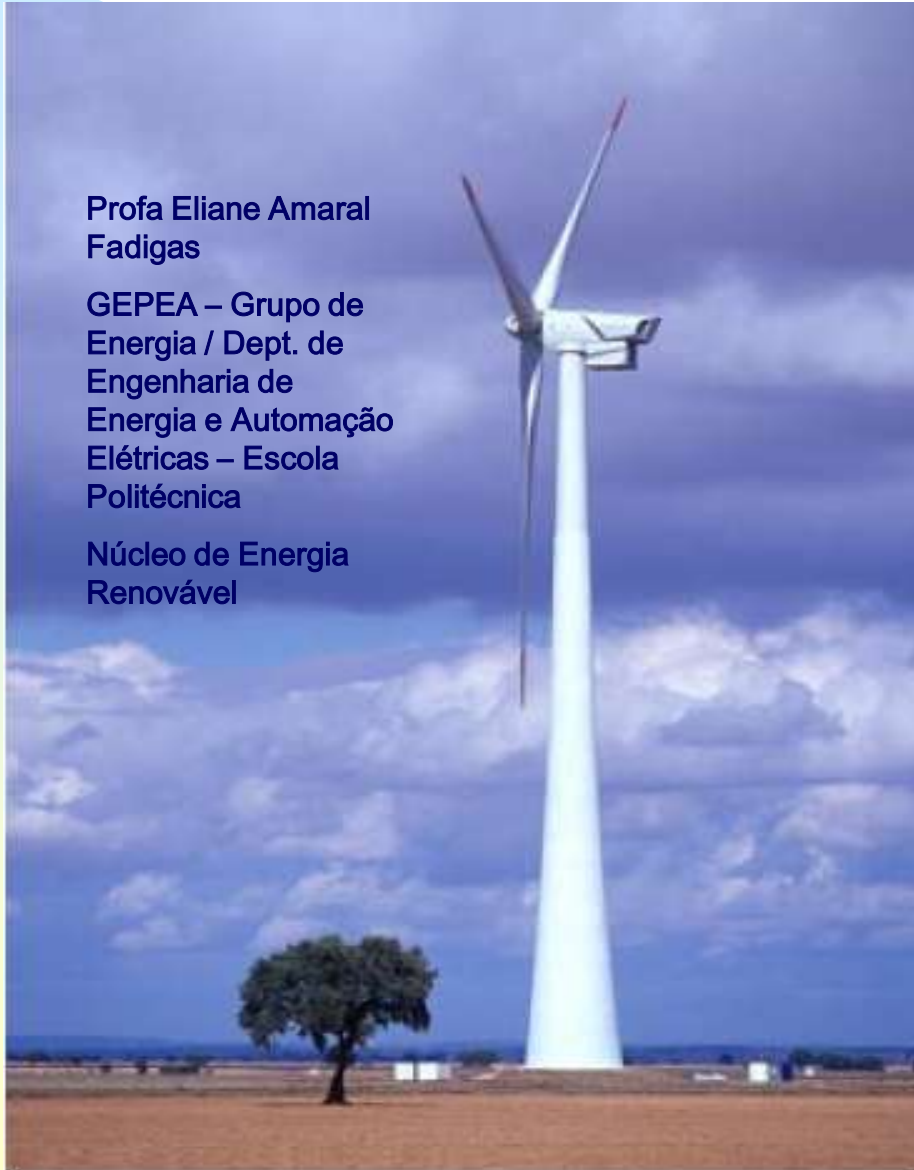


A Tecnologia eólica na geração de energia elétrica

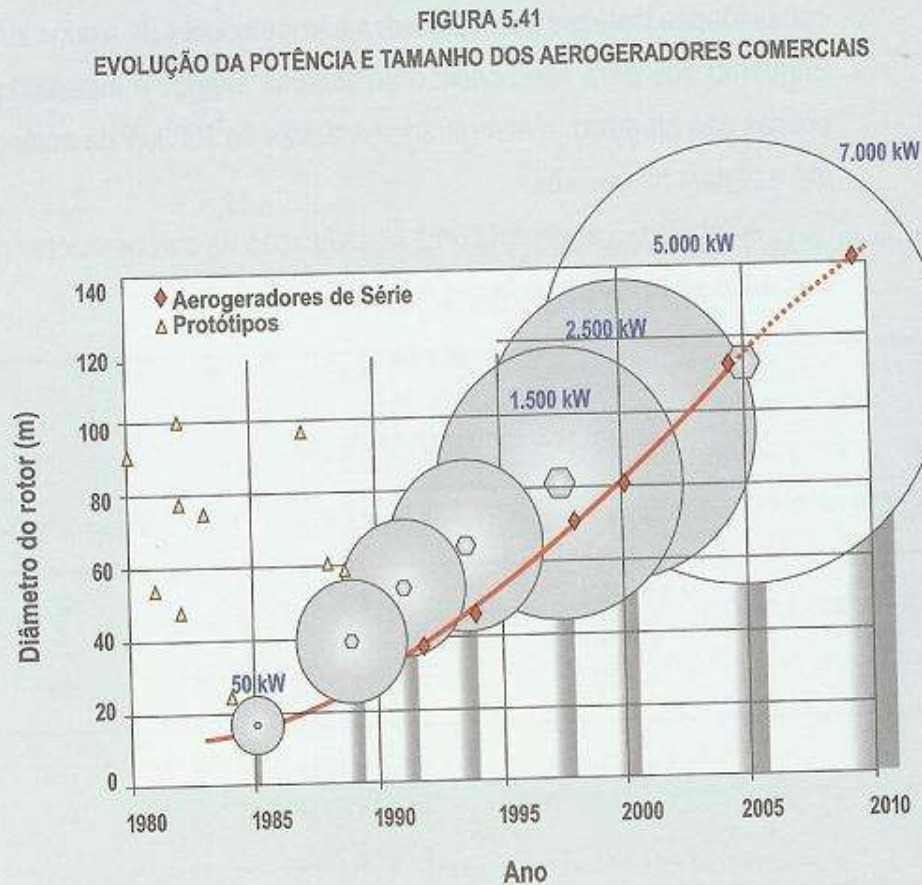
Profa Eliane Amaral
Fadigas

GEPEA – Grupo de
Energia / Dept. de
Engenharia de
Energia e Automação
Elétricas – Escola
Politécnica

Núcleo de Energia
Renovável



Evolução comercial das turbinas de grande porte



Fonte: DEWI

Classificação e aplicação dos Aerogeradores



Grande porte: $P > 500 \text{ kW}$



Pequeno porte: $P < 50 \text{ kW}$

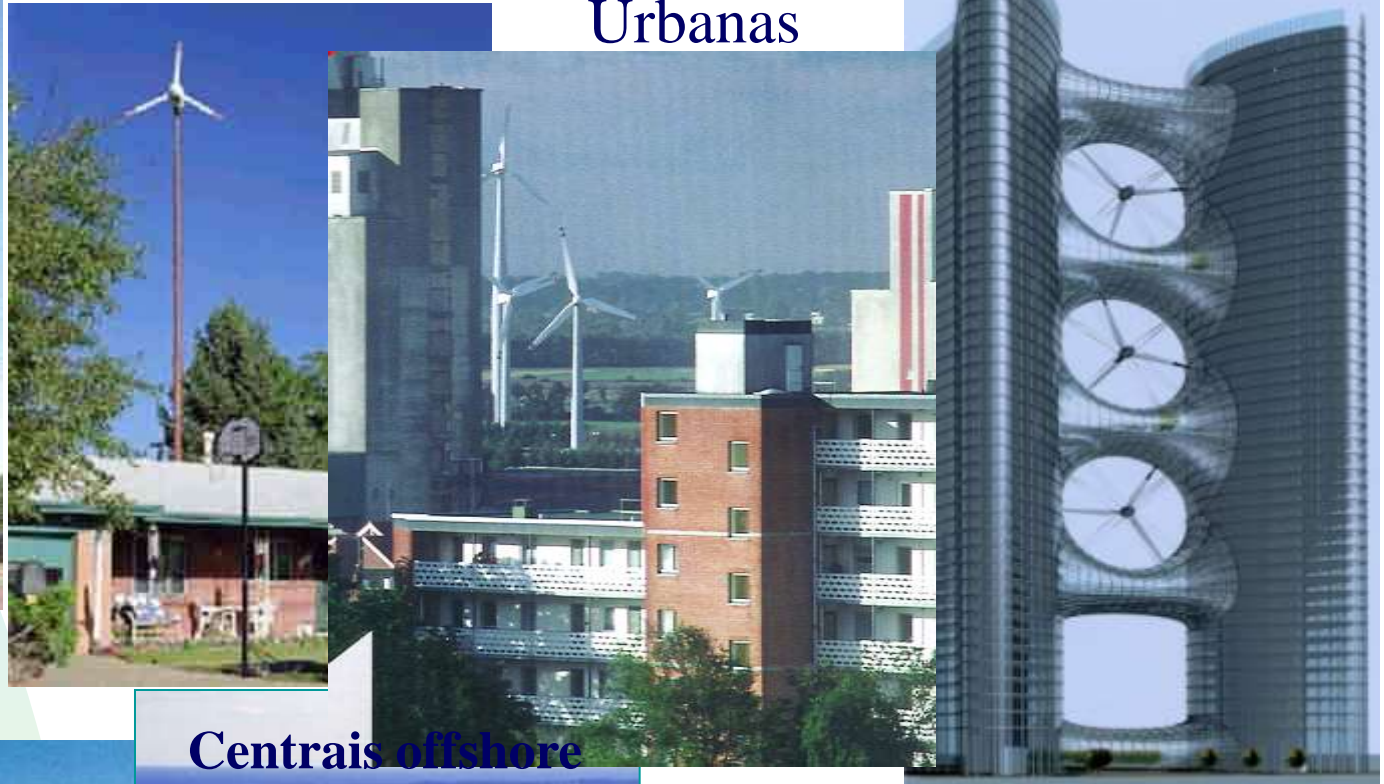
Médio Porte: $100 \text{ kW} < P < 500 \text{ kW}$

Grande porte $> 500 \text{ kW}$

Sistema Híbrido



Urbanas



Sistemas autônomos



Centrais offshore



Centrais onshore interligada á rede elétrica



Turbina de eixo horizontal

Figure 7.16 Multi-bladed wind pump

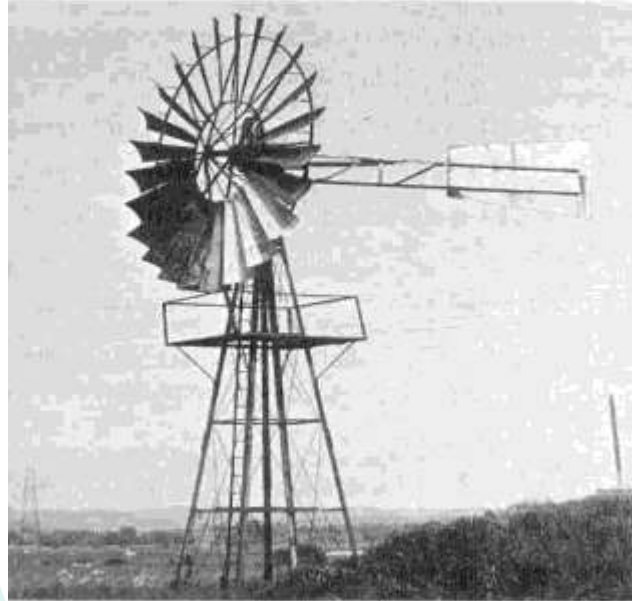


Figure 7.17 Two-bladed HAWT (WEG MS400 turbine)



Figure 7.18 Three-bladed HAWT (Howden 330 kW turbine)



Figure 7.19 Single-bladed HAWT (MBB 600 kW turbine)



Turbina de eixo vertical



modelo Darrieus

modelo V

modelo H.

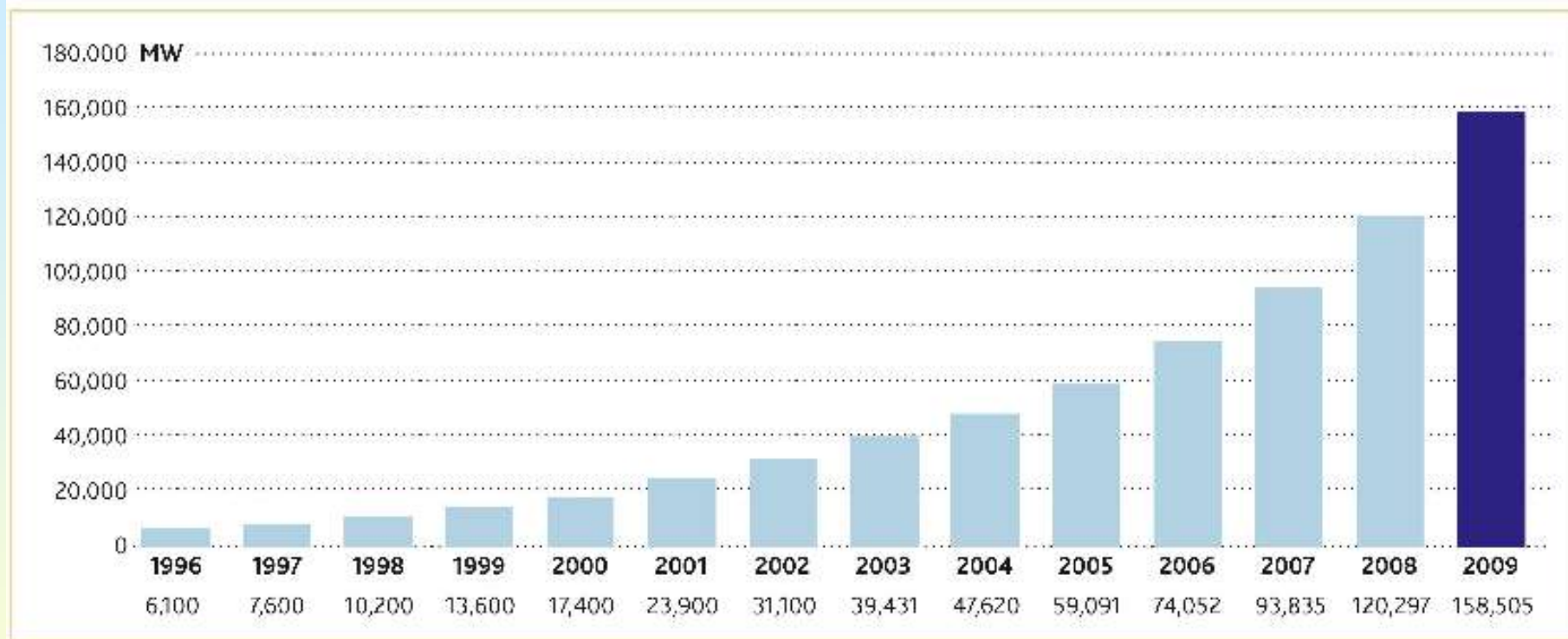
10 primeiros fabricantes em capacidade instalada no mundo

MW - 2009

Vestas (Denmark)	35.000
Enercon (Germany)	19.000
Gamesa (Spain)	16.000
GE Energy (Germany/USA)	15.000
Siemens (Denmark/Germany)	8.800
Suzlon (India)	6.000
Nordex (Germany)	5.400
Acciona (Spain)	4.300
Repower (Germany)	3.000
Goldwind (China)	2.889

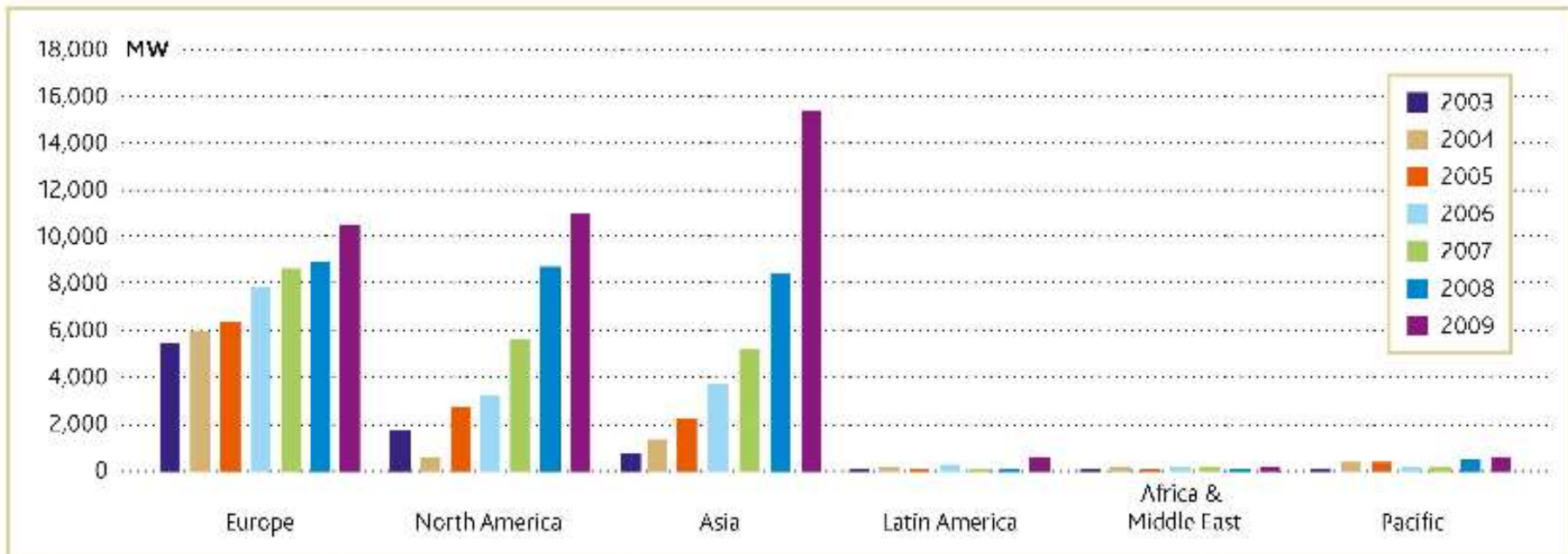
Evolução da capacidade instalada acumulada

GLOBAL CUMULATIVE INSTALLED CAPACITY 1996-2009

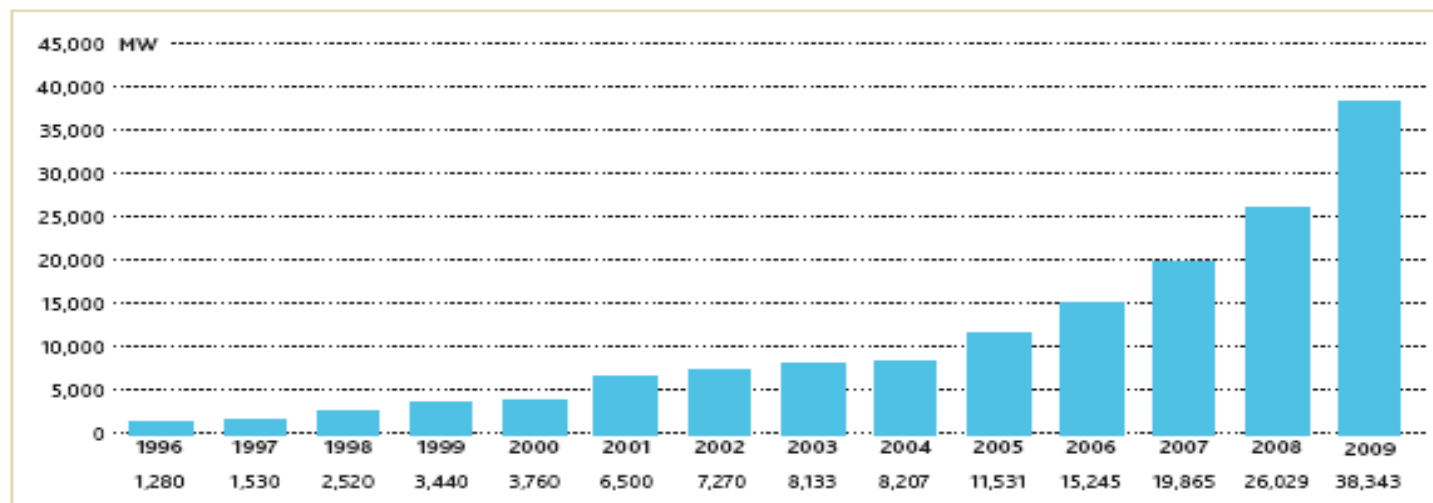


Potência total instalada em 2009 = 158,5GW

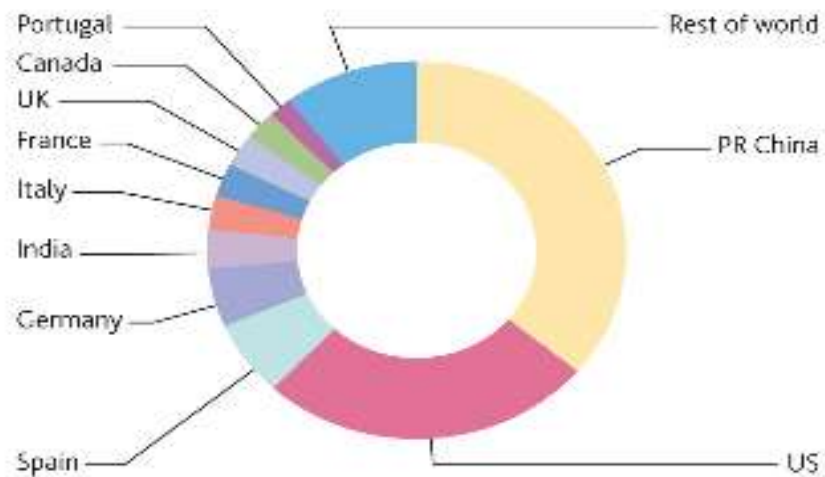
ANNUAL INSTALLED CAPACITY BY REGION 2003-2009



GLOBAL ANNUAL INSTALLED CAPACITY 1996-2009



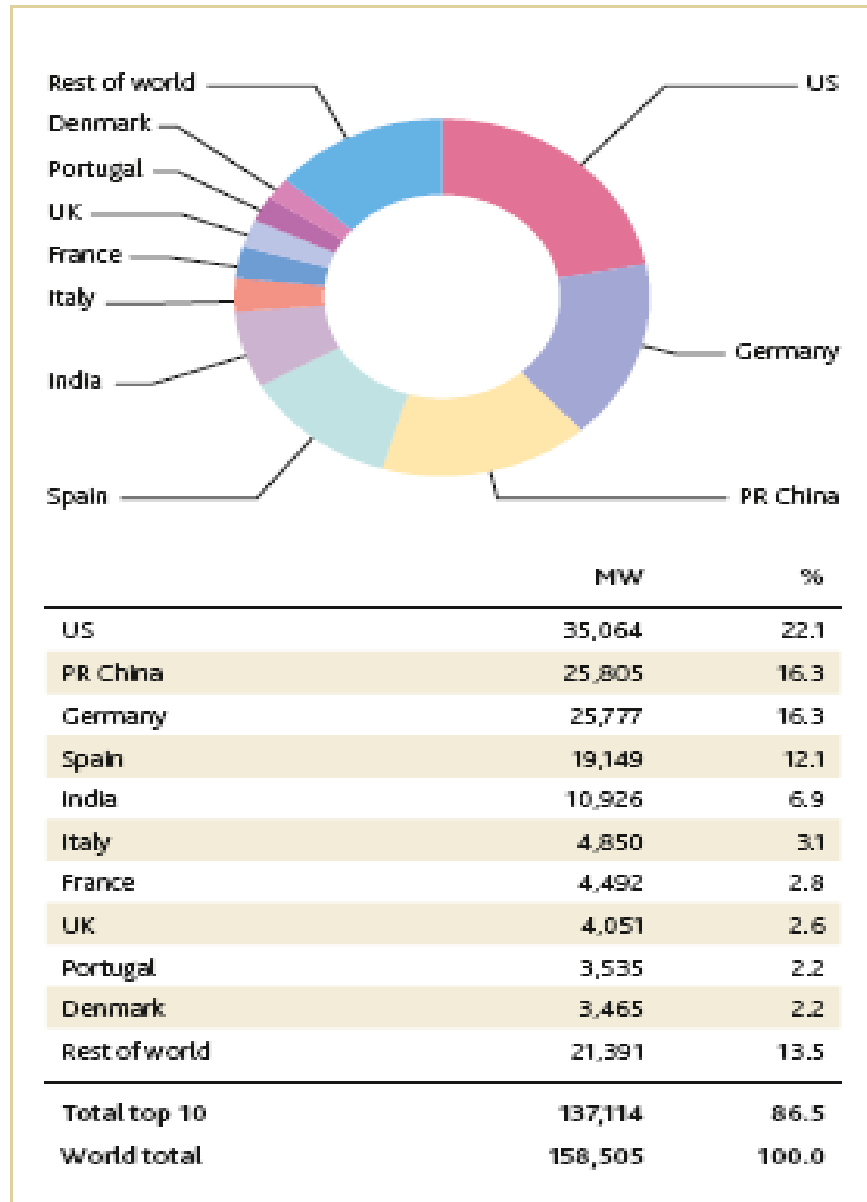
TOP 10 NEW INSTALLED CAPACITY 2009



	MW	%
PR China	13,803	36.0
US	9,996	26.1
Spain	2,459	6.4
Germany	1,917	5.0
India	1,271	3.3
Italy	1,114	2.9
France	1,088	2.8
UK	1,077	2.8
Canada	950	2.5
Portugal	673	1.8
Rest of world	3,994	10.4
Total top 10	34,349	89.6
World total	38,343	100.0

TOP 10 CUMULATIVE INSTALLED CAPACITY 2009

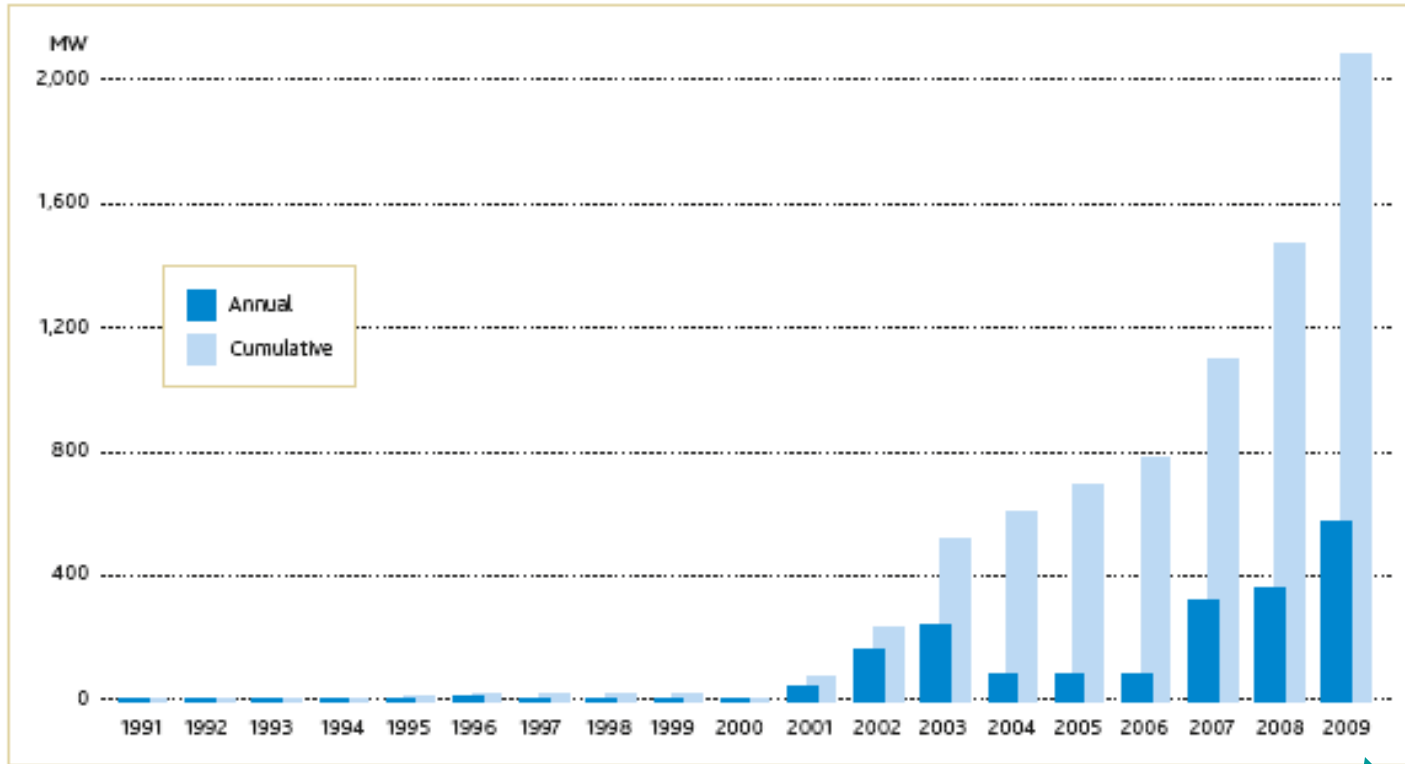
10 primeiros países em capacidade instalada



Capacidade anual instalada e acumulada na EU

– Plantas offshore -

ANNUAL AND CUMULATIVE INSTALLED CAPACITY IN MW 1991–2009



País (Europa)	Capacidade instalada MW
Inglaterra	883
Dinamarca	646
Holanda	247
Suécia	164
Alemanha	42
Bélgica	30
Irlanda	25
Finlândia	24
Noruega	2.3 experimental

830 turbinas instaladas

39 fazendas eólicas

9 países

Profundidade média
= 10.6m

Distância média da
costa – 12,8 km

Source: EWEA

Usinas Eólicas em Operação no Brasil

Usina	Potência Fiscalizada (kW)	Usina	Potência Fiscalizada (kW)
<u>Eólica de Prainha</u> - CE	10.000	<u>Canoa Quebrada</u> - CE	57.000
<u>Eólica de Taíba</u> - CE	5.000	<u>Eólica Água Doce</u> - SC	9.000
<u>Eólica-Elétrica Experimental do Morro do Camelinho</u> - MG	1.000	<u>Parque Eólico de Osório</u> - RS	50.000
<u>Eólio - Elétrica de Palmas</u> - PR	2500	<u>Parque Eólico Sangradouro</u> - RS	50.000
<u>Eólica de Fernando de Noronha</u> - PE	225	<u>Taíba Albatroz</u> - CE	16.500
<u>Parque Eólico de Beberibe</u> - CE	25.600	<u>Parque Eólico dos Índios</u> - RS	50.000
<u>Mucuripe</u> - CE	2.400	<u>Bons Ventos</u> - CE	50.000
<u>RN 15 - Rio do Fogo</u> - RN	49.300	<u>Xavante</u> - PE	4.950
<u>Praia do Morgado</u> - CE	28.800	<u>Mandacaru</u> - PE	4.950
<u>Pirauá</u> - PE	4.950	<u>Santa Maria</u> - PE	4.950
<u>Eólica de Bom Jardim</u> - SC	600	<u>Gravatá Fruitrade</u> - PE	4.950
<u>Foz do Rio Choró</u> - CE	25.200	<u>Millennium</u> - PB	10.200
<u>Praia Formosa</u> - CE	104.400	<u>Presidente</u> - PB	4.500
<u>Eólica Olinda</u> - PE	225	<u>Camurim</u> - PB	4.500
<u>Eólica Canoa Quebrada</u> - CE	10.500	<u>Albatroz</u> - PB	4.500
<u>Lagoa do Mato</u> - CE	3.230	<u>Coelhos I</u> - PB	4.500
<u>Parque Eólico do Horizonte</u> - SC	4.800	<u>Coelhos III</u> - PB	4.500
<u>Eólica Icaraizinho</u> - CE	54.600	<u>Atlântica</u> - PB	4.500
<u>Eólica Paracuru</u> - CE	23.400	<u>Caravela</u> - PB	4.500
<u>Eólica Praias de Parajuru</u> - CE	28.804	<u>Coelhos II</u> - PB	4.500
<u>Pedra do Sal</u> - PI	18.000	<u>Coelhos IV</u> - PB	4.500
<u>Parque Eólico Enacel</u> - CE	31.500	<u>Mataraca</u> - PB	4.500
<u>Macau</u> - RN	1.800		

Fonte: Aneel

Total = 45 usinas Potência = 794.334 kW

Usinas Eólicas em Operação por Estado

ESTADO	Nº de Usinas	POTÊNCIA (kW)	%
Ceará	16	476.934	60,04
Rio Grande do Sul	3	150.000	18,88
Paraíba	11	55.200	6,94
Rio Grande do Norte	2	51.100	6,43
Pernambuco	7	25.200	3,17
Piauí	1	18.000	2,26
Santa Catarina	3	14.400	1,81
Paraná	1	2.500	0,314
Minas Gerais	1	1.000	0,125
Total Brasil	45	794.334	100

Usinas Eólicas em construção

USINA	POTÊNCIA OUTORGADA - kW	ESTADO
Volta do Rio	42200	Ceará
Gargaú	25.050	Rio de Janeiro
Total	70.050	

Leilão de Energia Eólica – Contratos de Energia de Reserva

Habilitados - 339 empreendimentos no total de 10000MW

Preço teto – 189,00 R\$/MWh

Potência contratada = 1805 MW, sendo 783 MW médios

Preço médio = 148,39 R\$/MWh

ESTADOS	N. de projetos	Potência contratada (MW)
Rio Grande do Norte	23	657
Ceará	21	542
Bahia	18	390
Rio Grande do Norte	8	189
Sergipe	1	30

Componentes de um aerogerador de eixo horizontal

- Pás + Rotor
- Mecanismo de controle de pa
- Mecanismo de orientação da
- Eixos – baixa e alta rotação
- Caixa multiplicadora de veloc
- Gerador Elétrico (Conversor)
- Sistema de Controle e freio
- Sistema Estrutural - torre
- Sistema de refrigeração
- Sistema de monitoramento
- Controle
- Proteção
- Nacele
- Torre

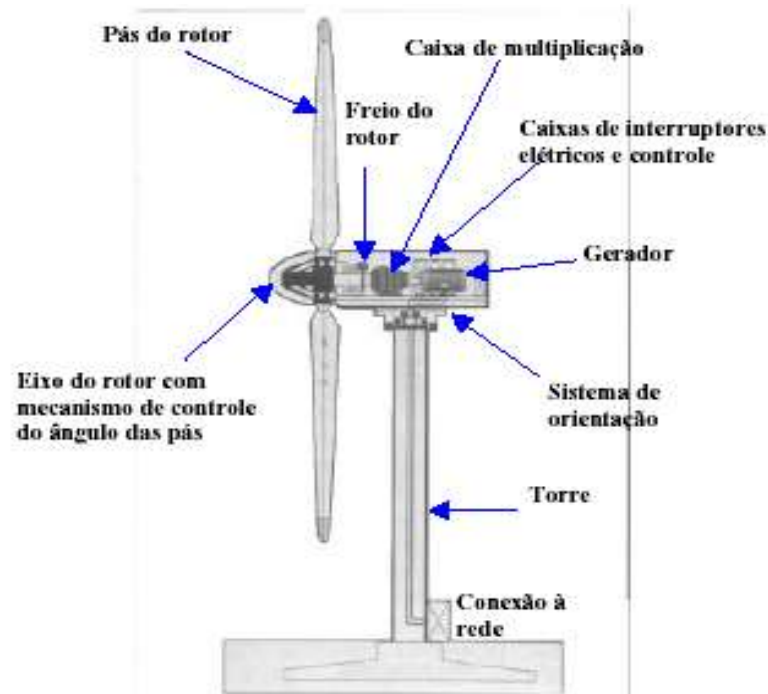
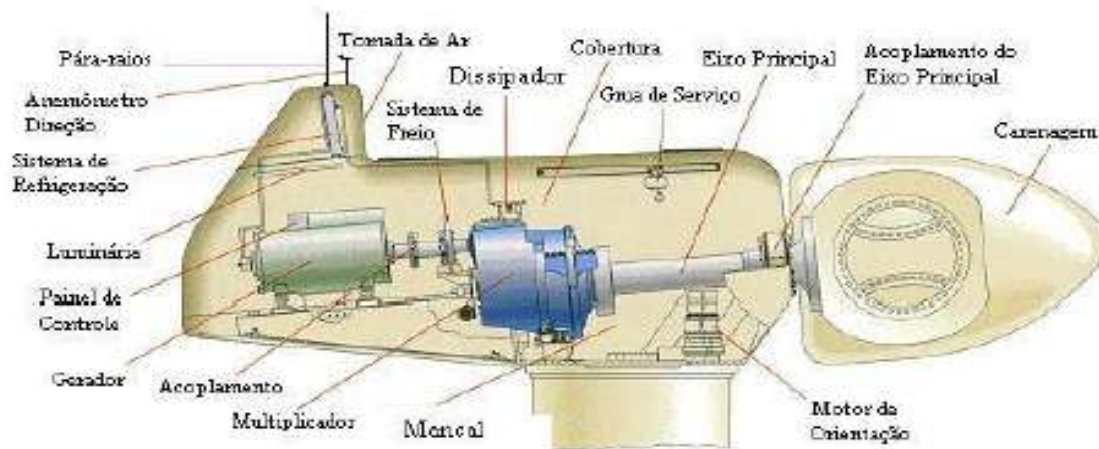


Figura 1.15 - Seção de uma turbina eólica típica conectada à rede.



SUPORTE ESTRUTURAL - Torre

Material : concreto, aço



Tubular

estaiada

**Peso: 40t , 50 metros , 600kW
metros**



Treliçada

Existem algumas opções de configuração relacionadas ao projeto de uma turbina e que são escolhidos conforme estudos técnicos e econômicos:

número de pás do rotor;

- orientação do rotor com relação à torre;
- material em que são feitas as pás, método de construção, perfil do aerofólio;
- projeto do cubo: rígido, flexível, em balanço;
- controle do torque aerodinâmico: estol e controle de passo;
- velocidade do rotor: fixa ou variável;
- orientação do rotor com relação à direção do vento: livre ou mecanismo ativo (yaw);
- gerador elétrico: síncrono ou assíncrono (gaiola de esquilo ou rotor bobinado);
- multiplicação de velocidade do rotor: com caixa de engrenagem (eixo paralelo ou planetário), sem caixa de engrenagem (acoplamento direto do gerador elétrico ao eixo de baixa rotação).

ETAPAS E ALGUNS ASPECTOS IMPORTANTES QUE ENVOLVEM O PROJETO E IMPLANTAÇÃO DE UMA FAZENDA EÓLICA

Início do estudo

Escolha do local

Medir o vento no local

Tratamento dos dados de vento

Escolher os aerogeradores

Definir a capacidade da fazenda eólica

Definir o lay-out do aerogeradores

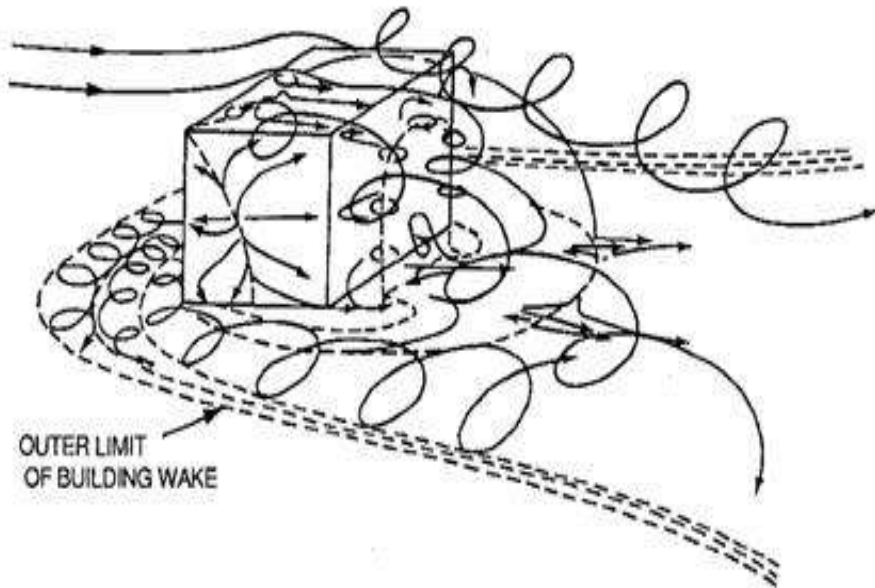
Predizer a energia gerada na fazenda eólica

Definir a conexão na rede

Determinar os investimentos

Estudo de viabilidade econômica e financeira

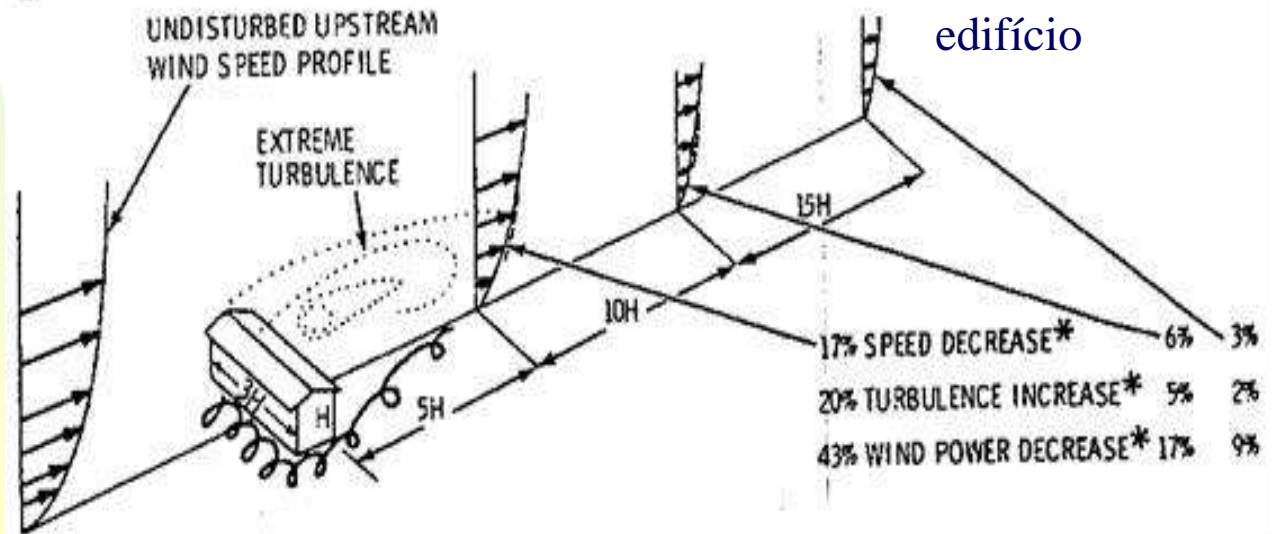
Escolha do local



Aspectos importantes

- Região promissora
- Espaço para instalação de aerogeradores
- rugosidade do terreno e do entorno
- obstáculos no terreno e ao seu redor
- acesso ao local
- distância da rede e viabilidade de conexão
- autorização do proprietário
- restrições ambientais

H = altura do edifício



Perfil do vento em terrenos com obstáculos

Medição do vento

Potência eólica

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

Watts

Densidade de Potência

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

D= diâmetro do rotor



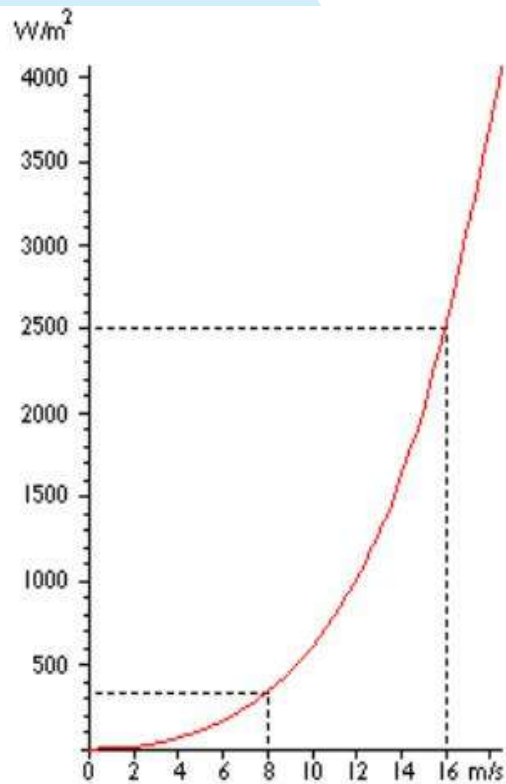
$$A = \frac{\pi}{4} D^2$$

Potência elétrica

$$P_{el} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \eta$$

Potência do vento em função da velocidade

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



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

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

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

8 vezes mais potência

314Watts = 5 lâmpadas de 60 Watts

Curva da potência do vento em função da velocidade

Tratamento dos dados de vento

Para o projeto de uma central eólica é necessário a instalação de torre anemométrica e medição do vento por pelo menos 01 ano



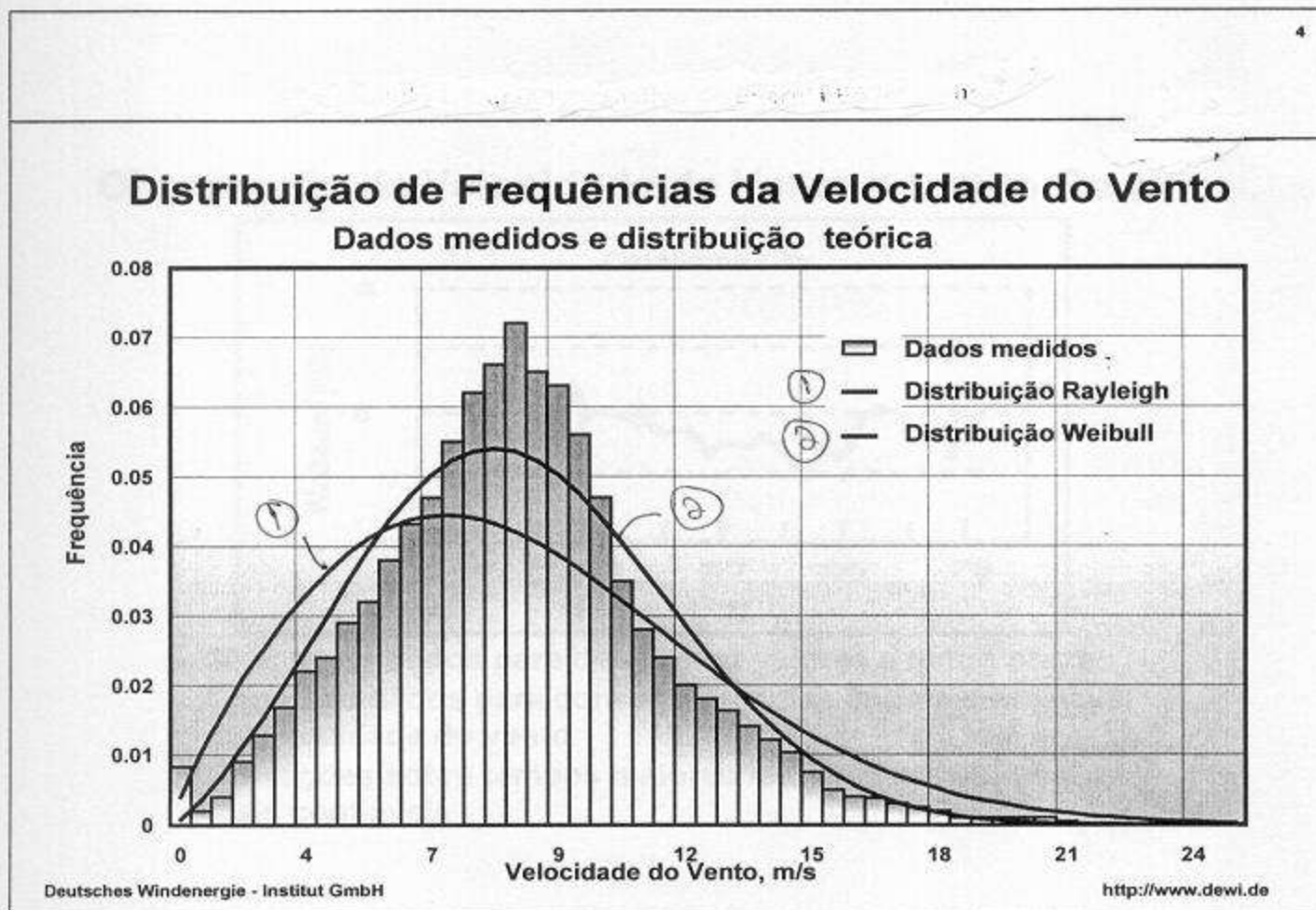
Tratamento dos dados de vento: CARACTERIZAÇÃO DO REGIME DE VENTO E LEVANTAMENTO DE POTENCIAL EÓLICO

O Regime de vento pode ser caracterizado por:

- fatores geográficos**
- indicações da direção em que sopram**
- altura de medição**
- características do terreno**
- parâmetros atmosféricos (temperatura, pressão)**

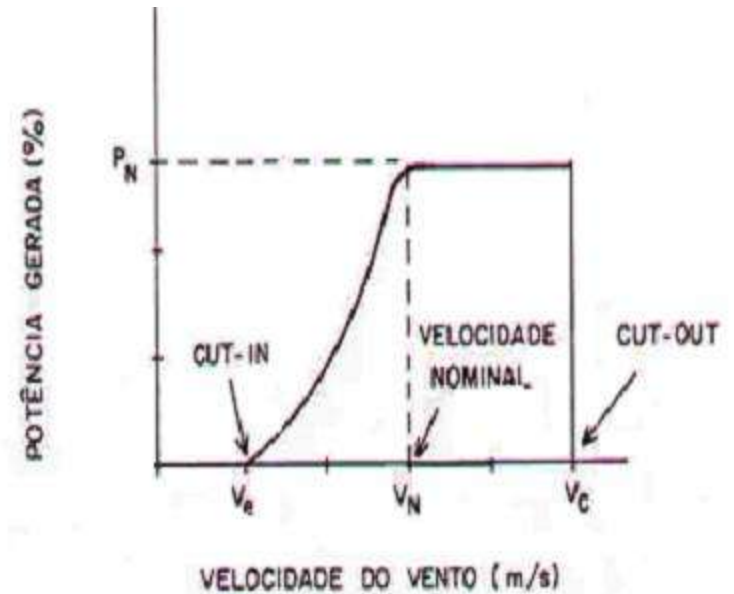
Informações utilizadas para não só estimar a produção de energia de uma turbina como também escolher o melhor local para instalação considerando aspectos de produção, custos, impactos ambientais, etc

Tratamento do dados de vento



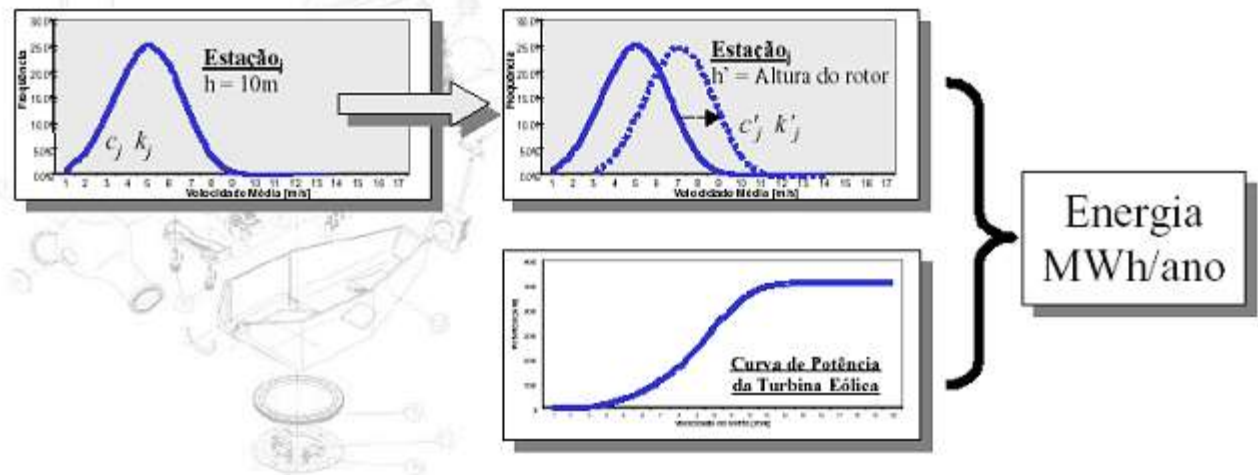
Escolha dos aerogeradores

- fabricação e assistência técnica
- tecnologia adotada
- modelos e tamanhos disponíveis
- infraestrutura para transporte e montagem
- produção de energia do aerogerador no local
- custo de instalação do aerogerador
- custo de O&M



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

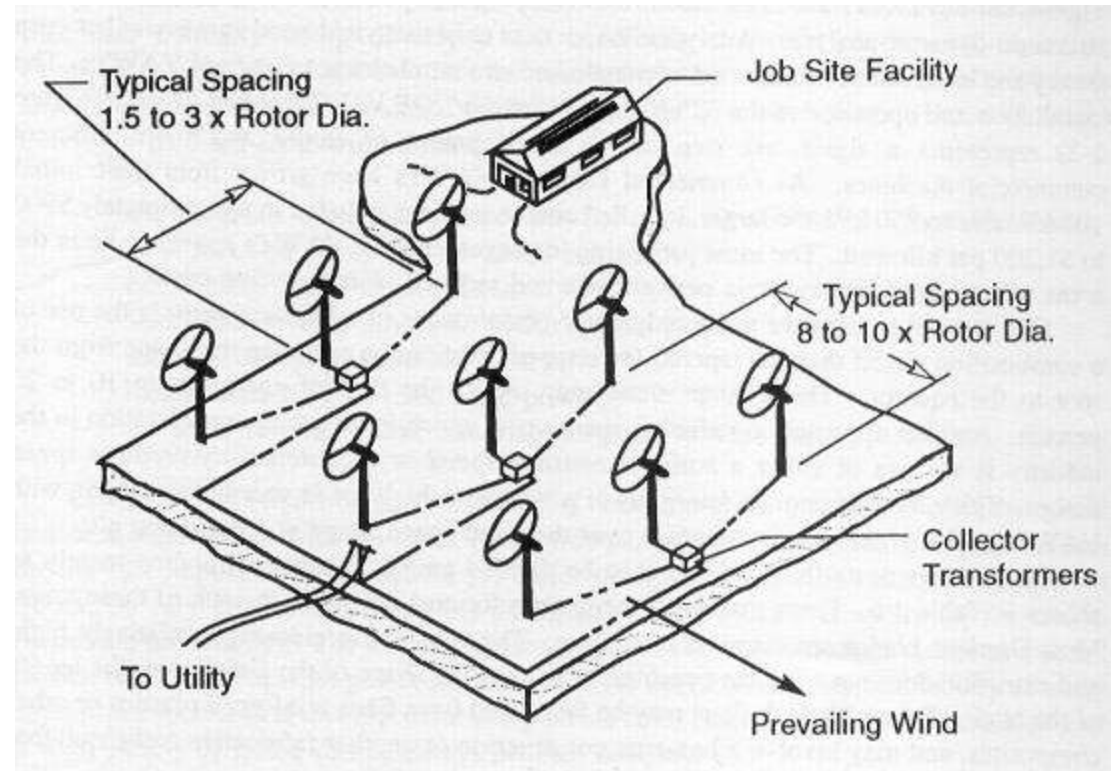
Determinação
do Desempenho
da turbina no
local escolhido



Definição da capacidade do parque

Definição da disposição dos aerogeradores no parque

Onde colocar e qual o



O espaçamento afeta: produção de energia e aumenta a fadiga nas pás das turbinas instaladas a jusante; provoca flutuações na saída de potência, afetando a rede local.

Comportamento do vento após passar pela turbina

Potência eólica

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

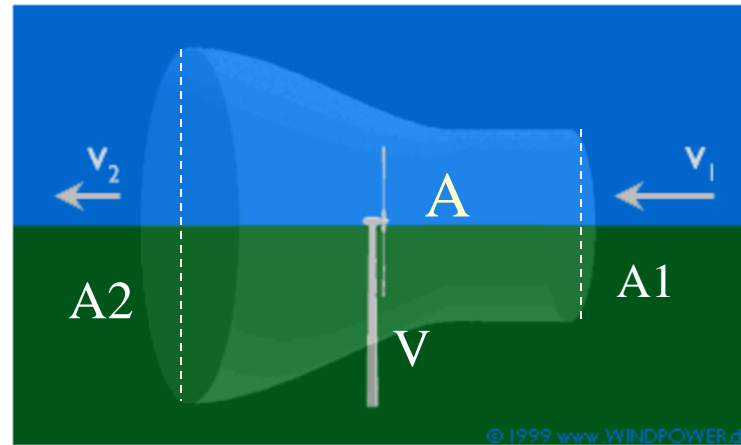
Potência mecânica extraída pelo rotor

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p$$

Potência elétrica

$$P_{el} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \eta$$

Teorema de Betz



Windpower.dk, 1998

Lei da continuidade de fluxo

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 = \dot{m}$$

$\dot{m} \rightarrow$ Fluxo de massa

Sendo

$V_1 > V > V_2$ $A = \text{área do rotor}$

INFLUÊNCIA DA ROTAÇÃO DA ESTEIRA FORMADA PELO ROTOR



<http://www.windpower.dk/tour>

Interferência da esteira; depende da velocidade de ponta de pá

Predição da energia gerada no parque eólico

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

Energia anual gerada por uma central eólica

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

nT = número de turbinas

Energia gerada por cada turbina

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

Perdas na central

Escolha da conexão á rede e definição do projeto de conexão

- Conexão em alimentador de distribuição
- Em subestação de média tensão
- Construção de linhas de transmissão
- Subestações específicas

Estudos elétricos devem ser realizados:

- fluxo de potência
- estabilidade transitória e de tensão
- análise de harmônicas , perdas etc.
- Análise da qualidade de energia

Formas de conexão com a rede

- **Conexão direta** – gerador acoplado diretamente na rede elétrica
- **Indireta** – gerador acoplado indiretamente na rede elétrica

Tipos de geradores utilizados:

- assíncrono: gaiola; rotor bobinado
- Síncrono
- Imas permanentes

Tipo de rotor

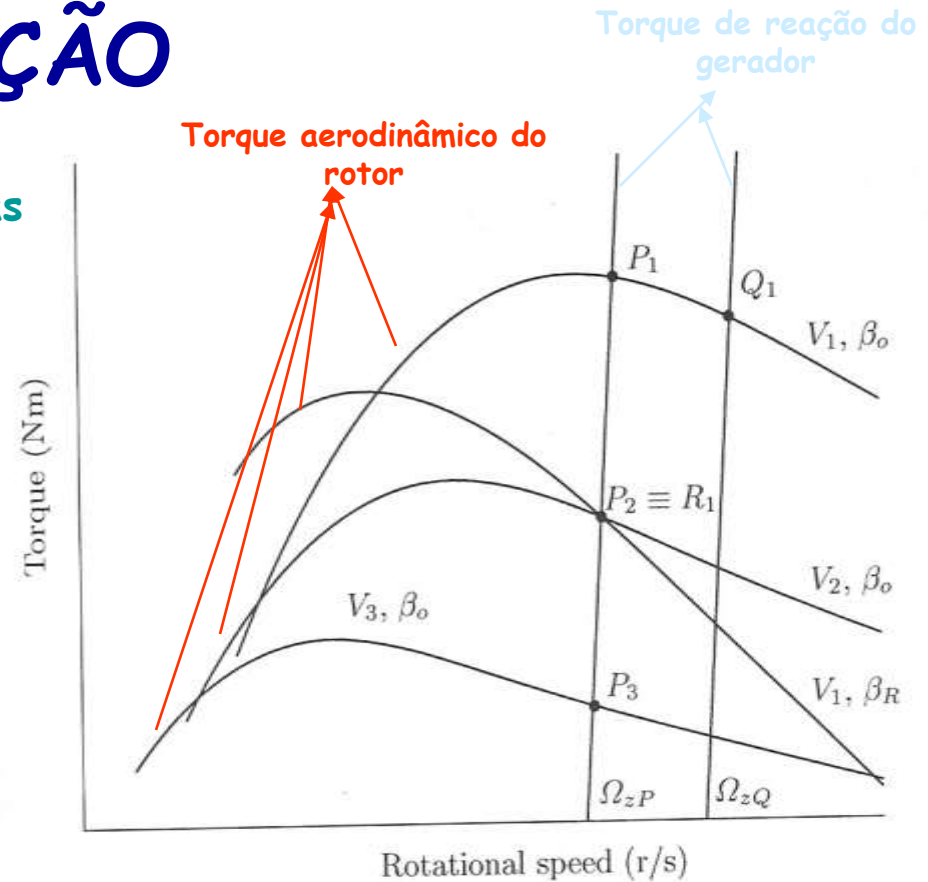
- controle ativo do torque aerodinâmico : controle de passo das pás
- Controle passivo do torque aerodinâmico = pás controladas por estol

MODOS DE OPERAÇÃO

O termo **modo de operação** denota as várias formas em que uma turbina pode ser programada para trabalhar.

Classificação:

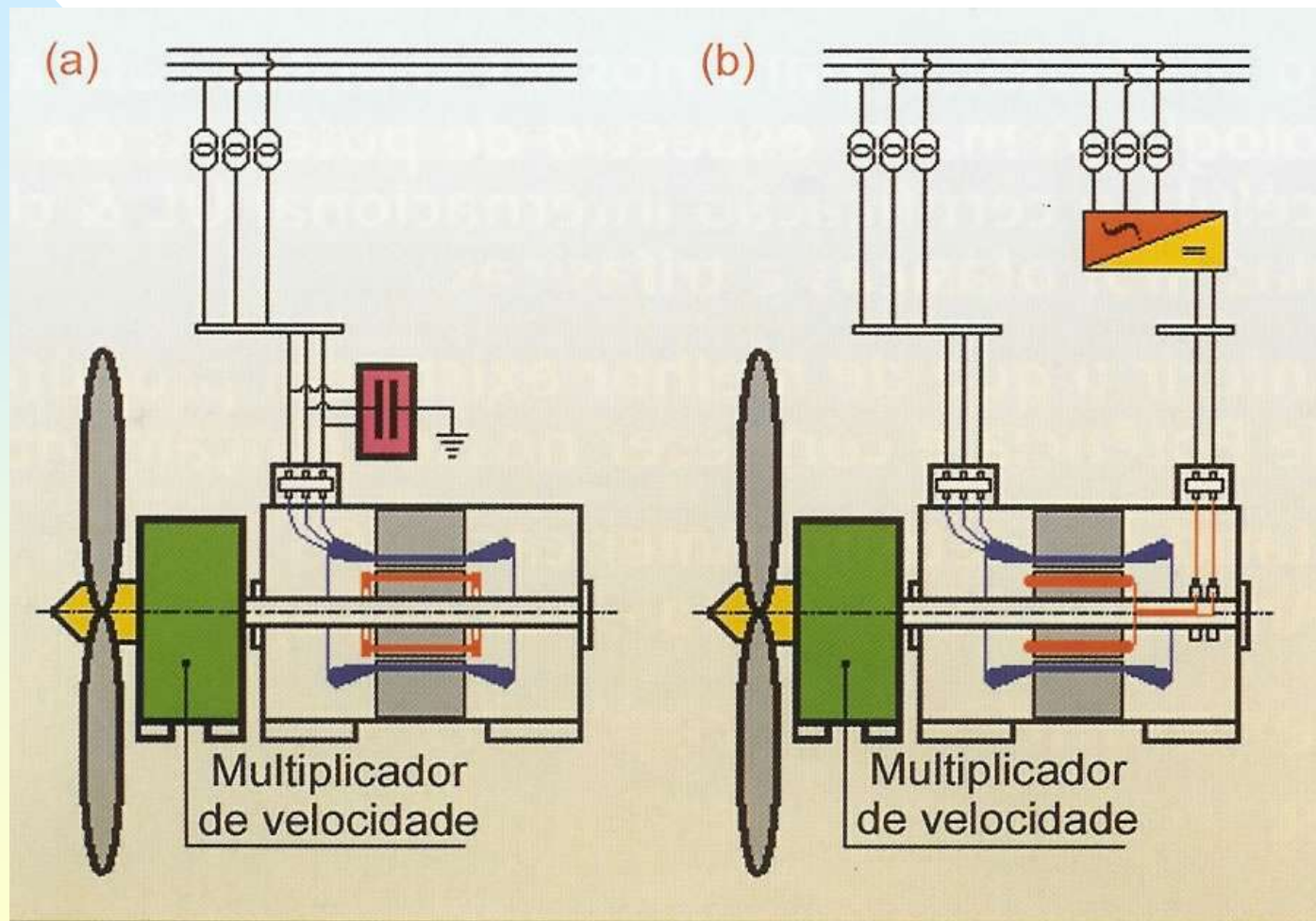
- o Velocidade fixa - passo fixo (VF-PF)
- o Velocidade fixa - passo variável (VF-PV)
- o Velocidade variável - passo fixo (VV-PF)
- o Velocidade variável - Passo variável (VV-PV)



Pontos de operação para diferentes condições operativas

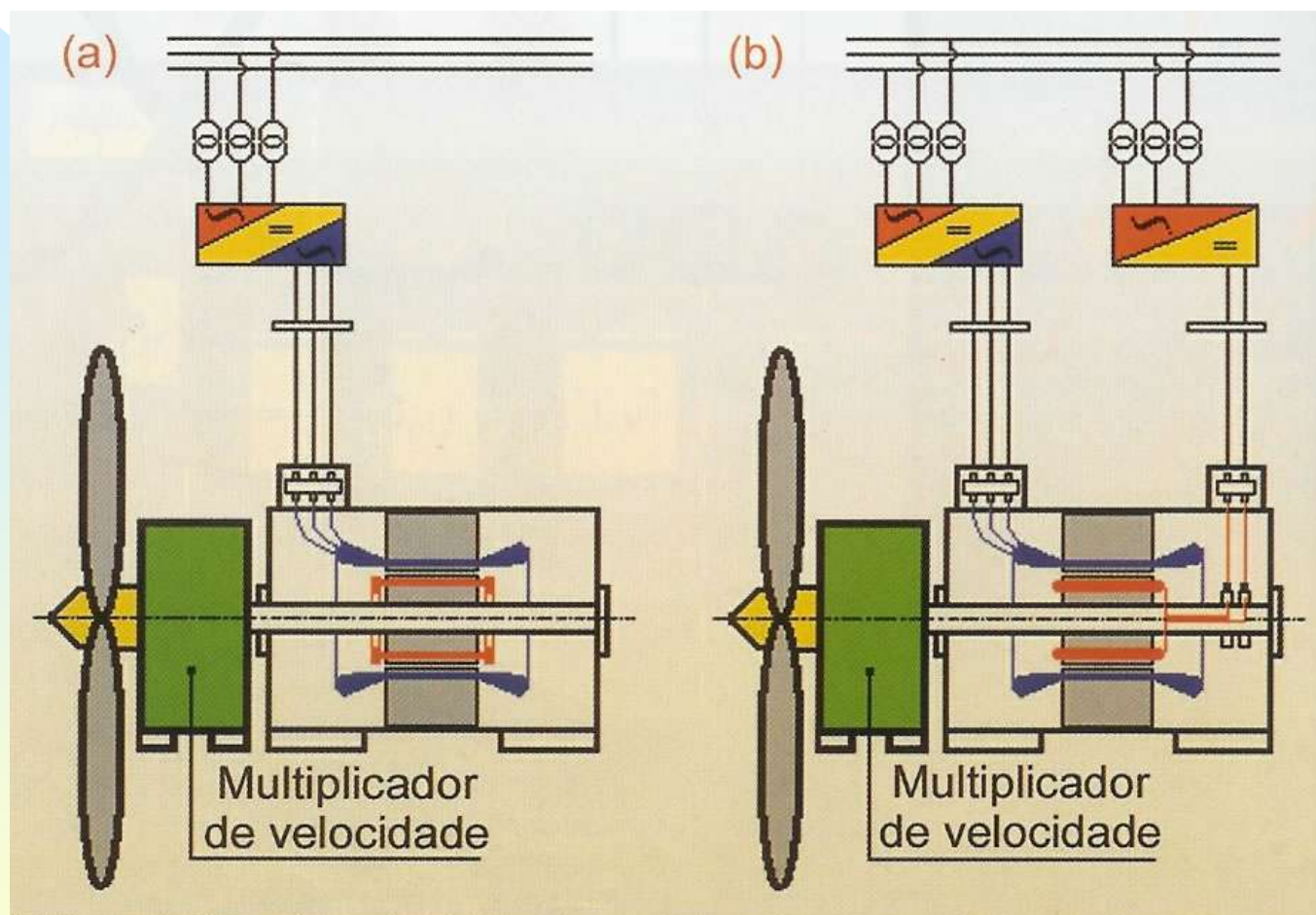
CONFIGURAÇÕES DE SISTEMAS

Gerador conectado diretamente à rede elétrica operando com velocidade fixa:



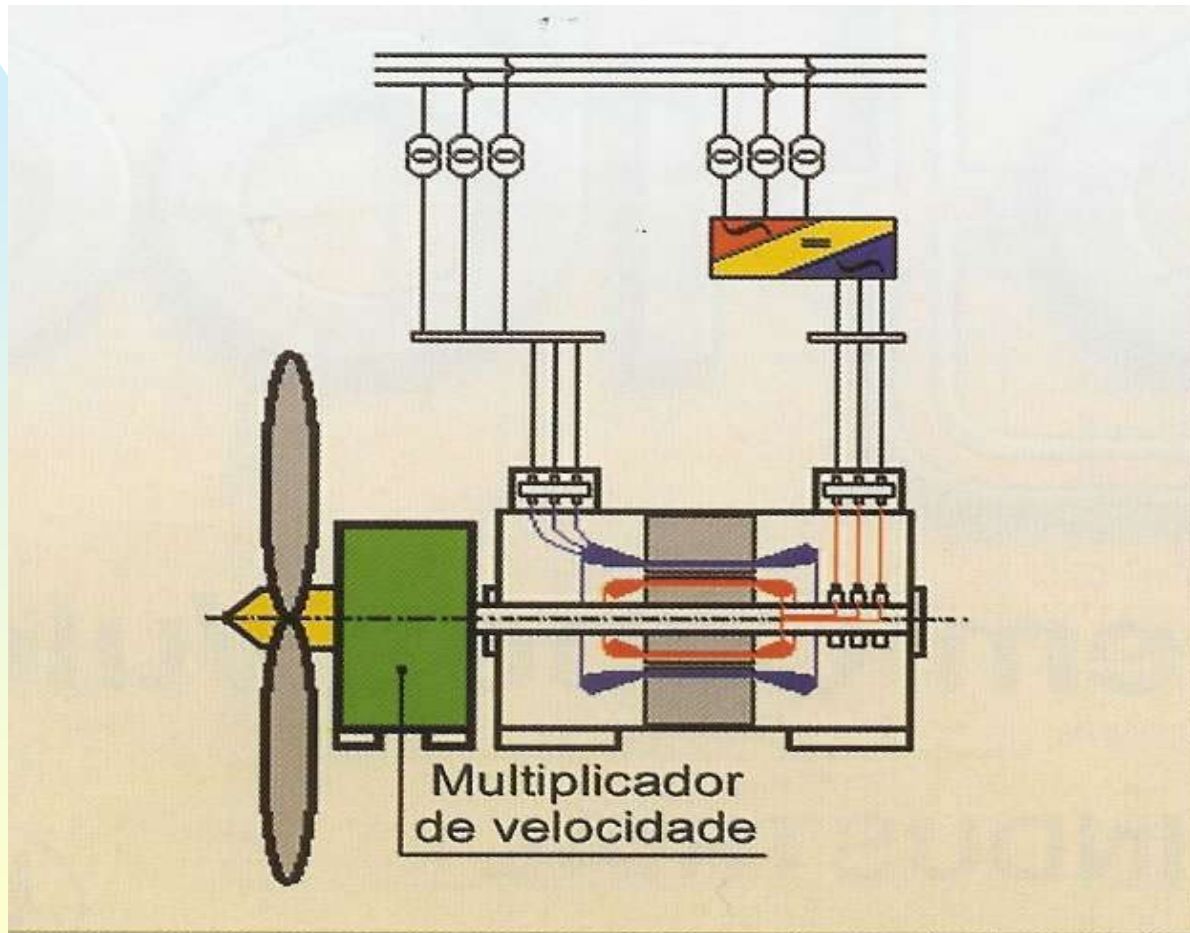
a) gerador assíncrono de gaiola b) Gerador síncrono com excitação independente

Gerador conectado à rede elétrica através de um conversor

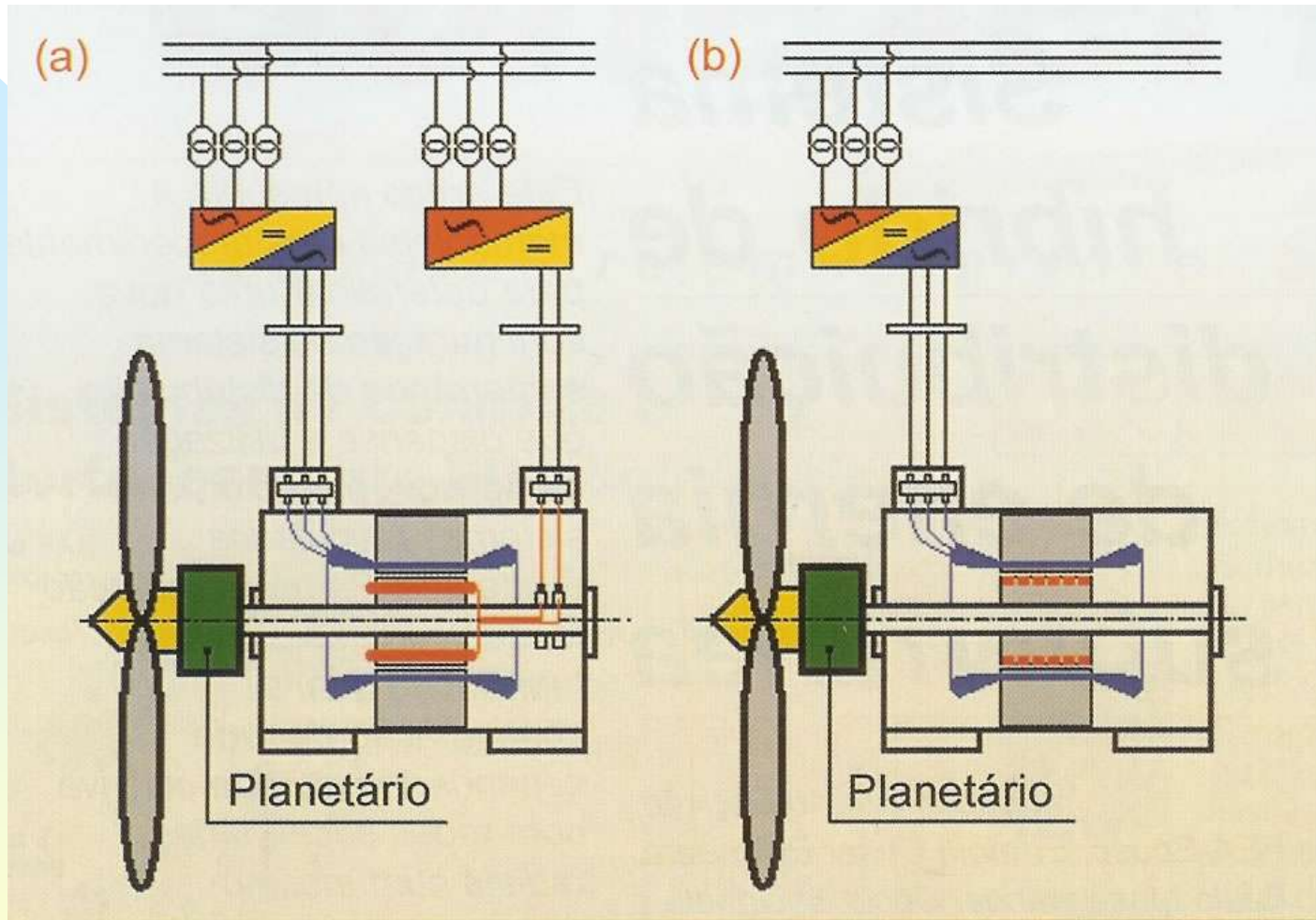


a) Gerador assíncrono de gaiola b) gerador síncrono com excitação independente

Gerador assíncrono trifásico de rotor bobinado duplamente alimentado com escovas



Gerador síncrono trifásico conectado à rede por conversor sem multiplicador de velocidade



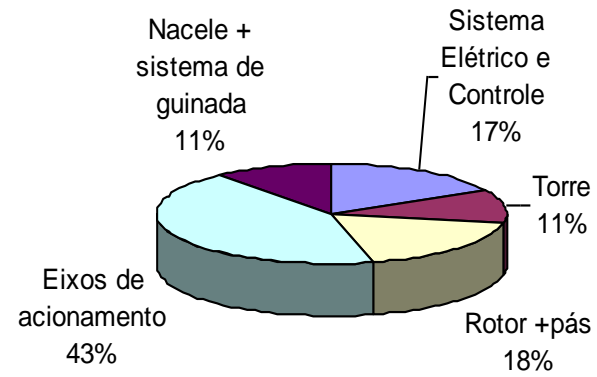
a) Gerador síncrono com excitação independente b) Gerador síncrono com ímãs permanentes

Determinação dos investimentos

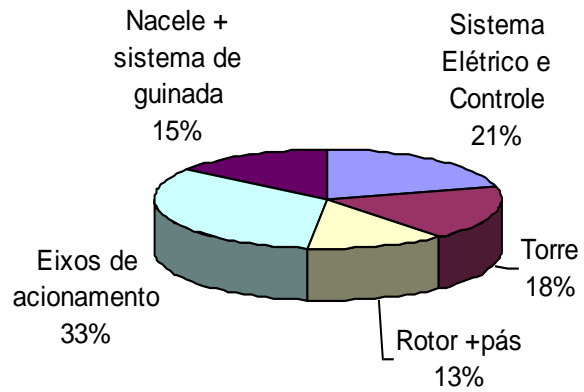
A distribuição dos custos de um projeto em energia eólica pode variar largamente segundo as características de cada empreendimento, tornando, cada projeto, um estudo de caso em particular.

Categoria de custos iniciais do projeto	Fazenda eólica de médio/grande porte (%)	Fazenda eólica de pequeno porte (%)
Estudo de viabilidade	Menos de 2	1 – 7
Negociações de desenvolvimento	1 – 8	4 – 10
Projeto de engenharia	1 – 8	1- 5
Custos de equipamentos	67 – 80	47 – 71
Instalações de infra-estrutura	17 – 26	13 – 22
Diversos	1 - 4	2 - 15

AWEC-60 1.2 MW Wind urbine



Tjaeborg 2 MW Wind urbine



Avaliação econômica financeira

CO&M=

Indicadores de mérito:

Ex:

EG - Custo da energia anual produzida,

TIR - Taxa interna de retorno

Custos associados;

Investimentos: equipamentos e instalação

Custos operacionais: O&M, locação de terreno, gerenciamento, impostos, taxas, juros de empréstimos, encargos

Espanha

56%

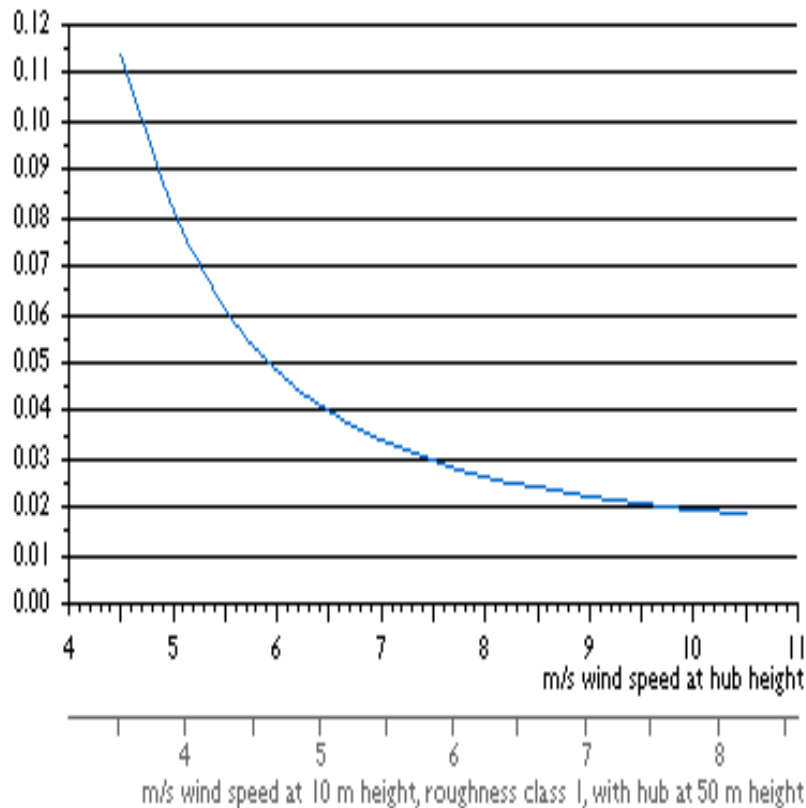
$$CEG = \frac{(C_c \times TF) + C_{Operacionais}}{EGa}$$

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

Custo de geração em função da velocidade do vento e produção de energia

Cost of Electricity Example, 600 kW Turbine

USD/kWh



Fonte: <http://www.windpower.dk/tour/>

Custo de instalação

900 – 1300 US\$/kW

Custo de geração (US\$/MWh)

$$CG = \frac{Inv \times FRC + CO \& Manual}{EG_{annual}}$$

$$Eg = Pn \times FC \times 8760h / ano$$

Ex: gerador de 600 kW na
Dinamarca

$$CG = 20 - 130 US\$ / MWh$$



Osório – Rio Grande do Sul - 150 MW



Millenium – Paraíba – 10,4 MW



Rio do Fogo – RGN – 49,6 MW

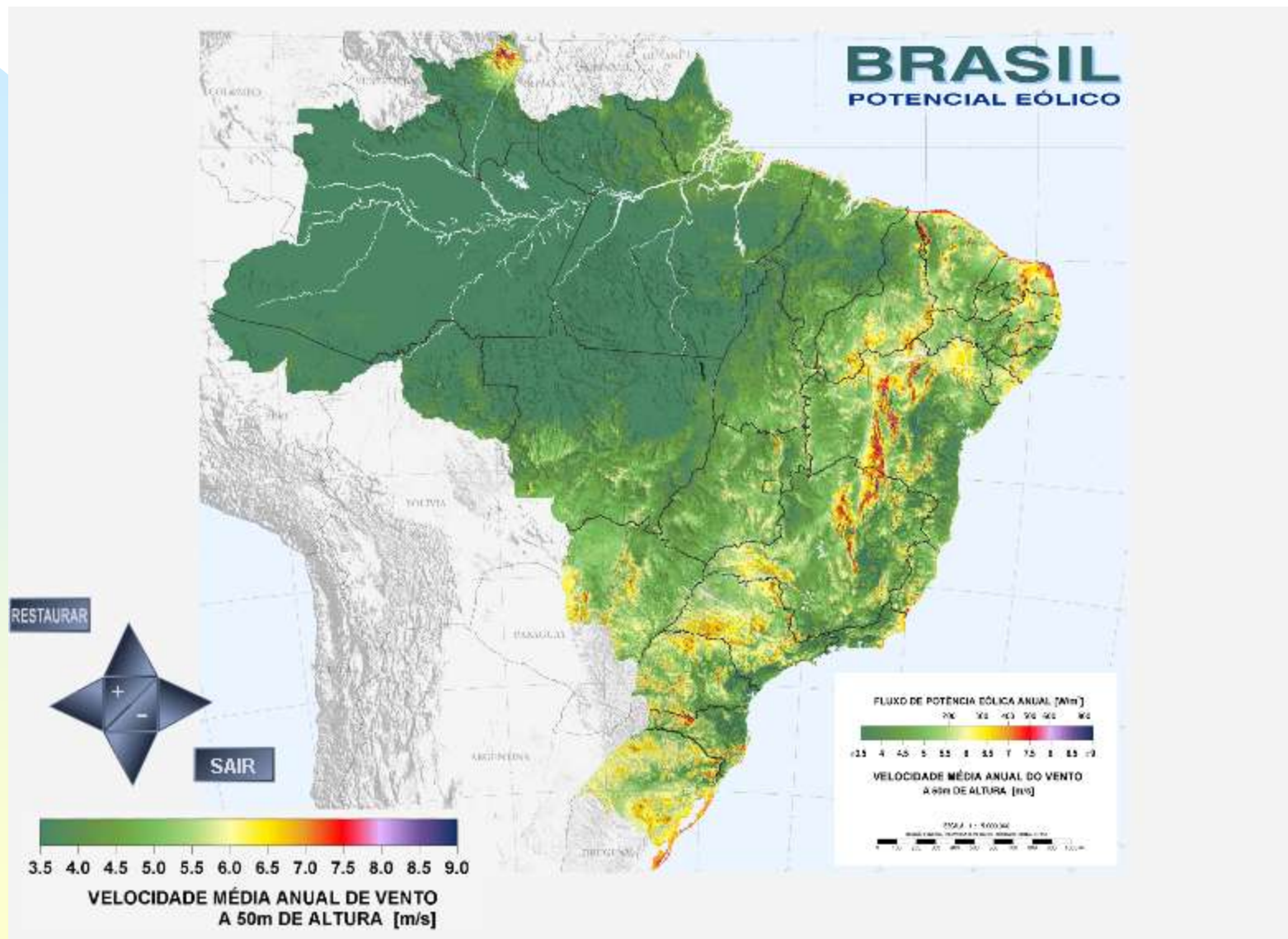
Horizonte – Santa Catarina – 4,8 MW



Água Doce – Santa Catarina – 9,0 MW



Velocidade Média Anual – Atlas do Potencial Eólico Brasileiro



Fonte: Dutra, 2001