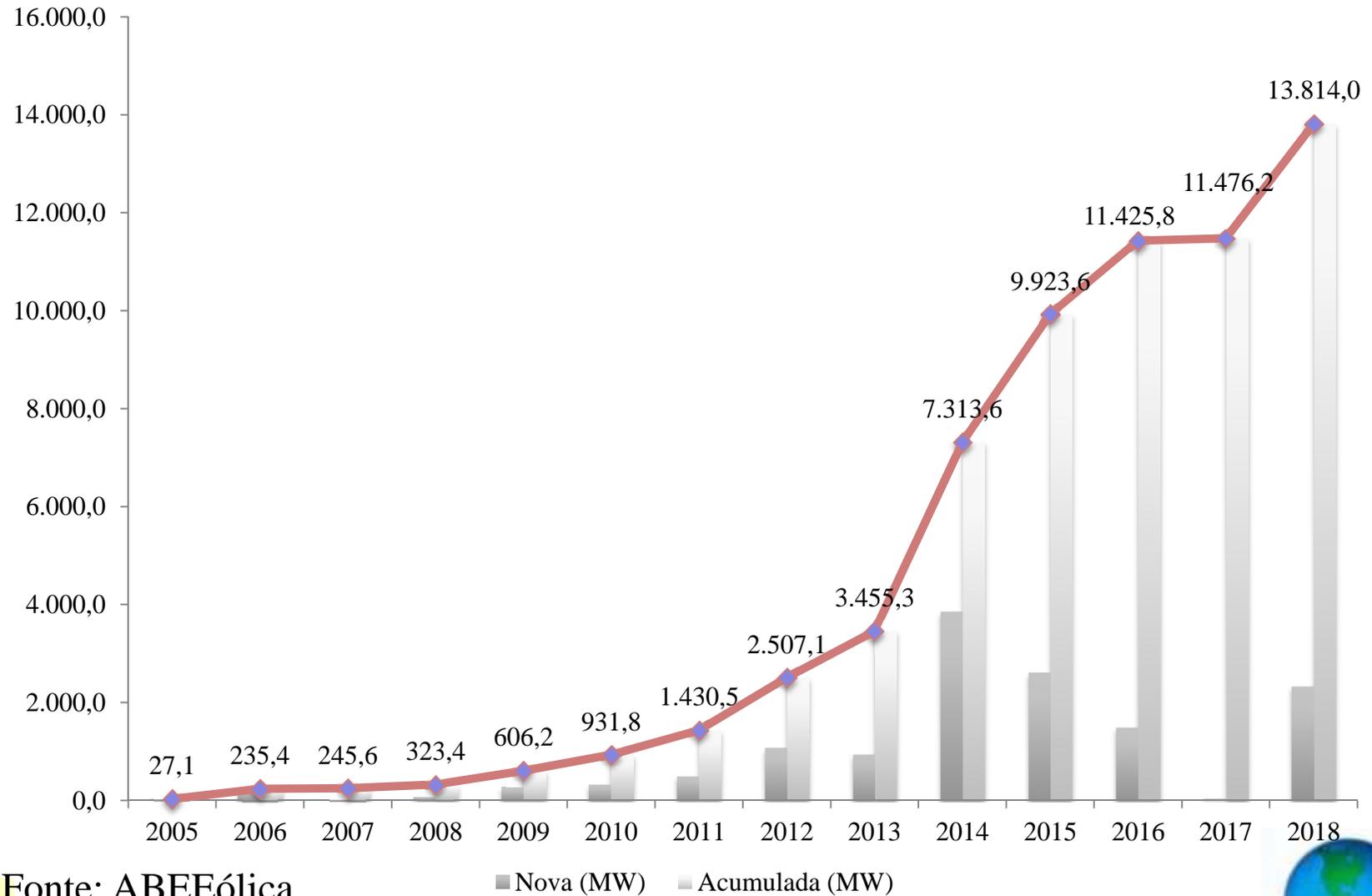


TOTAL  
13.814,0 MW

# Localização dos Parques Eólicos



# Capacidade Eólica Acumulada (MW)



Fonte: ABEEólica

■ Nova (MW) ■ Acumulada (MW)



# Ranking Mundial 2013 (GW)

|    |   |             |       |
|----|---|-------------|-------|
| 1  |  | China       | 91,42 |
| 2  |  | EUA         | 61,09 |
| 3  |  | Alemanha    | 34,25 |
| 4  |  | Espanha     | 22,96 |
| 5  |  | Índia       | 20,15 |
| 6  |  | Reino Unido | 10,53 |
| 7  |  | Itália      | 8,55  |
| 8  |  | França      | 8,25  |
| 9  |  | Canadá      | 7,80  |
| 10 |  | Dinamarca   | 4,77  |

|           |   |               |             |
|-----------|---|---------------|-------------|
| 11        |  | Portugal      | 4,72        |
| 12        |  | Suécia        | 4,47        |
| <b>13</b> |  | <b>Brasil</b> | <b>3,46</b> |
| 14        |  | Polônia       | 3,39        |
| 15        |  | Austrália     | 3,24        |
| 16        |  | Turquia       | 2,96        |
| 17        |  | Holanda       | 2,69        |
| 18        |  | Japão         | 2,66        |
| 19        |  | Romênia       | 2,60        |
| 20        |  | Irlanda       | 2,04        |

Fonte: GWEC

2012  
15º Colocado  
2,5 GW

2013  
13º Colocado  
3,4 GW

2014  
10º Colocado  
*Perspectiva*





Algumas centrais em operação





## Parque Eólico de Taíba - Suzlon

