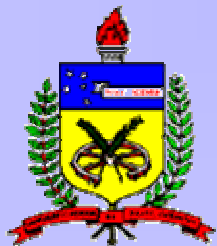


Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Engenharia Mecânica
Centro Tecnológico

ENERGIAS RENOVÁVEIS ENERGIA EÓLICA (1)

Prof. Júlio César Passos

Email: jpassos@emc.ufsc.br



Florianópolis, 16/05/2008



Foto: Fernando Dalmaz



Parque Eólico do Horizonte - Água Doce - SC

PLANO DA AULA

Histórico

Motivação - demanda de energia elétrica

Estado atual da energia eólica

Tipos de rotores eólicos

Fundamentos de aerodinâmica

Os modernos aerogeradores

O Vento

Histórico

Primeiro aerogerador

- 1888 - Desenvolvido por Charles Brush (1849-1929)

Brush Electric, situada em Cleveland-Ohio-EUA

A energia elétrica era armazenada em baterias
Gerador de 12 kW

turbina com 144 pás de madeira de 17 m de diâmetro
(operou por 20 anos)

- 1930 - EUA
Utilização de pequenos aerogeradores ligados a baterias.
- 1976 - Dinamarca
Primeiro AG ligado à rede elétrica

A invenção do aerogerador



Poul la Cour (1846-1908)

**Físico, meteorologista,
inventor**



Capa do
"Journal of Wind Electricity"
publicado pela primeira
vez em 1904,
sendo o seu editor Poul la Cour.

**Motivação:
Demanda crescente de
eletricidade**

Cenários

Energia elétrica

- 2004 - representava 16,5 % da energia final consumida no mundo (equivalente a 1,2 Gtep)
- 1973 - representava 9,3 %

A produção de eletricidade é dominada pelas seguintes técnicas:

Centrais térmicas - 65 %

Hidroeletricidade - 16 %

Nuclear - 16 %

Energias renováveis (Biomassa, Eólica, Solar) - 3 %

In "L'Énergie à l'heure des choix, ed. Belin, Pierre Pappon (2007)

Produção de eletricidade

- Centrais térmicas (**combustíveis fósseis** ou nuclear)

Ainda é possível **umentar os rendimentos**

- Crescimento contínuo da demanda

Cenários (?): 2030 (2 x a demanda atual)
2050 (3 x a demanda atual)

- Restrições

Redução ou esgotamento das reservas de petróleo e de gás natural

Necessidade de se reduzir as emissões de gases de efeito estufa

- Tentação

Construção de centrais térmicas a carvão (ex. China)

Estado atual da energia eólica

Situação da energia eólica no Brasil

- **Rio Grande do Norte total: 1,8 MW (Petrobrás)**

Palmas: 3 AGs E- 40/600kW

- **Ceará total: 17,4 MW**

Taimba: 10 AGs E-40/500kW

Prainha: 20 AGs E-40/500kW

Mucuripe /Fortaleza: 4 AGs E-40/600kW

- **Paraná total: 2,5 MW**

Palmas: 5 AGs E-40/500kW

- **Santa Catarina total: 5,4 MW**

Bom Jardim da Serra: 1 AG E-40/600kW

Água Doce: 8 AGs E-40/600kW

Total: 230 MW conectados às redes elétricas

Novos empreendimentos no Brasil - PROINFA

- Rio Grande do Sul - 150 MW

Três parques: Osório, Sangradouro e Índios

75 AGs de 2000 kW, já instalados

Altura da torre: 98 m (800 ton., estacas com 30 m de profundidade)

Pás do rotor: 37 m, Diâmetro: 74 m

R\$ 670 milhões (70% financiado pelo BNDES)
in Jornal JÁ www.jornalja.com.br, ver Diário dos ventos)

Parque de Osório - RS



Parque de Osório - RS



Parque de Osório - RS



AG de Fernando de Noronha - PE

- AG instalado, em 1992, em Fernando de Noronha-PE
- 75 kW, 3 pás, Diâmetro=17 m

Sistema híbrido de energia eólica-diesel.
Economia de 10% no consumo de diesel e redução de emissão de poluentes.



AG de Bom Jardim da Serra-SC



- 1 AG de 600 kW, 2002, em Bom Jardim da Serra
- 8 AGs de 600 kW, 2003, em Água Doce
- Fabricante:
 - WOB BEN Windpower/ ENERCON GmbH
- Modelo: E-40
- Potência nominal: 600 kW
- Diâmetro do rotor: 40 m

- Novos Contratos - PROINFA 2004 em SC: 220 MW (Dezembro 2006)
 - 130 MW em Bom Jardim da Serra
 - 90 MW em Água Doce

AG de Bom Jardim da Serra-SC

E40 - 600 kW - Bom Jardim da Serra - SC



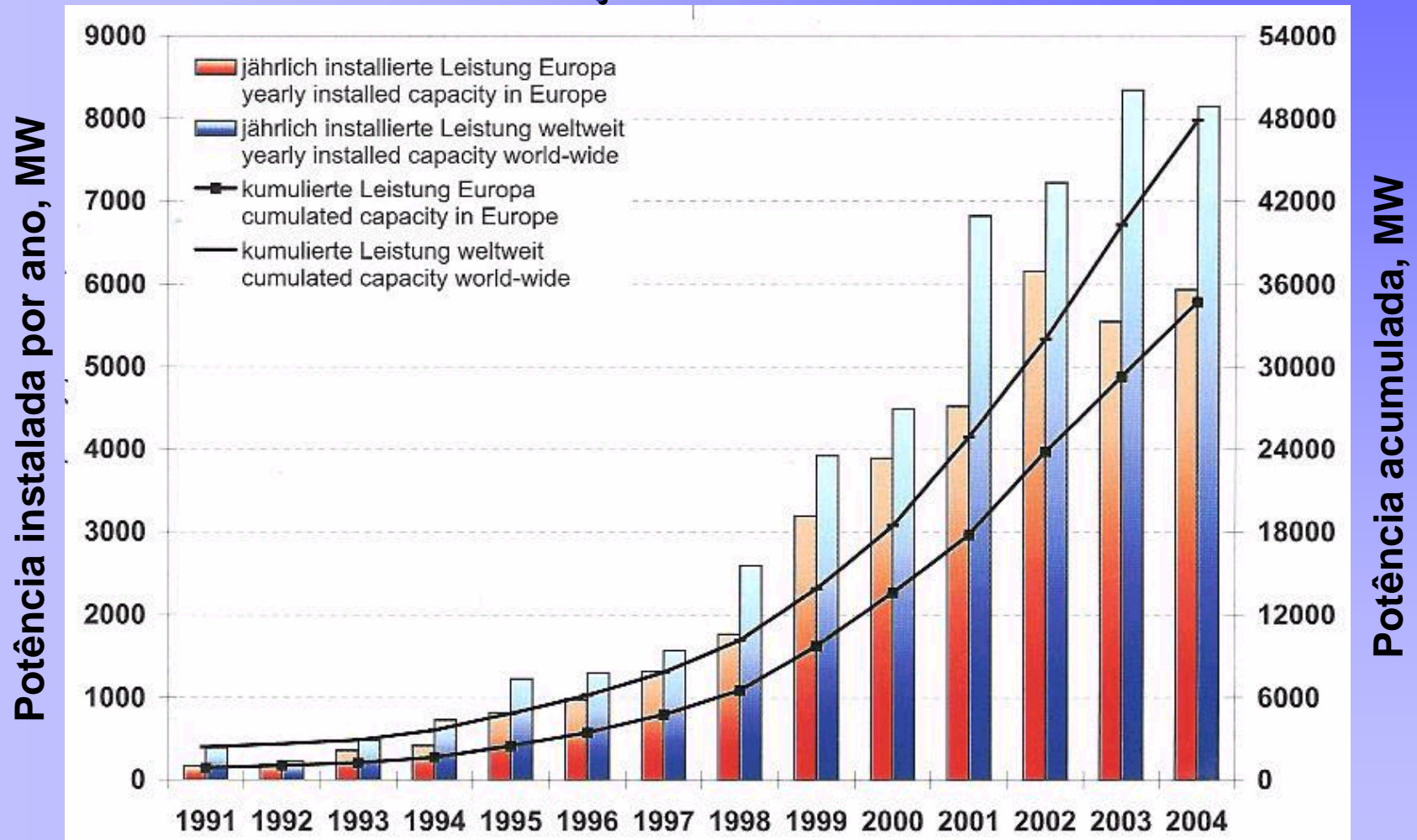
Potência instalada no mundo

Maiores Potências Eólicas Instaladas até 2005	
País	Potência (MW)
Alemanha	18429
Espanha	10000
EUA	9100
India	4430
Dinamarca	> 3000

Fonte: GWEC (2006)

- Os EUA têm como meta para 2020 que 6% da eletricidade venha de geração eólica;
- A Europa tem como meta 5,5% para 2010 e 12% para 2020 (180 GW).

Situação da energia eólica na Europa e no mundo



in: DEWI Magazin, n. 27, 2005

Comunidade Européia - Metas para Geração Eólica		
	2010	2020
Potência Instalada	Total 75 GW	Total 180 GW
	10 GW offshore	70 GW offshore
Geração de eletricidade na europa	5,50%	12,10%
Fonte: EWEA (2003)		

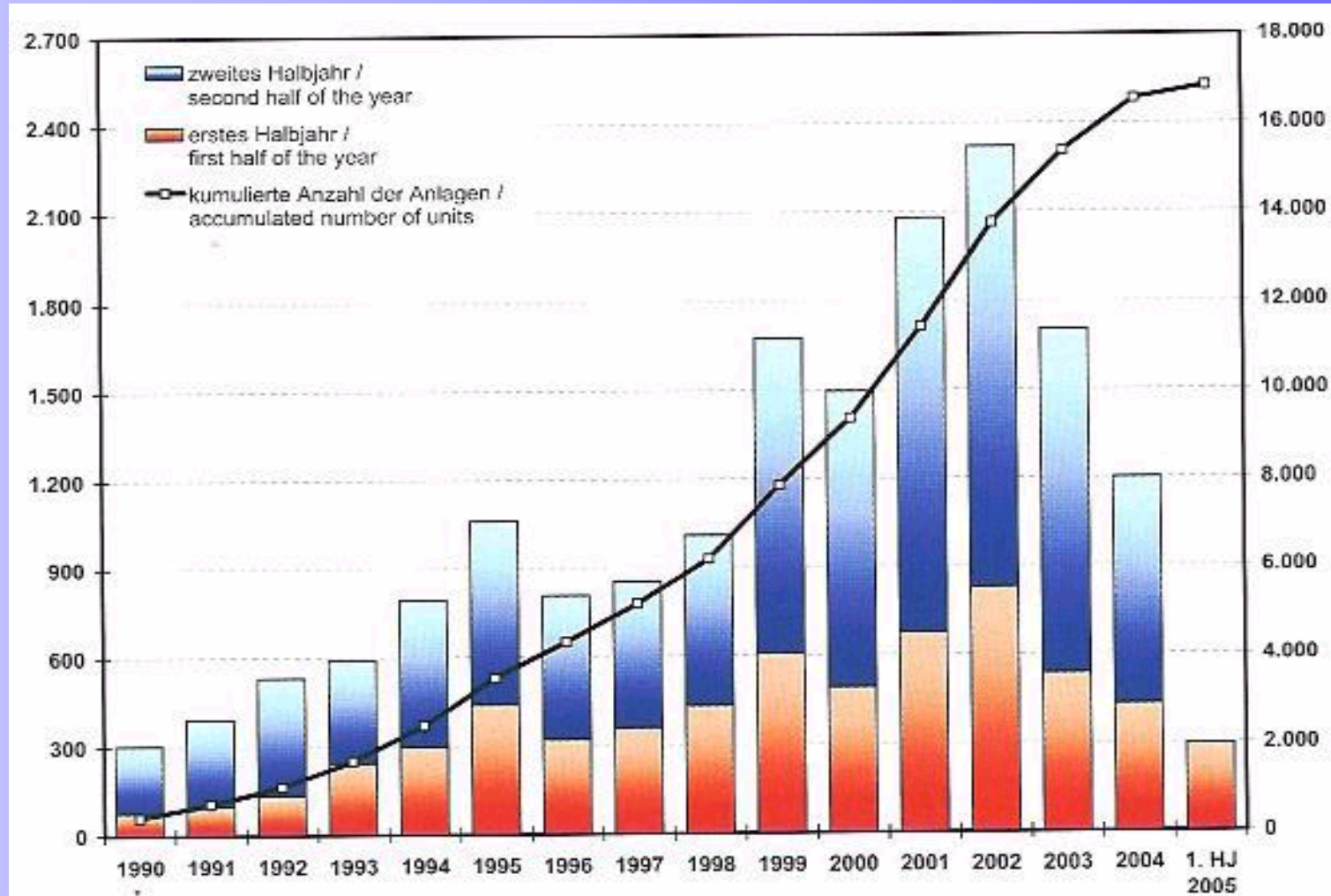
- O mercado europeu de energia eólica vem crescendo 22% em média.
- Depende de mercados com grande potencial mas pouco explorados (França, Itália e Reino Unido)

Maiores Mercados para Energia Eólica na Europa em 2004	
País	Potência (MW)
Espanha	2065
Alemanha	2037
Reino Unido	240
Portugal	224
Itália	221
Potência instalada no ano de 2004.	
Fonte: Millais (2005)	

..... e da abertura de novos mercados fora do continente europeu.

Situação da energia eólica na Alemanha e no mundo

Potência instalada anualmente, MW



Potência instalada acumulada, MW

in: C. Ender, "DEWI Magazin", N. 28, 2006

Sobre o PROINFA

- **PROINFA - Programa de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia Elétrica**
- Criado em 26 abril de 2002
- Revisado em novembro de 2003 e regulamentado em março de 2004
- Visa ao desenvolvimento de fontes alternativas de geração de energia elétrica:
 - » PCH (≤ 30 MW)
 - » Biomassa
 - » Energia Eólica
- A compra da energia é assegurada por um contrato de longo prazo (20 anos).
- É garantida uma receita mínima de 70% da energia contratada durante o período do financiamento.

Parques eólicos brasileiros (15)

Usina	Potência	Potência	Localização
	Outorgada (MW)	Fiscalizada (MW)	
Eólica da Prainha	10	10	Aquiraz - CE
Eólica de Taíba	6,2	5	São Gonçalo do Amarante - CE
Eólio-elétrica experimental do Morro do Camelinho	1	1	Golvea - MG
Eólio-elétrica de Palmas	2,5	2,5	Palmas - PR
Eólica de Fernando de Noronha	0,225	0,225	Fernando de Noronha - PE
Macuripe	2,4	2,4	Fortaleza - CE
Eólica de Bom Jardim da Serra	0,6	0,6	Bom Jardim da Serra - SC
Eólica de Olinda	0,225	0,225	Olinda - PE
Parque Eólico do Horizonte	4,8	4,8	Água Doce - SC
Macau	3	1,8	Macau - RN
Parque Eólico de Osório	50	50	Osório - RS
RN 15 - Rio do Fogo	49,3	42,1	Rio do Fogo - RN
Eólica de Água Doce	9	9	Água Doce - SC
Parque Eólico do Sangradouro	50	50	Osório - RS
Parque Eólico dos Índios	50	50	Osório - RS

Fonte: Aneel 13/09/2006

Parques eólicos catarinenses (3)

- Três Parques Eólicos em operação

Usina Eólica de Bom Jardim da Serra

1 aerogerador 600 kW

Parque Eólico do Horizonte

8 aerogeradores de 600 kW (4.800 kW)

Usina Eólica de Água Doce

15 aerogeradores de 600 kW (9.000 kW)

- 14 Projetos aprovados:

2 em Laguna (3 MW e 46,5 MW)

4 em Bom Jardim da Serra (1,93 MW e 3 com 30 MW)

8 em Água Doce (4,8 MW, 9,6 MW, 21,44 MW e 5 com 30 MW)

Custos da geração eólica

- Os custos de geração e instalação vêm caindo, continuamente.
- Os custos são influenciados por fatores tecnológicos e de projeto dos parques eólicos, que fazem diminuir os custos relativos do investimento e custos de geração
- Melhora no desempenho dos aerogeradores: eficiência,
(maior potência por unidade de área varrida).
- Melhor controle da turbina, movimentação
- Desenho das pás
- Melhor escolha dos sítios
- Maior número de aerogeradores instalados por parque eólico.

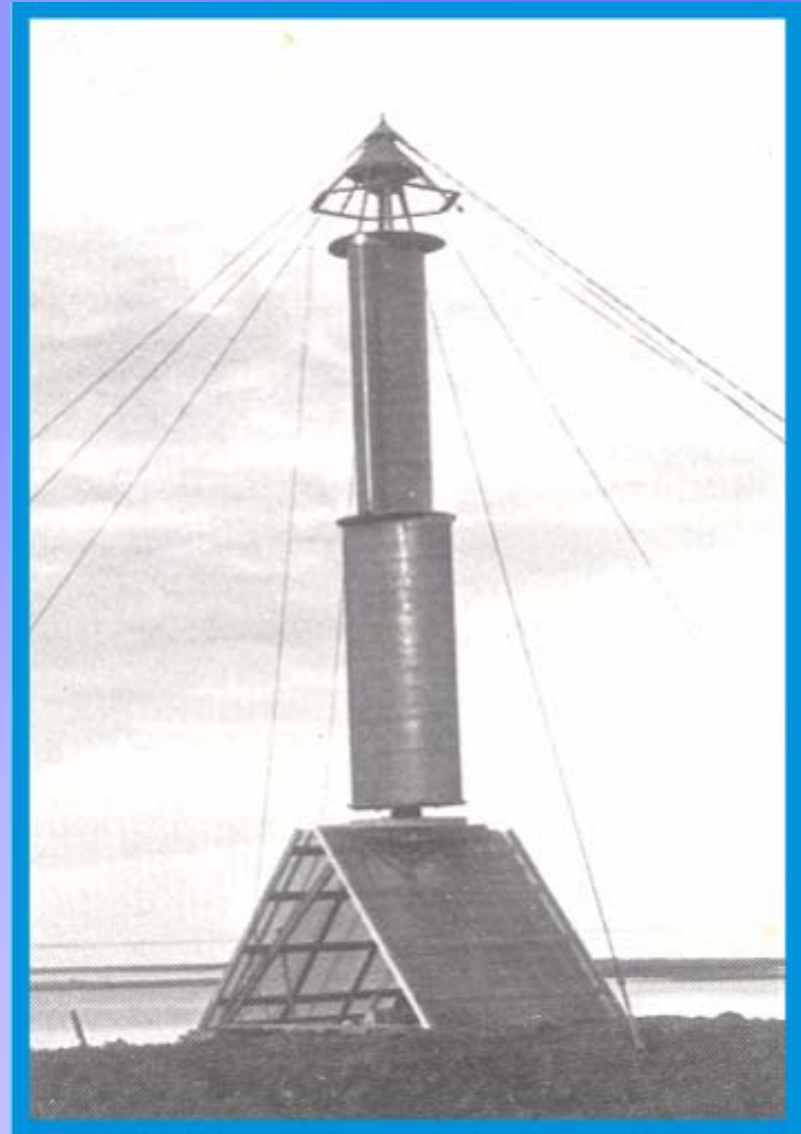
Custos de instalação

- Europa em 2002: US\$ 1070 / kW
- No Brasil:
 - Osório (150 MW): R\$ 4.400,00 / kW
 - Rio do Fogo (49,3 MW): R\$ 4.200,00 / kW
 - Água Doce (9 MW): R\$ 3.200,00 / kW
- Remuneração PROINFA: R\$ 180 a 204 / MWh
(45% e 37% < Alemanha)
- Remuneração Parque Eólico de Osório: R\$ 231 / MWh
- Fonte hídrica: R\$ 110 a 114 / MWh (para o mesmo leilão de energia)

Tipos de rotores eólicos

Rotores de eixo vertical

- Rotor Savonius
- elevado torque
- baixa velocidade
- Arnbak (Dinamarca)



in Le Gourières, D., Énergie éolienne, Eyrolles, 1982

Rotor Savonius

Três rotores Savonius

Utilizado no
bombeamento de água



Rotor Darrieus

Rotores de eixo vertical

Rotor Darrieus
(200 kW - Canadá)

baixo torque

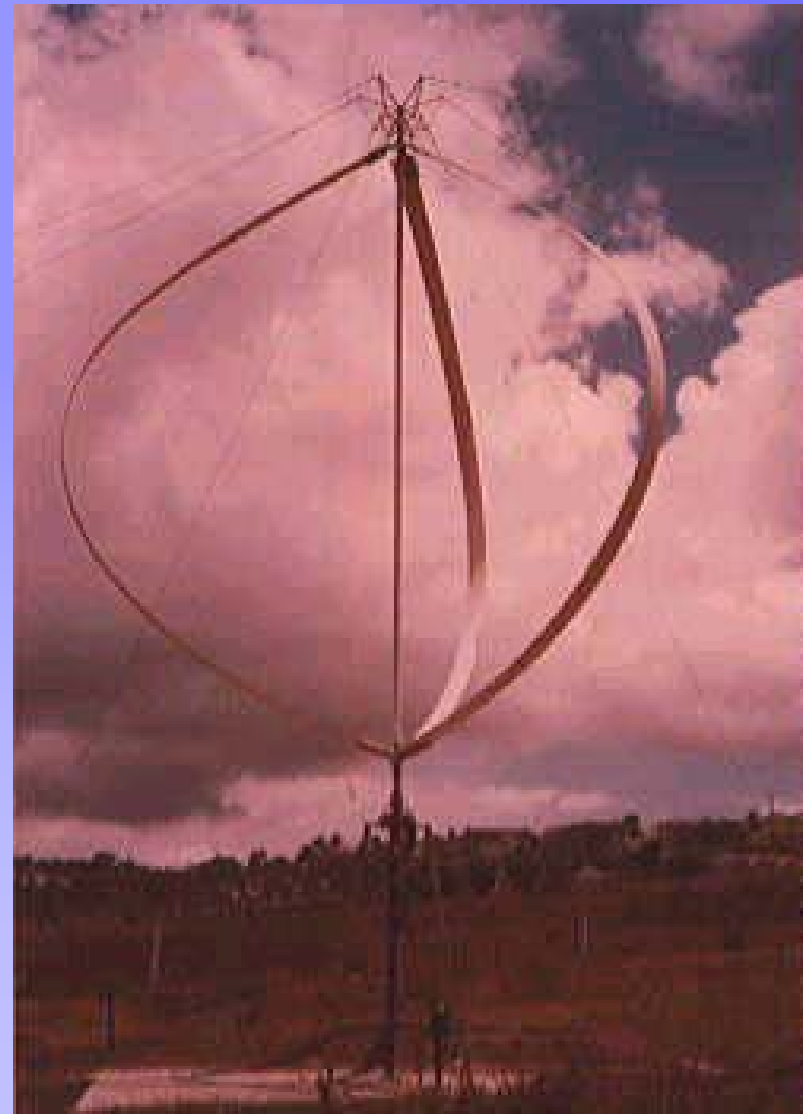
alta velocidade

Não possui torque de partida.



in Le Gourières, D., Énergie éolienne, Eyrolles, 1982

Rotores Darrieus



Rotor Filipino

**Rotor Filipino
(Darrieus + 3 Savonius)**

**utilizado para bombeamento
de água**

Prof. Sadhu

**Rio Grande do Sul
UFRGS- 1982**



Rotores Darrieus

Modelos Darrieus, com duas ou três pás, em escala reduzida



*Túnel de Vento da COPPE-UFRJ, in Passos, J.C. (1984),
"Rotor Eólico Darrieus: Um Estudo Experimental",
Dissertação de mestrado, COPPE-UFRJ*

Rotor múltipá

Rotores de eixo horizontal

*Rotor múltipá (18 pás)
com bomba de água*

elevado torque

baixa velocidade

(Fonte Yvel)



Rotor com três pás

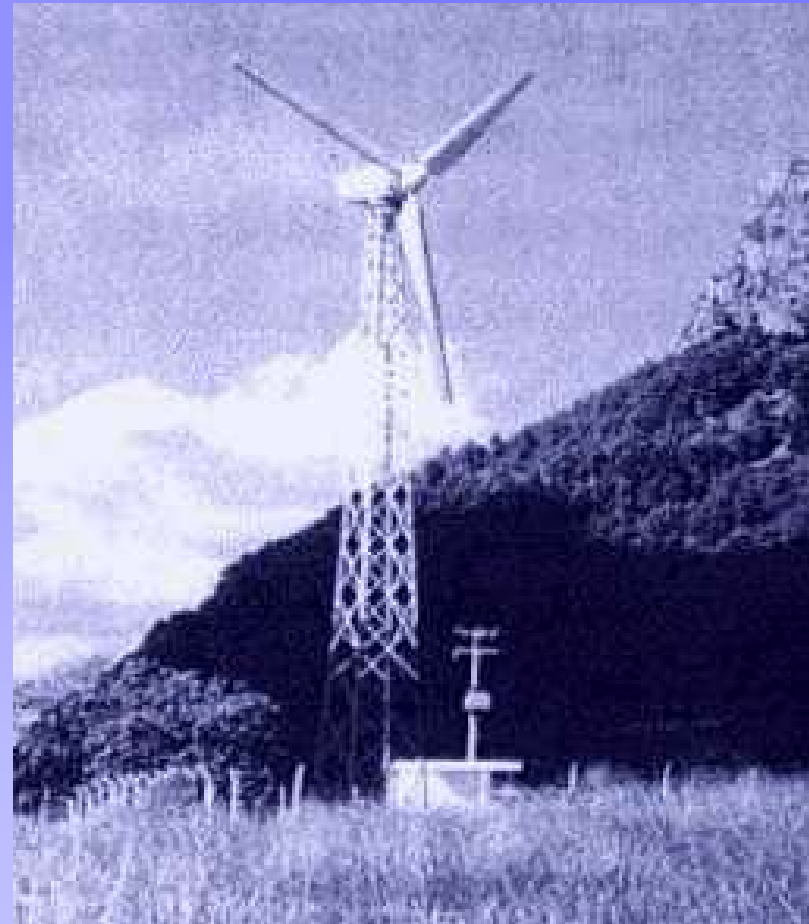
Rotor de eixo horizontal

Conectado a uma rede elétrica

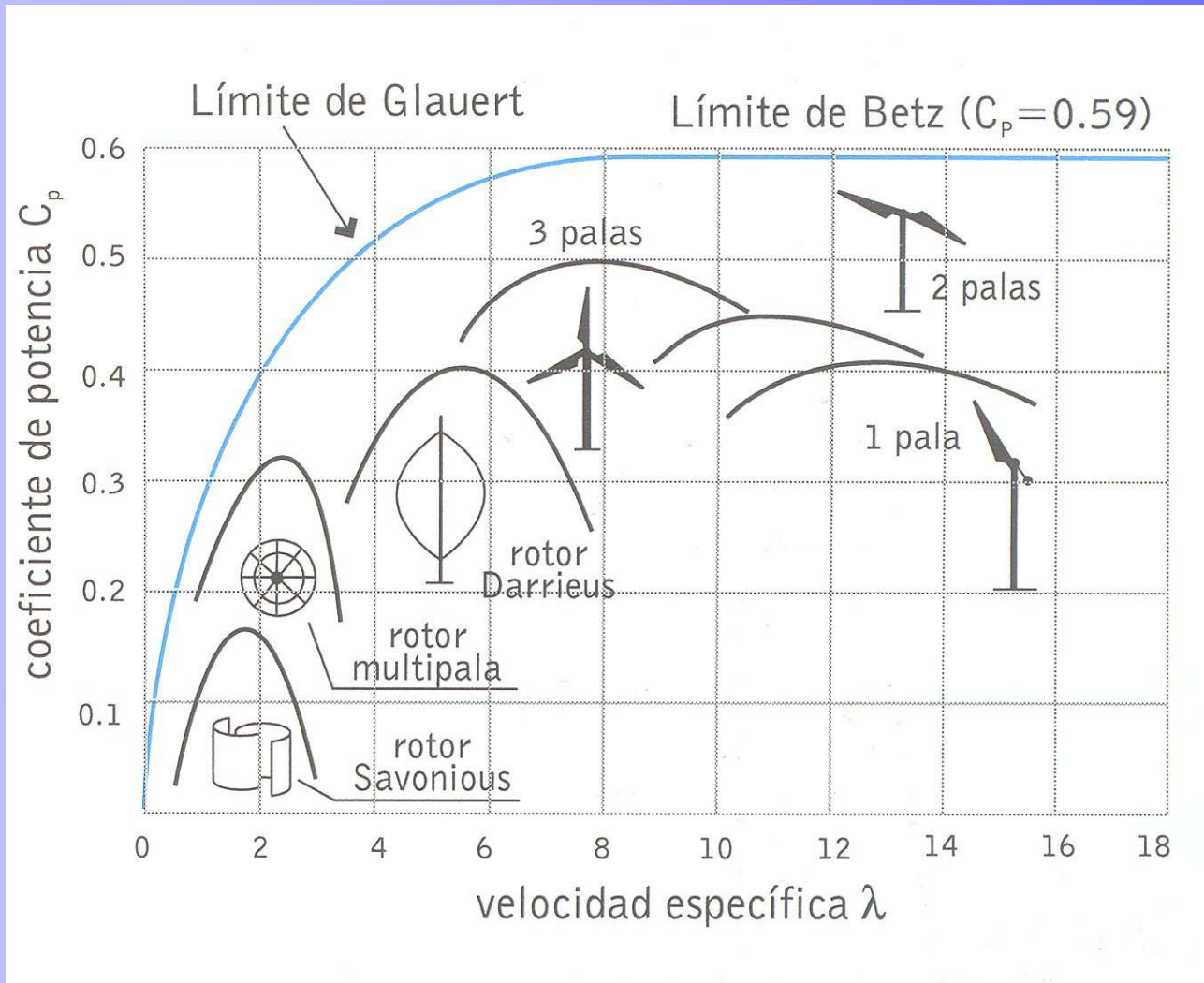
$P = 75 \text{ kW}$

baixo torque

alta velocidade



Coeficientes de potência em função do tipo de turbina



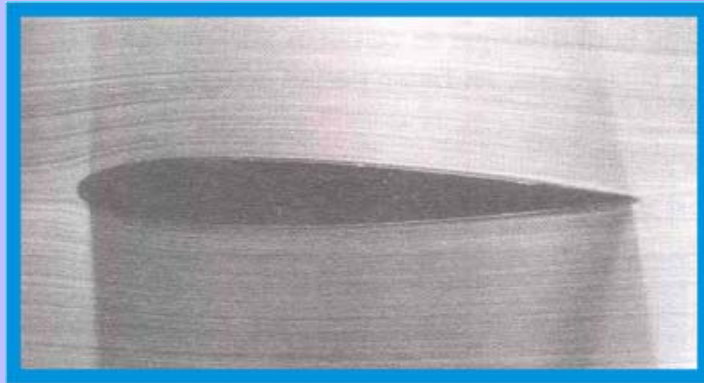
in. "Sistemas Eólicos", Rodríguez Amenedo et al.

Fundamentos de aerodinâmica

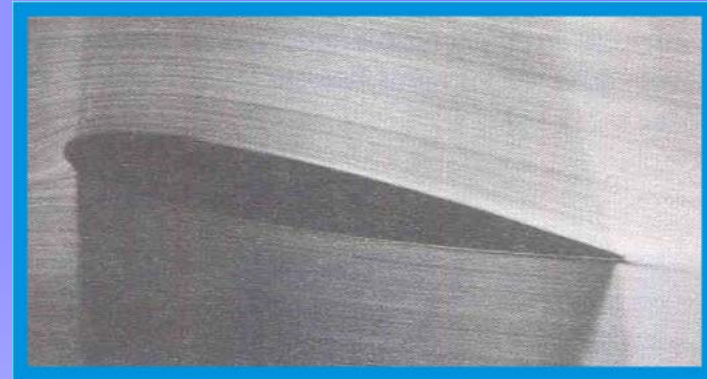
Descolamento da Camada Limite

Camada limite ao redor de um perfil

$Re = 200.000$



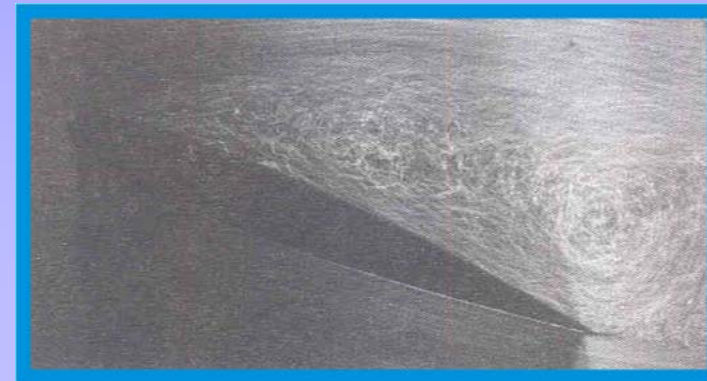
$\alpha = 0^\circ$



$\alpha = 10^\circ$



$\alpha = 15^\circ$



$\alpha = 20^\circ$

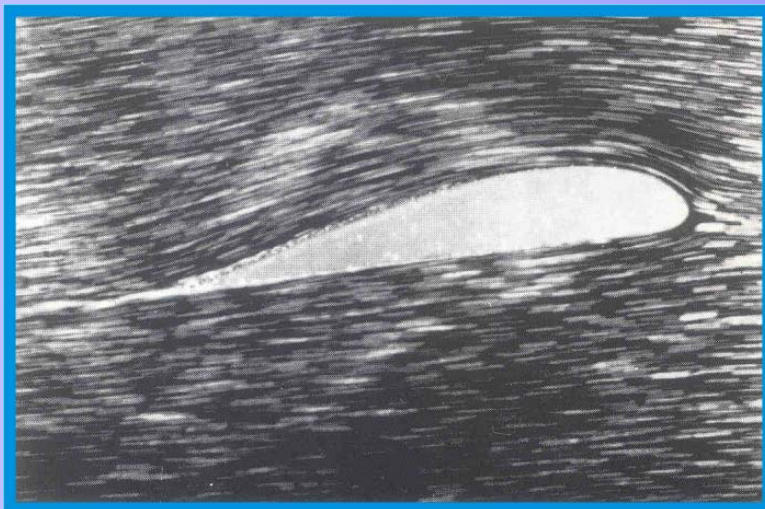


$Re = 200.000$

Para um
determinado perfil,
o descolamento da
CL depende do
Número de Reynolds
e do
Ângulo de ataque



Ângulo de STALL



pequeno α



grande α descolamento

Os modernos aerogeradores

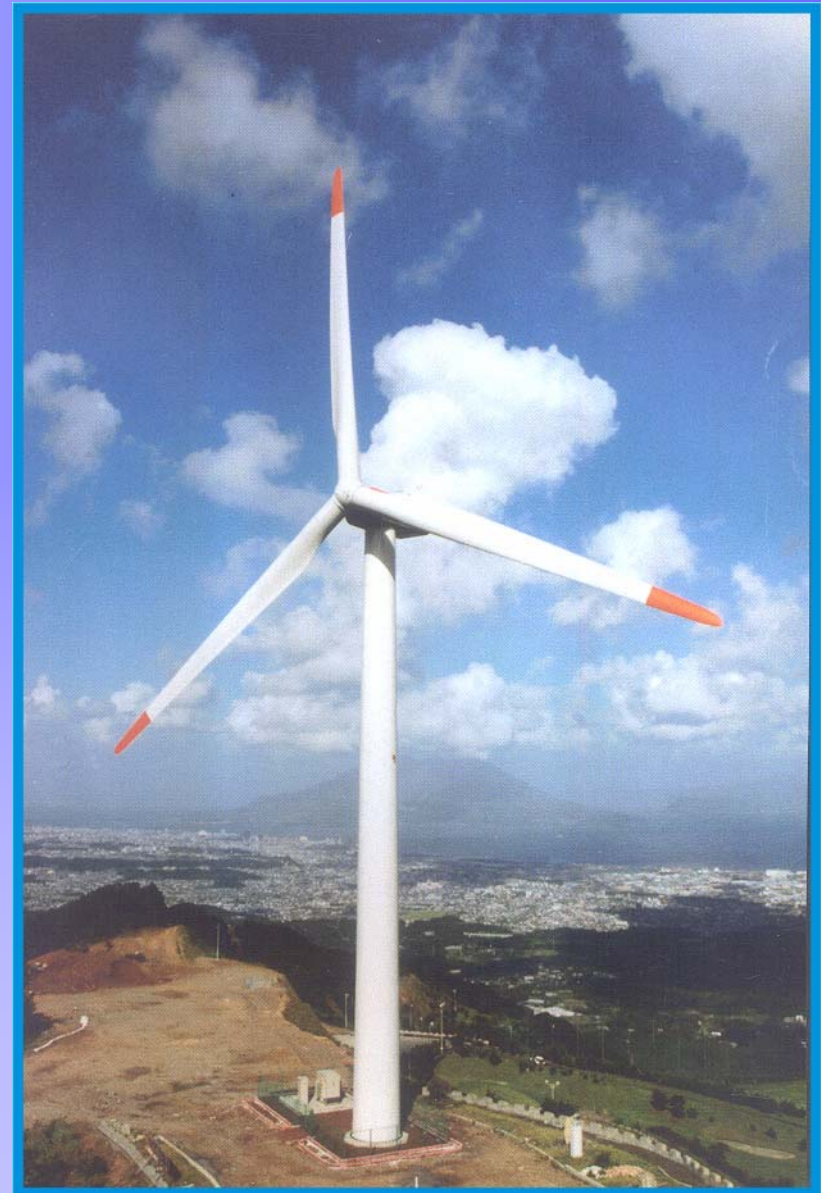
AG de grande porte

N60 - 1300 kW

D = 60 m

Japão (2000)

(catálogo de fabricante)



AG de grande porte

Fixador/Posicionador das pás (hub,cubo)
N60 - 1300 kW Japão (2000)



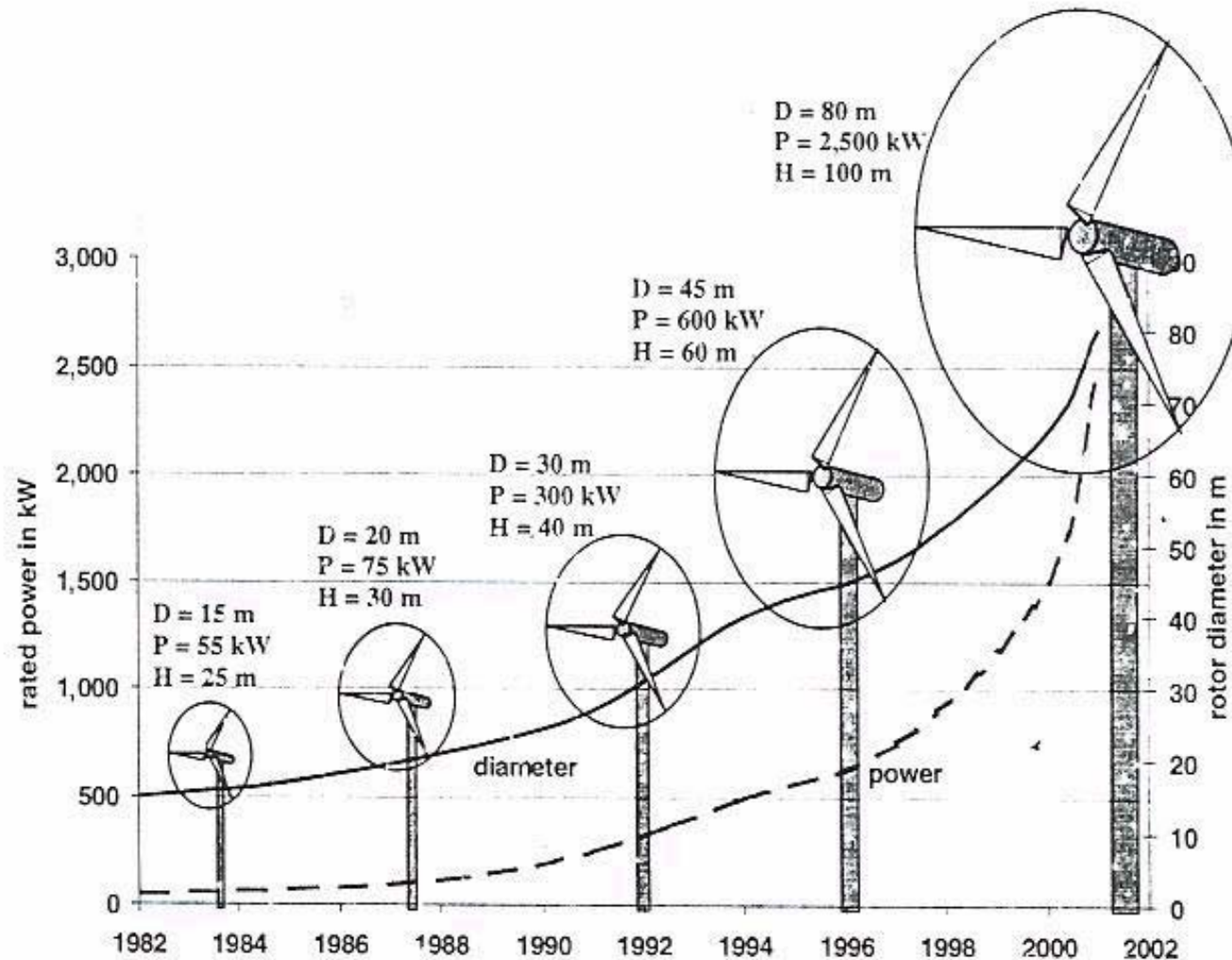
(catálogo de fabricante)

**Pás de materiais compósitos
HSW 250T, D=28,5 m, GRP polyester**

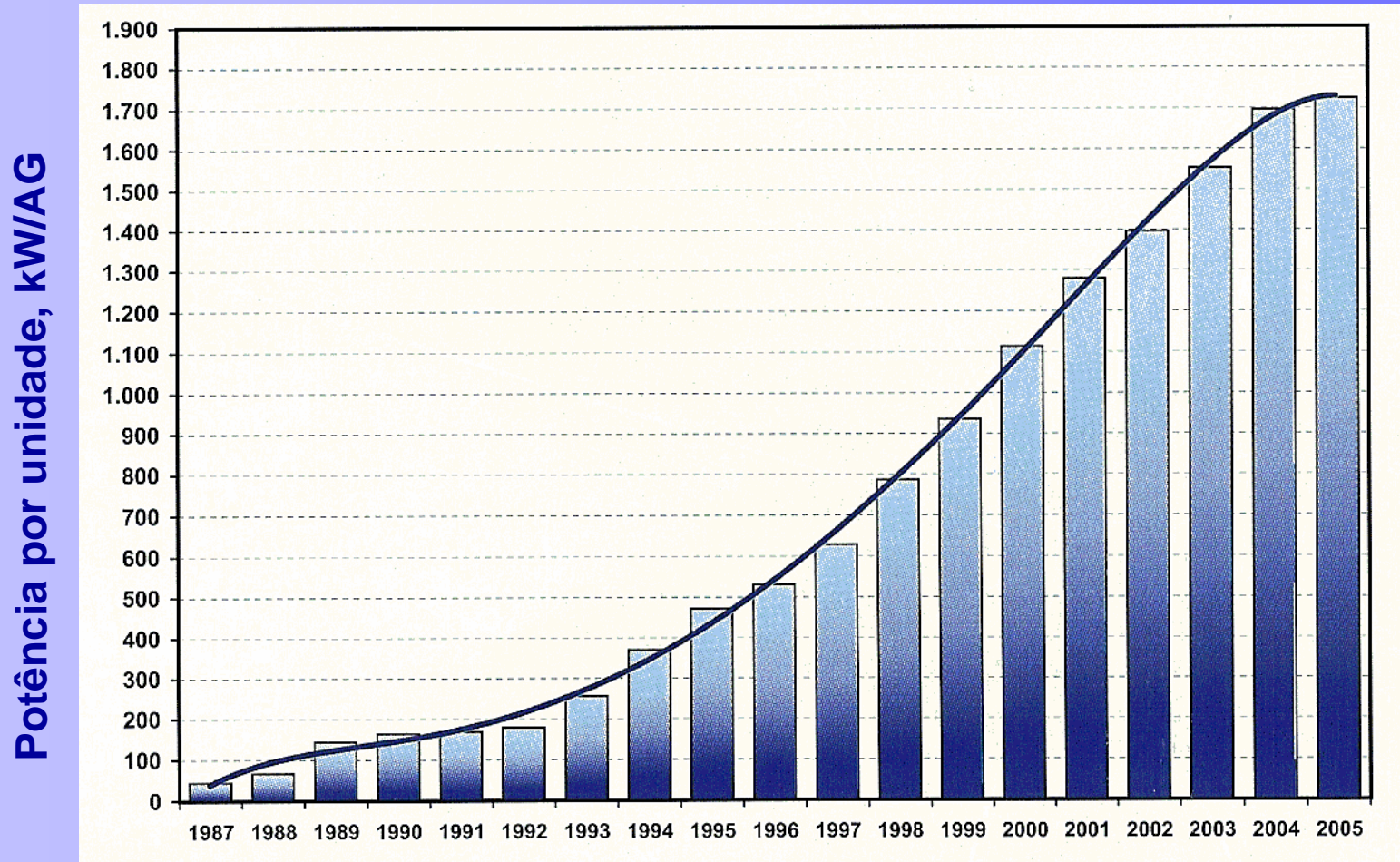


Tamanho dos AGs

Evolução do tamanho e potência dos AGs



Desenvolvimento da Potência Instalada Média por AG

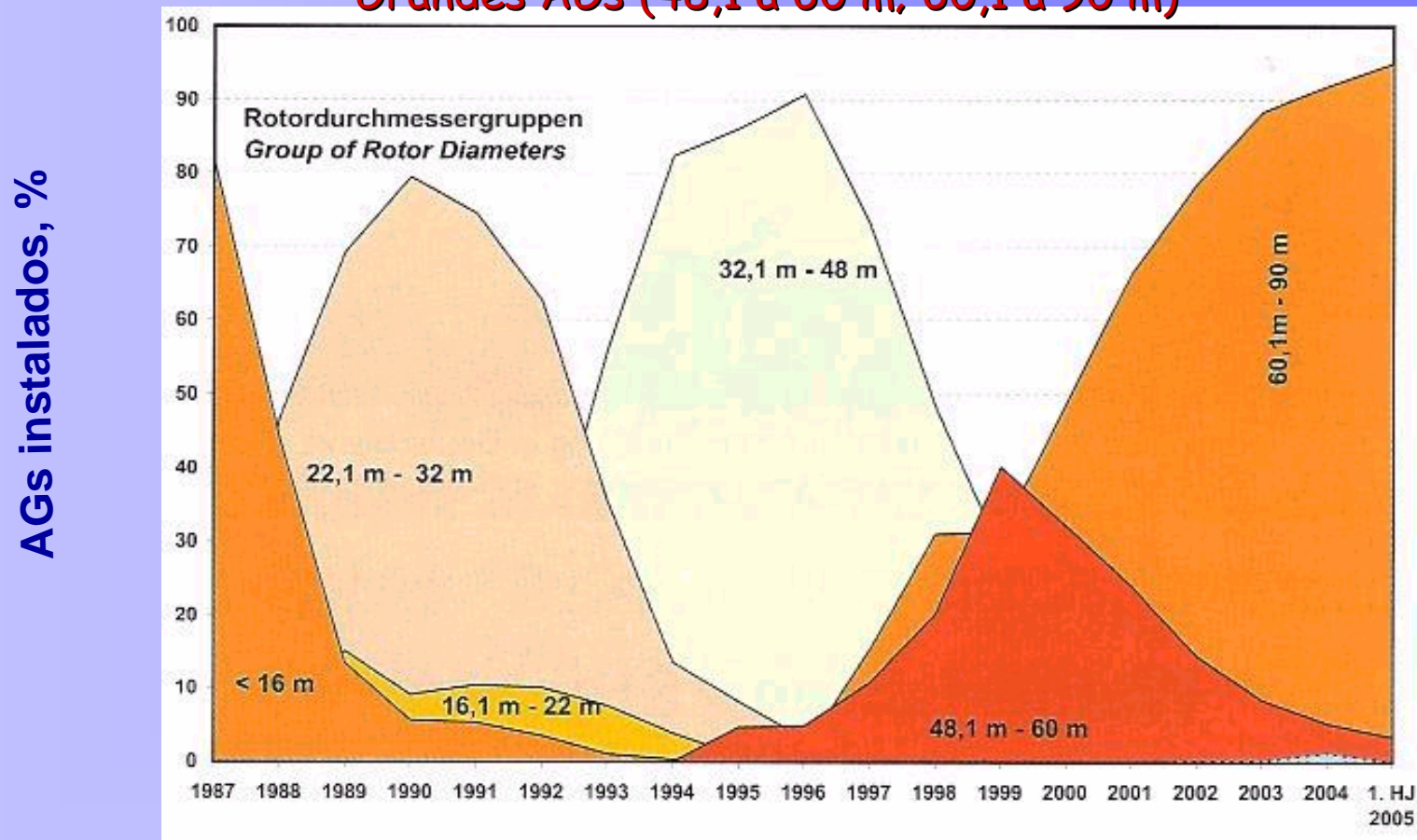


in: DEWI Magazin, n. 28, 2006

Tamanho dos AGs

Evolução do tamanho dos AGs, na Alemanha

Pequenos AGs ($D < 16,1\text{m}$); Médios (16 a 22; 22,1 a 32; 32,1 a 48 m);
Grandes AGs (48,1 a 60 m; 60,1 a 90 m)



in: Ender, C., DEWI Magazin, n. 27, pp. 24-35, 2005

O aerogerador E-112

E-112/45.114 4.500 kW

E-112
4500 kW
D=114 m
H = 124 m



in: Enercon (catálogo de fabricante)

Pá do aerogerador E-112



in: Abeking & Rasmussen (catálogo de fabricante)

Pá do AG E-112

Comparando com um Airbus A340



in: Abeking & Rasmussen (catálogo de fabricante)

Pá do aerogerador E-112

Transportando uma pá do E-112



in: Abeking & Rasmussen (catálogo de fabricante)

Pá do aerogerador E-112

Transporte da pá do AEOLUS II, 40 m, 9tB



in: DEWI Magazin, n. 27, 2005.



Enercon E-112

AG sem caixa de multiplicação (E70)

**Nova tecnologia:
aerogerador
sem caixa de engrenagem**

**Conexão direta do eixo do
rotor eólico com o
eixo do gerador elétrico**



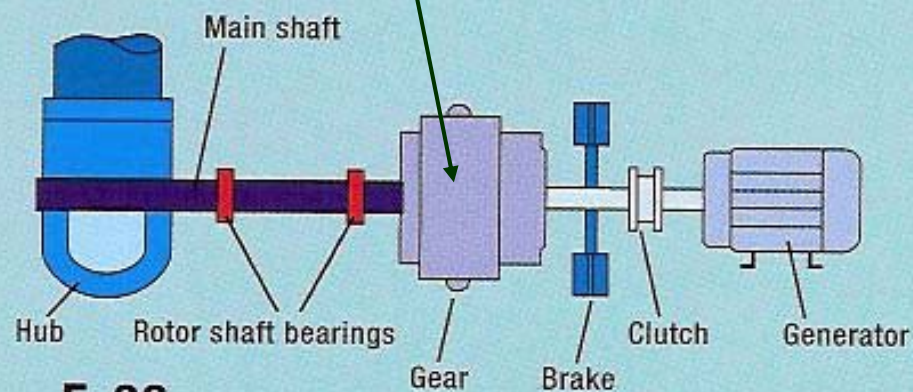
in: catálogo do fabricante ENERCON, Alemanha

AG com e sem caixa de engrenagens

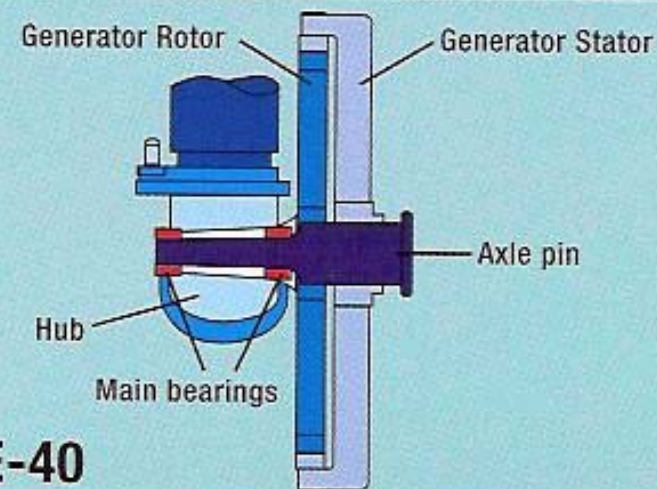
com caixa de engrenagem

sem caixa de engrenagem

The gear concept and gearless concept in a component comparison

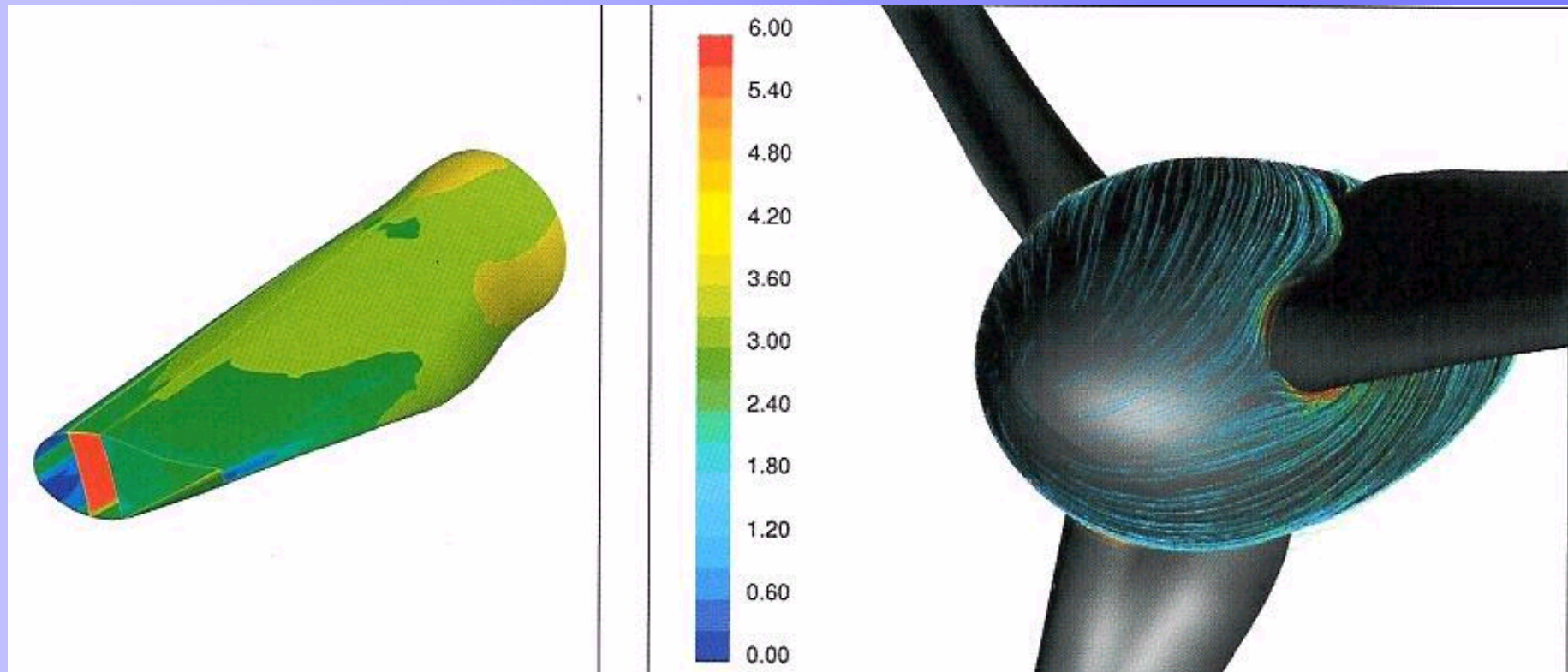


E-33



E-40

Pesquisa e desenvolvimento (E70)



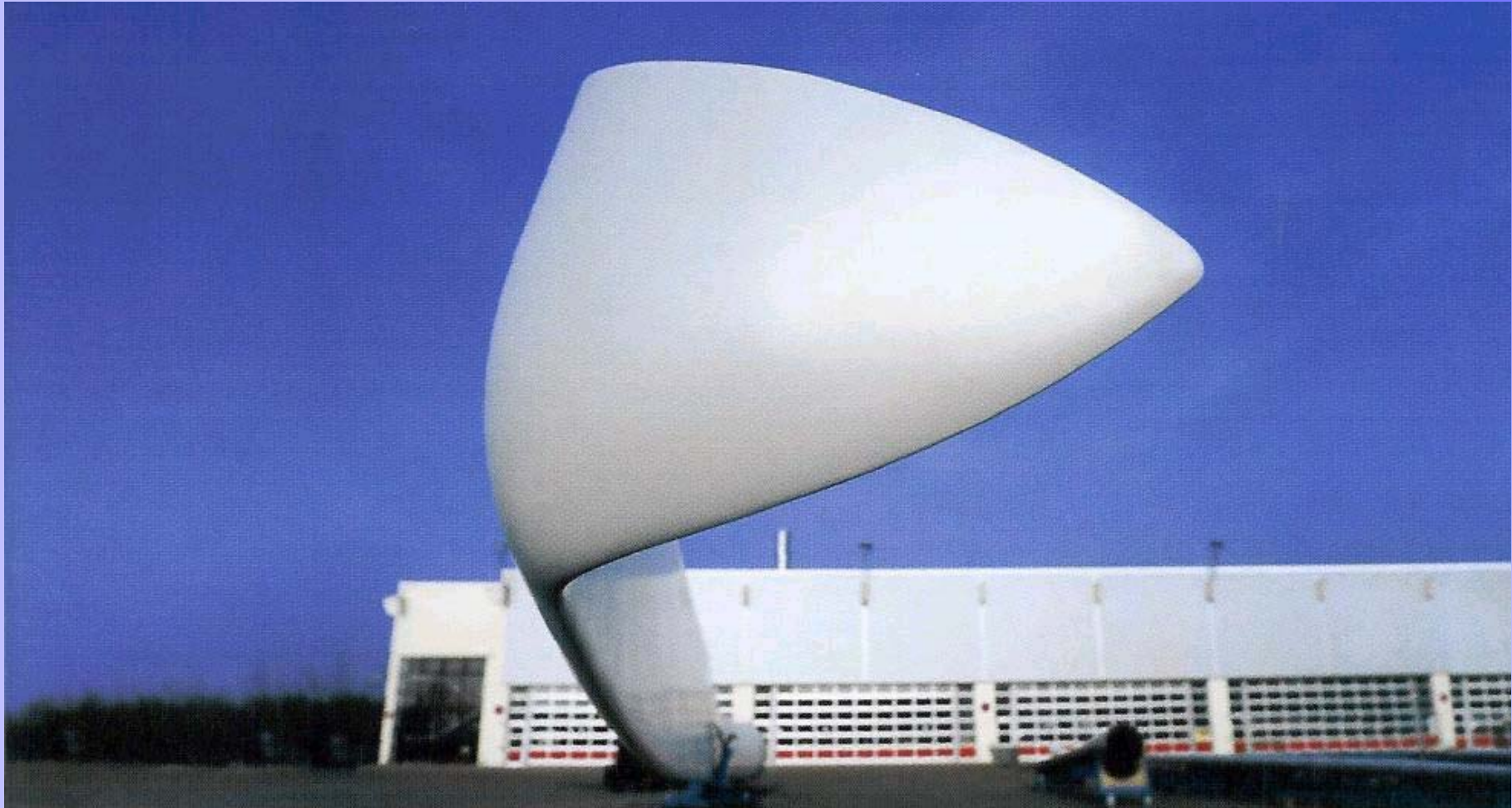
in: catálogo do fabricante ENERCON , Alemanha

A nacele de um AG



Pesquisa e desenvolvimento (E70)

Pá com desenho especial da ponta para reduzir o ruído

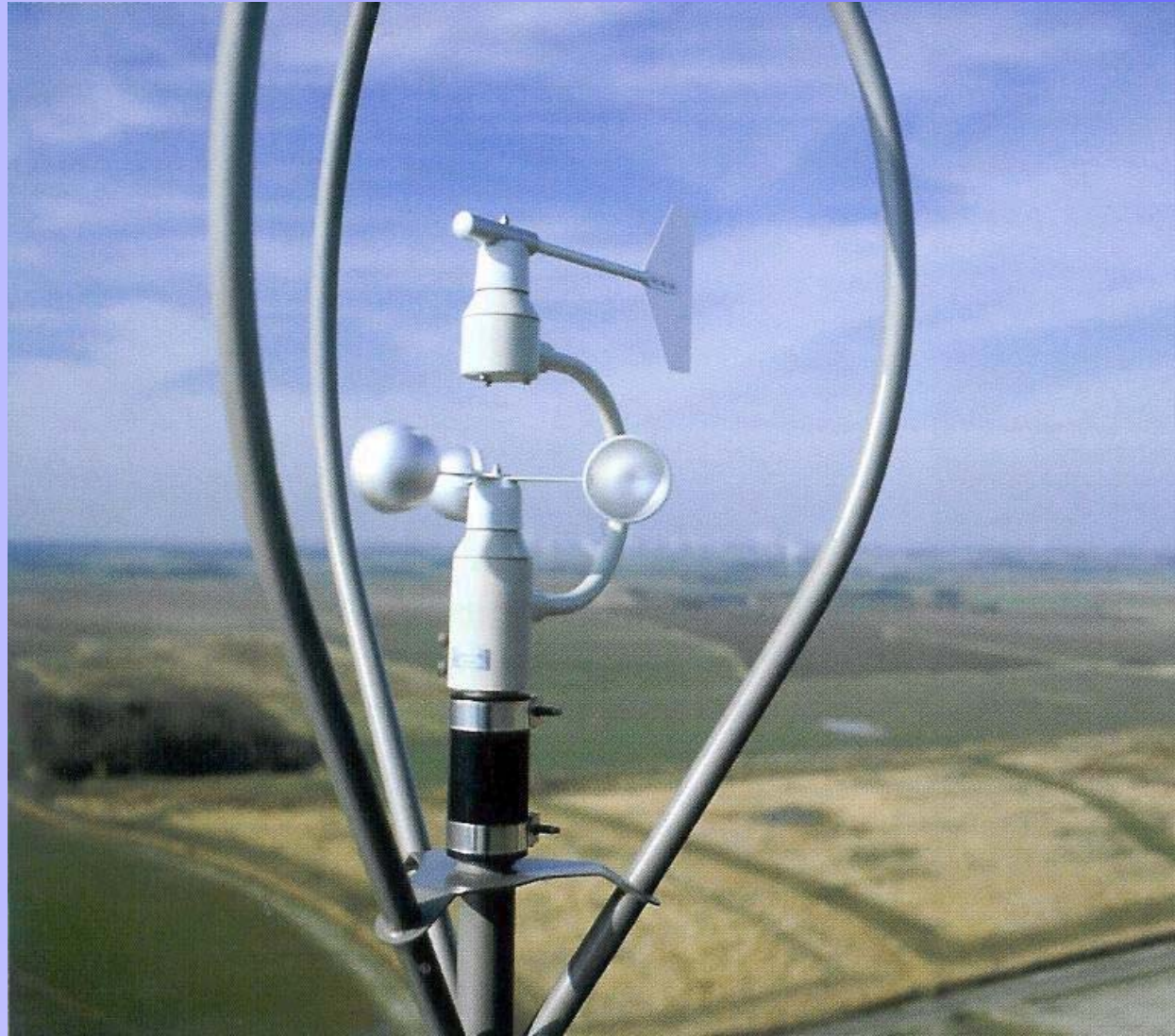


in: catálogo do fabricante ENERCON , Alemanha

Os modernos AGs



Sensores anemométricos na nacele de um AG



in: catálogo do fabricante ENERCON , Alemanha

AGs em um parque eólico



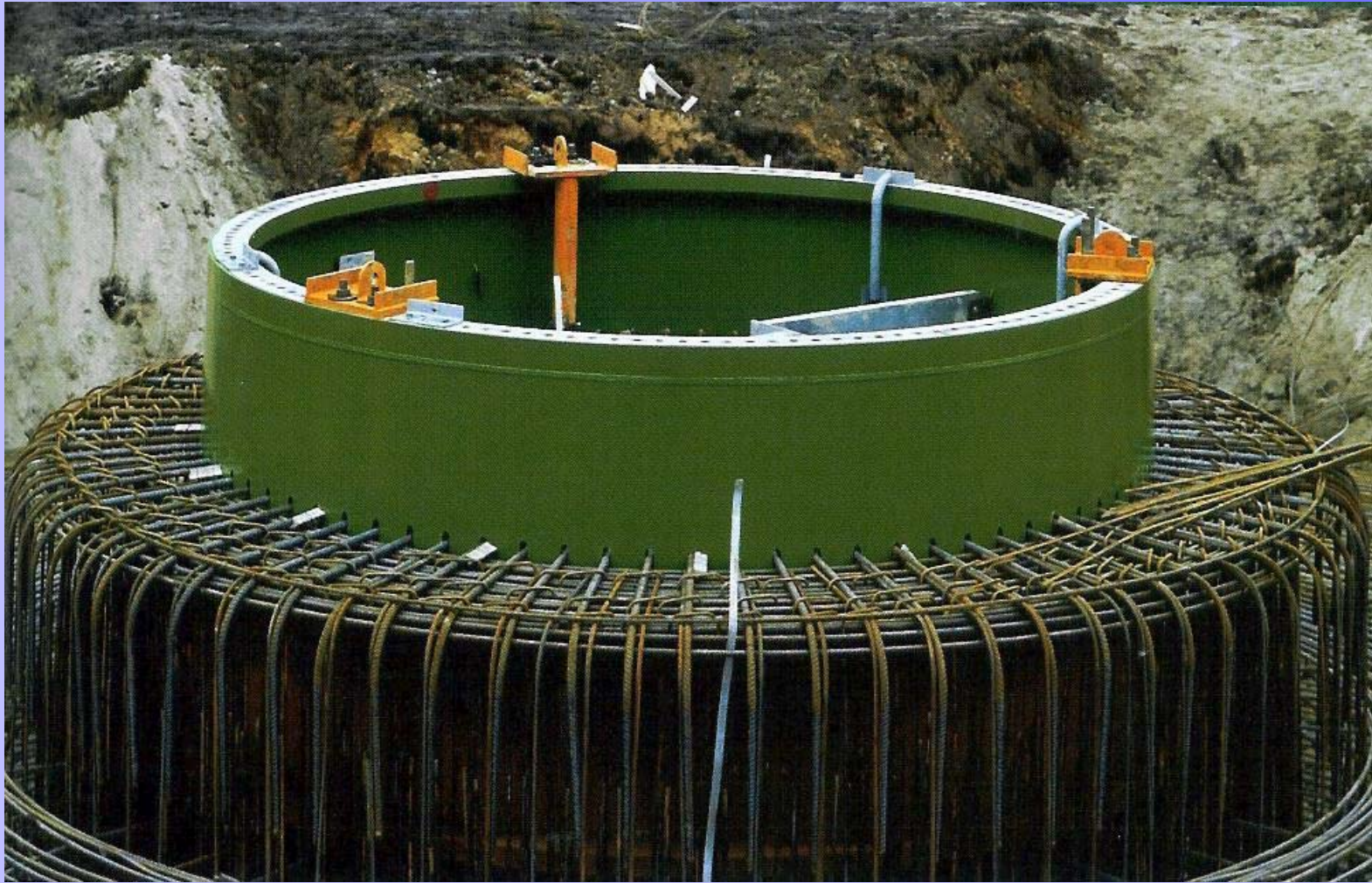
in: catálogo do fabricante, NORDEX

Os modernos AGs



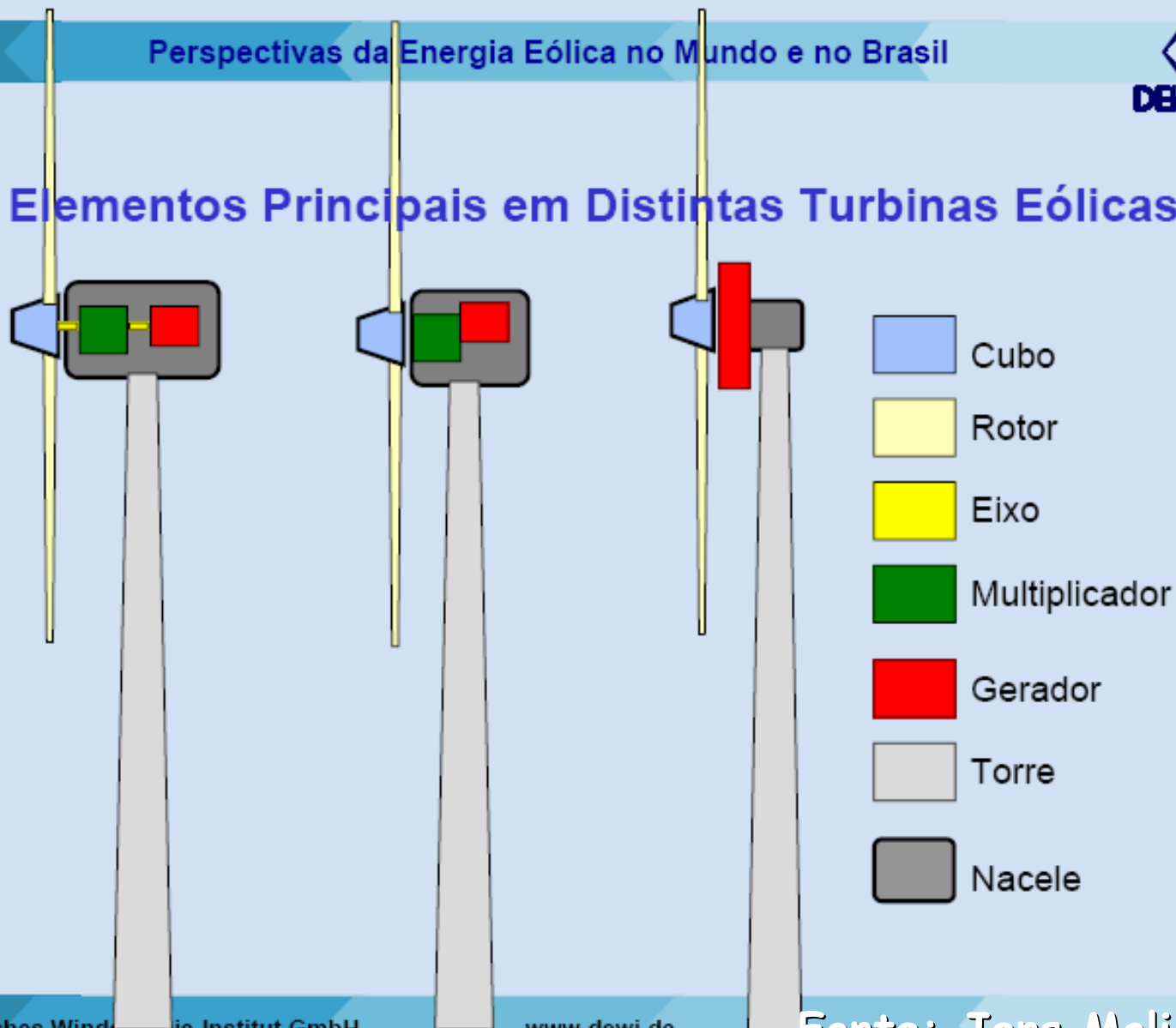
in: catálogo do fabricante

Fundações da torre de um AG

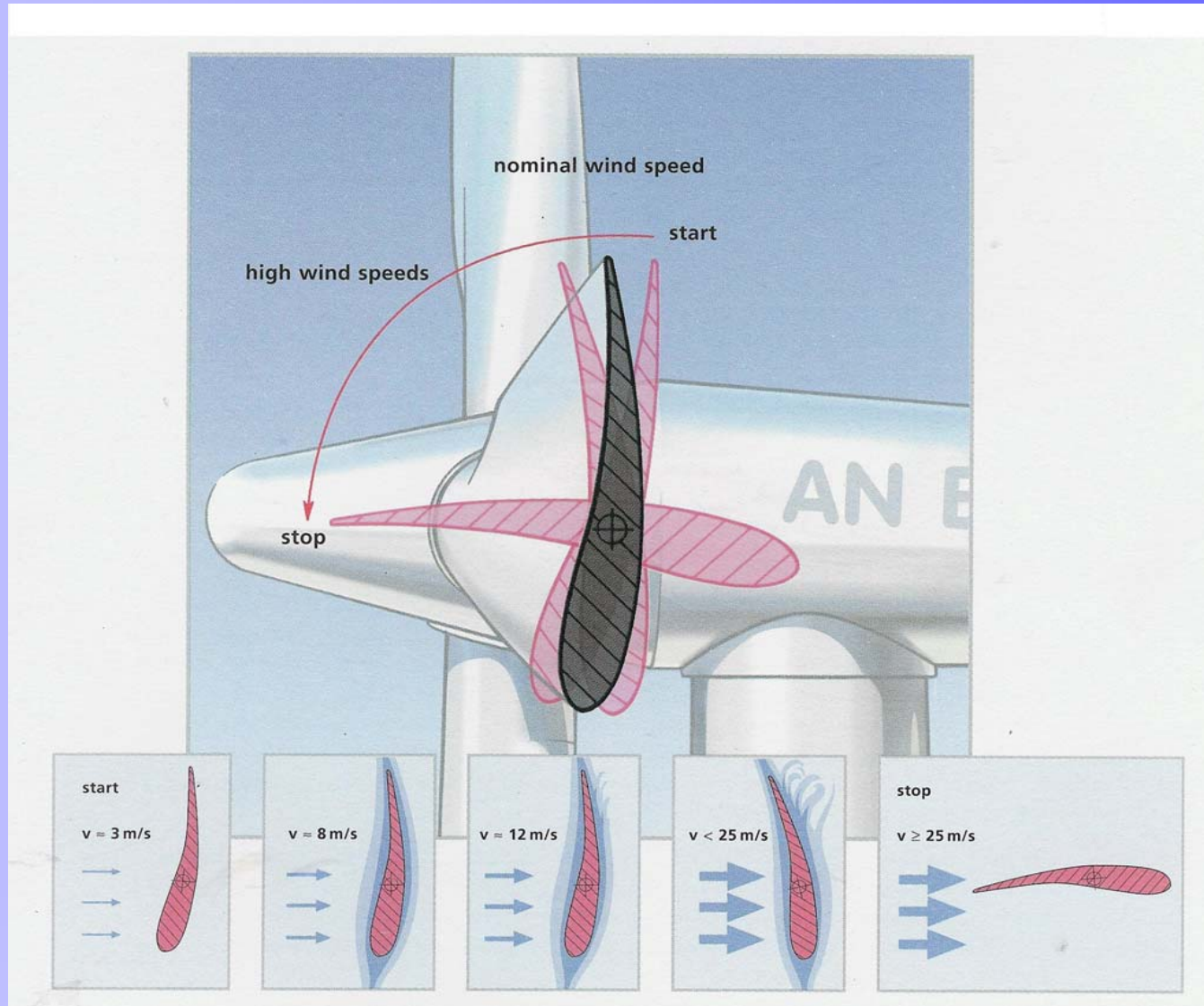


in: catálogo do fabricante ENERCON, Alemanha

Elementos Principais em Distintas Turbinas Eólicas

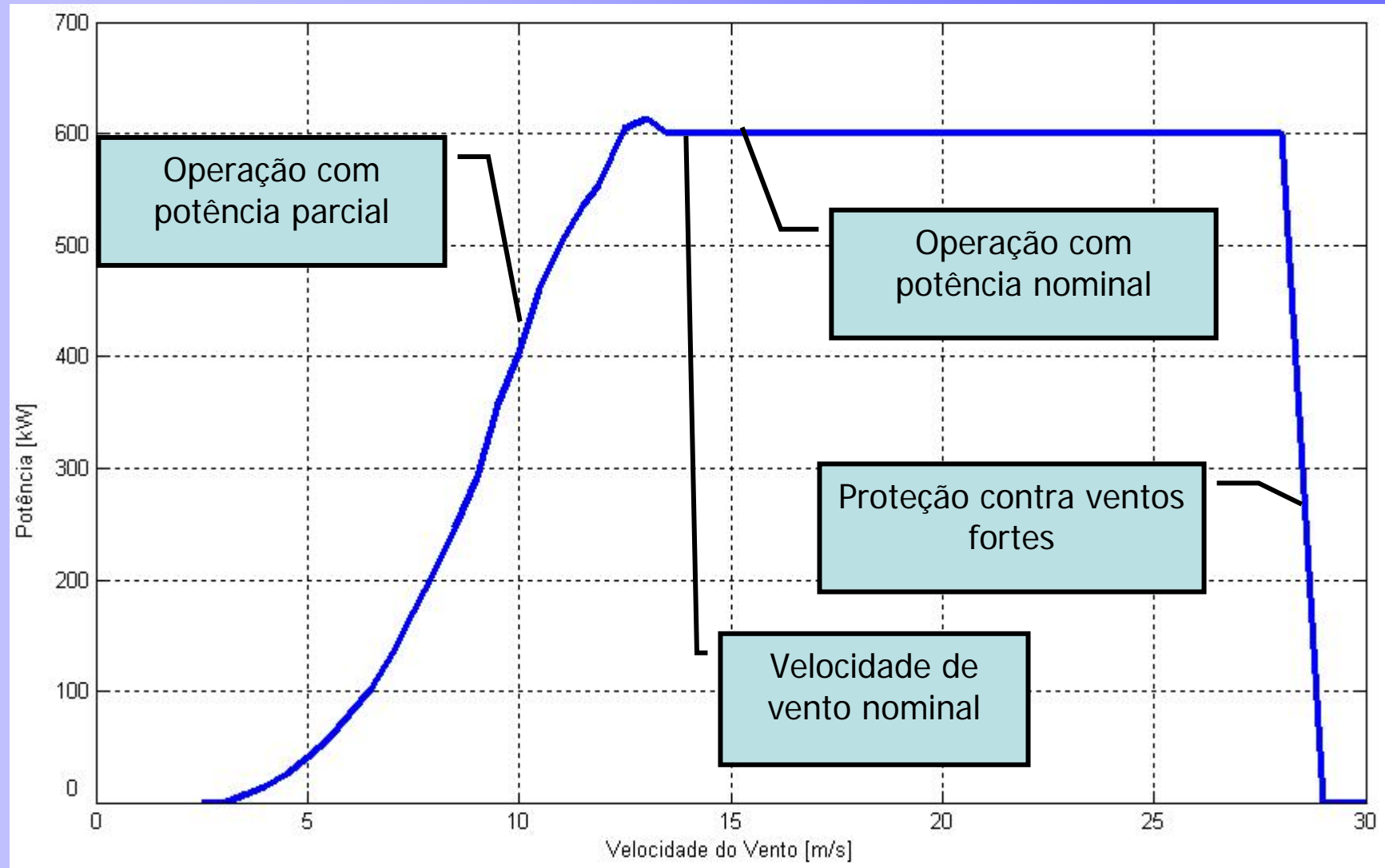


Controle do ângulo da pá



in: catálogo da AN windenergie , Bonus-Alemanha

Curva de potência de um AG



O Vento

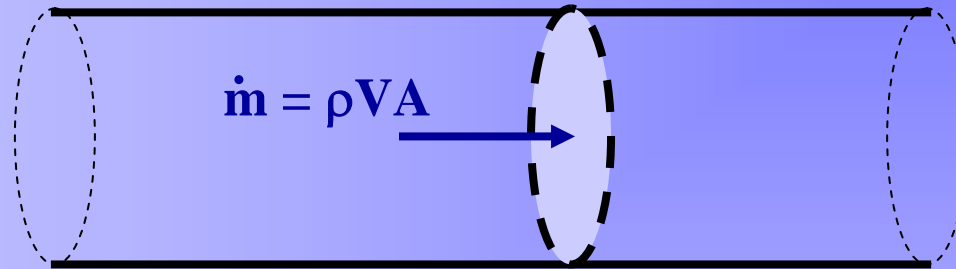
Anemômetro e veleta



Anemômetro e veleta



A potência do vento

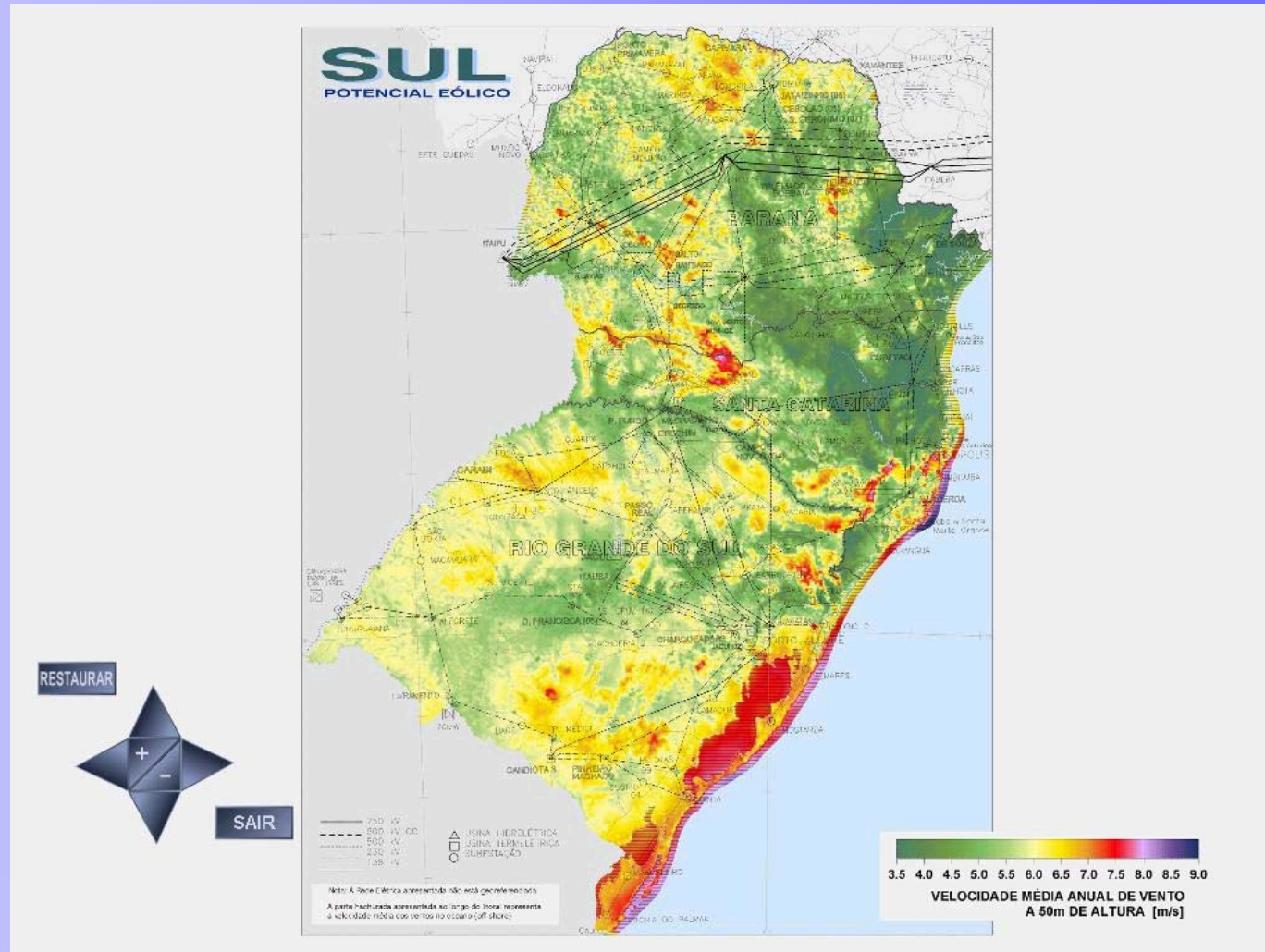


$$P = \frac{1}{2} \dot{m} V^2 = \frac{1}{2} \rho V^3 A = \frac{\pi}{8} \rho V^3 D^2$$

Atlas eólico do Brasil 1



Atlas eólico do sul do Brasil



in: *Eletrobrás*

Engenharia Ambiental – Energias Limpas e Renováveis - Março/2007

A Distribuição de WEIBULL

- **Função de Acumulação de Weibull:** $F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_0}{c}\right)^k\right]$

- **F(V) - fração do total de dados que se encontra entre os valores 0 e V**

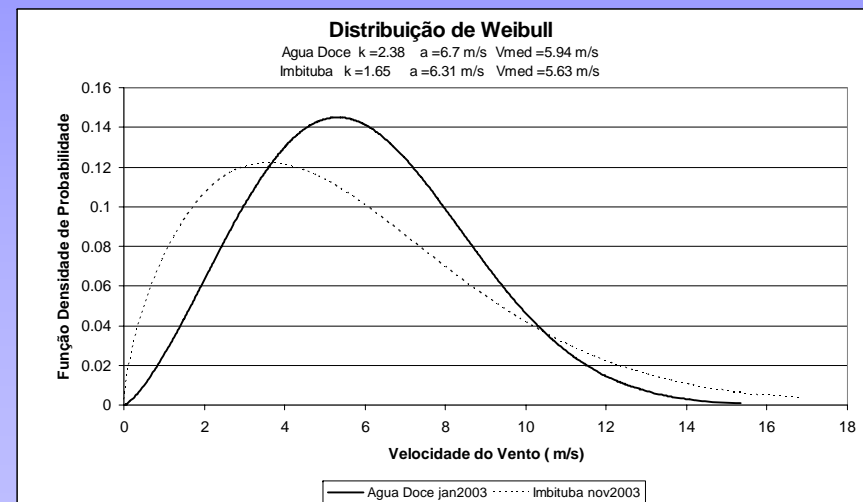
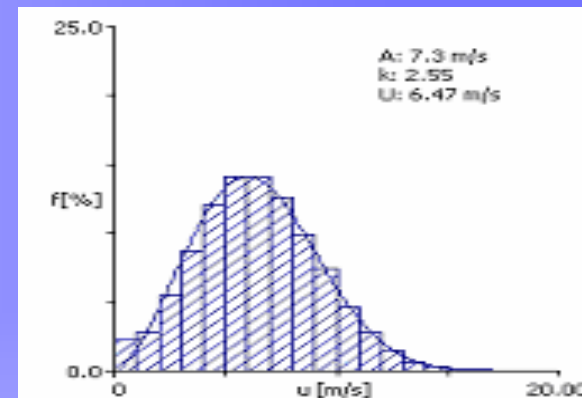
$$F(V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right]$$

- **Função Densidade de Probabilidade de Weibull:**

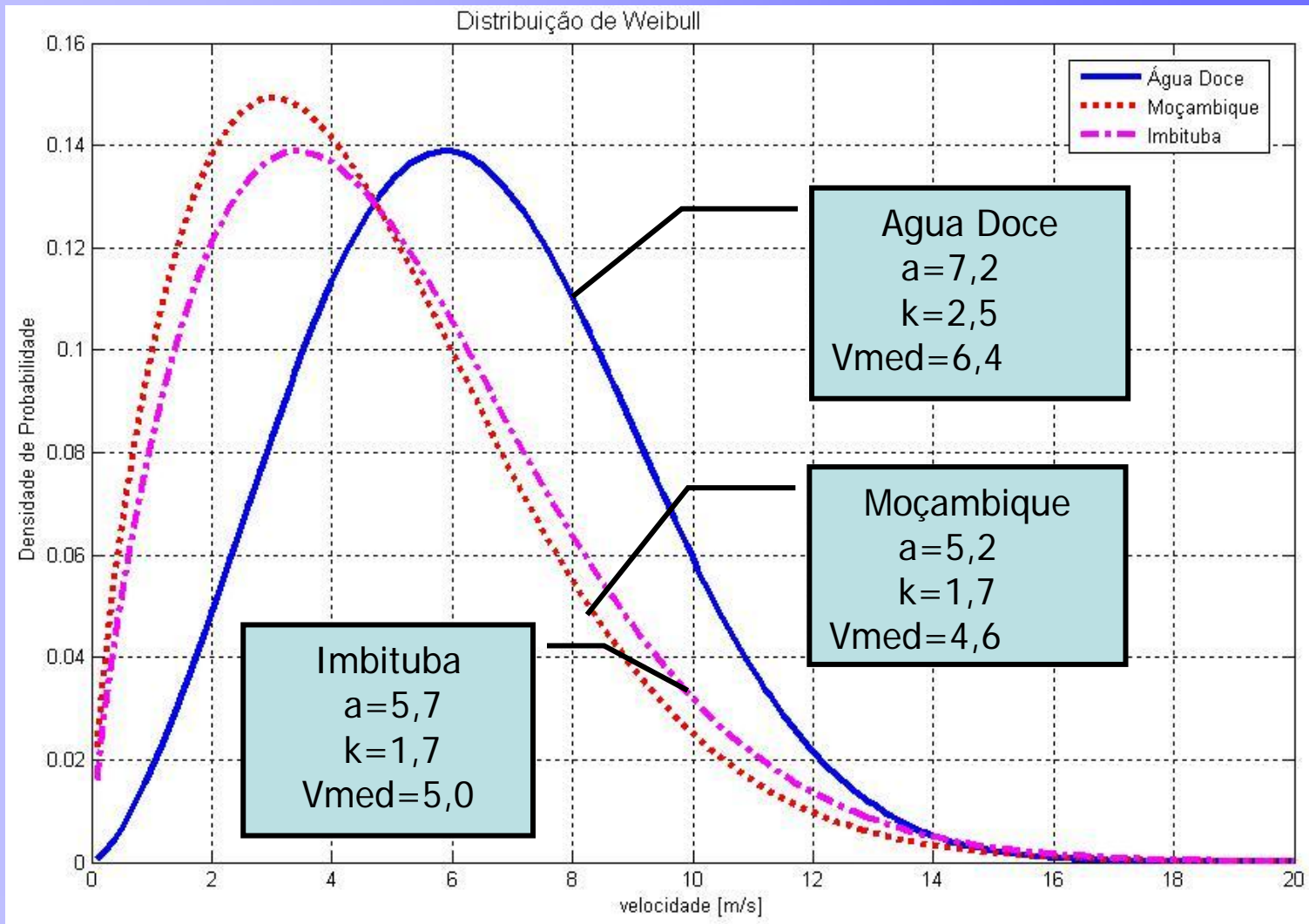
$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right]$$

A distribuição de Weibull

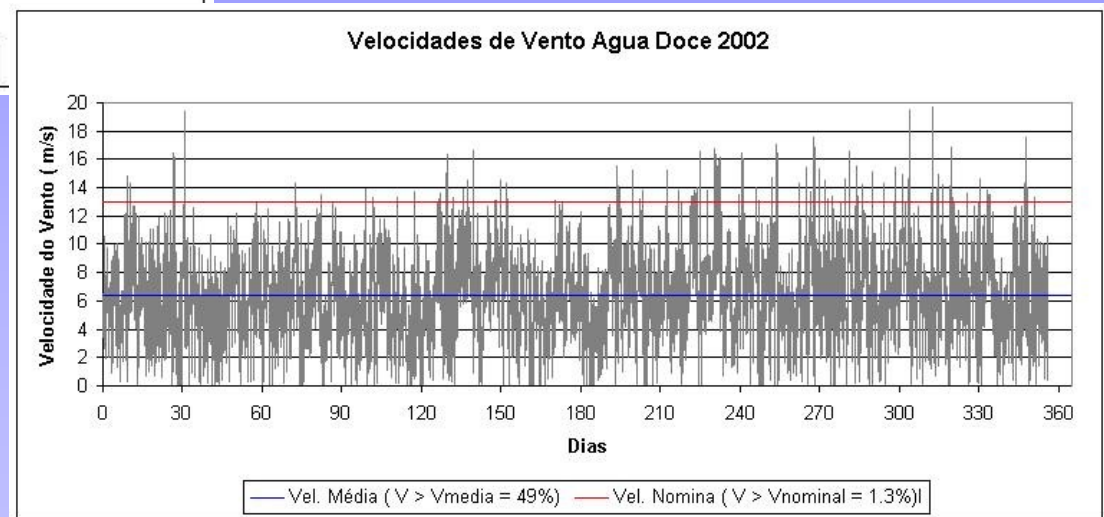
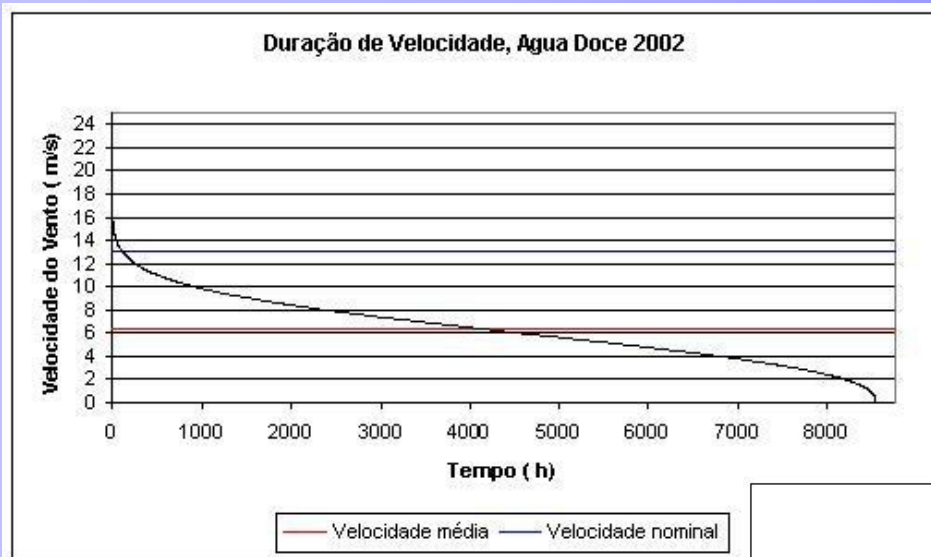
- k - representa a forma da curva. Expressa a regularidade da velocidade do vento
- c - representa o valor de V abaixo do qual encontra-se 63,2% dos dados



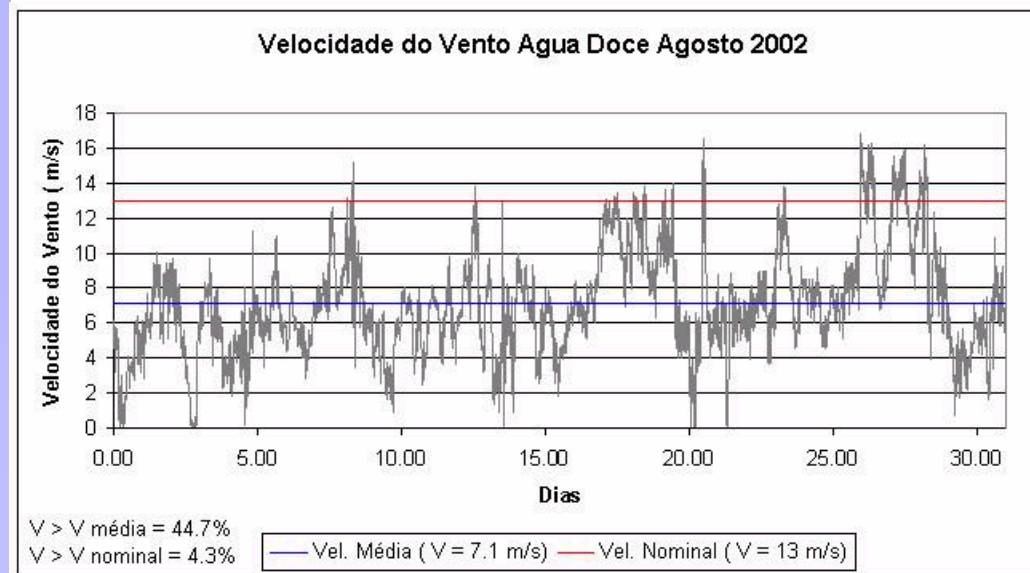
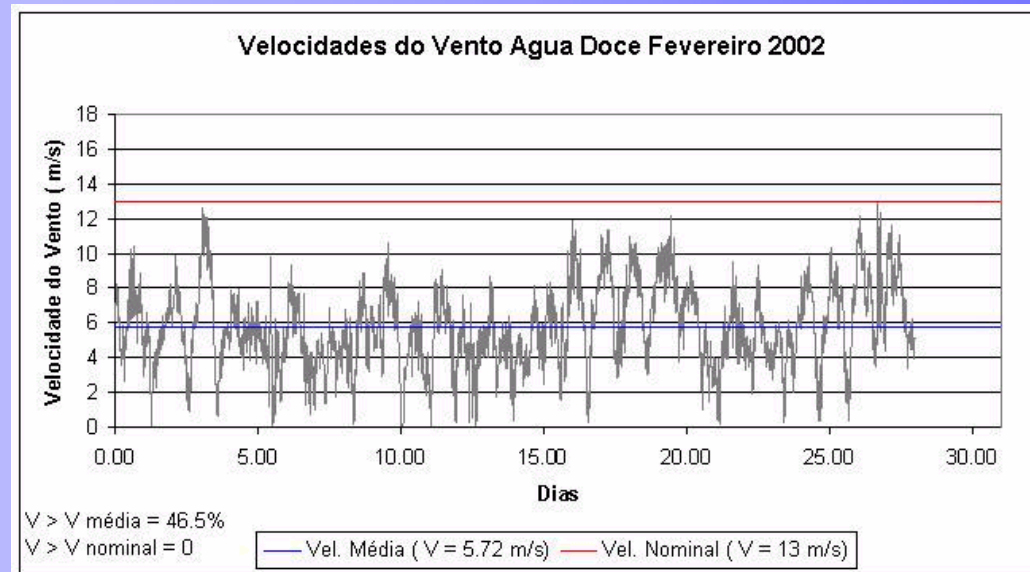
k, a de sítio eólicos catarinenses



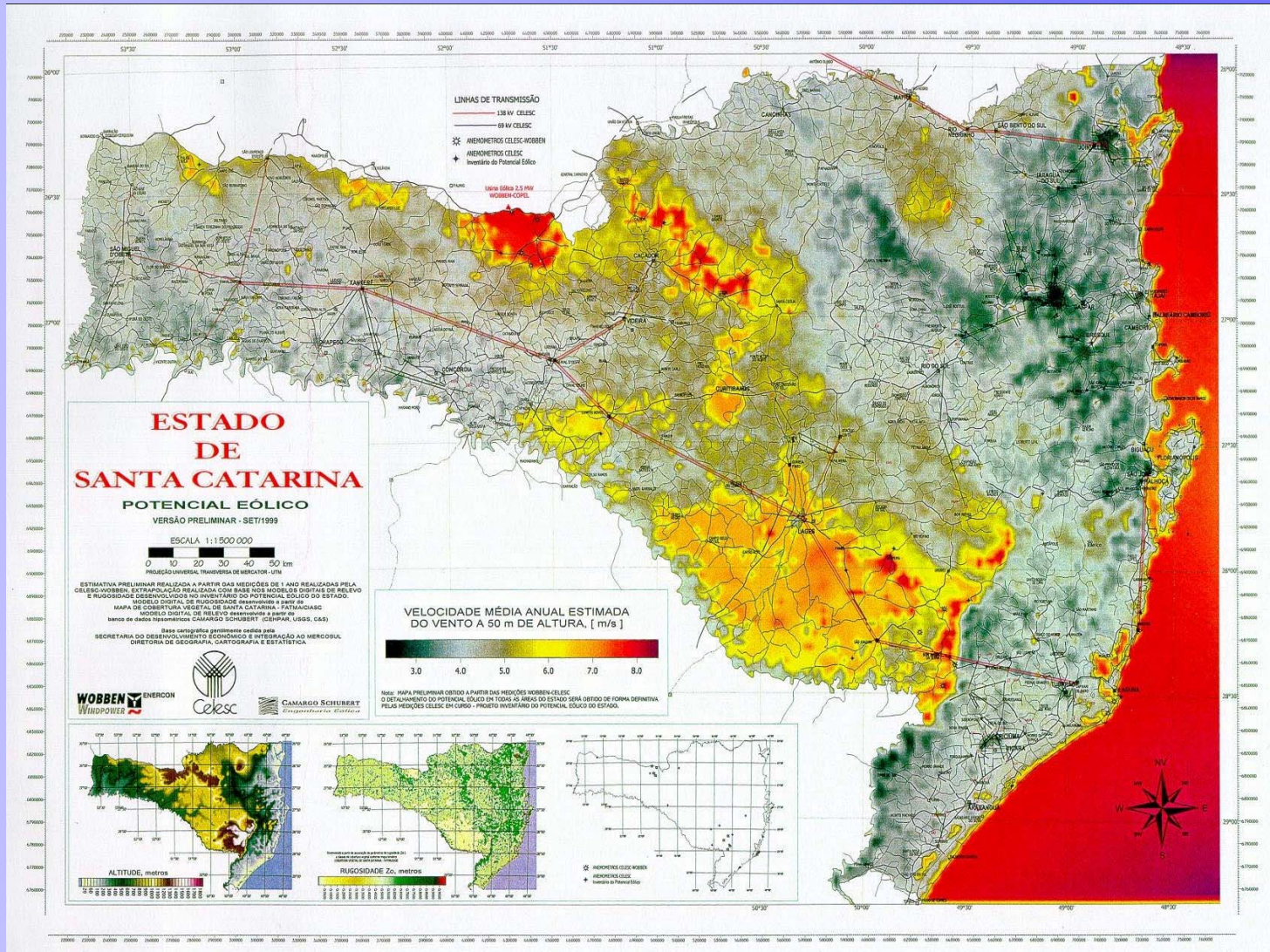
Características do vento em Água Doce-SC



Características do vento em Água Doce-SC



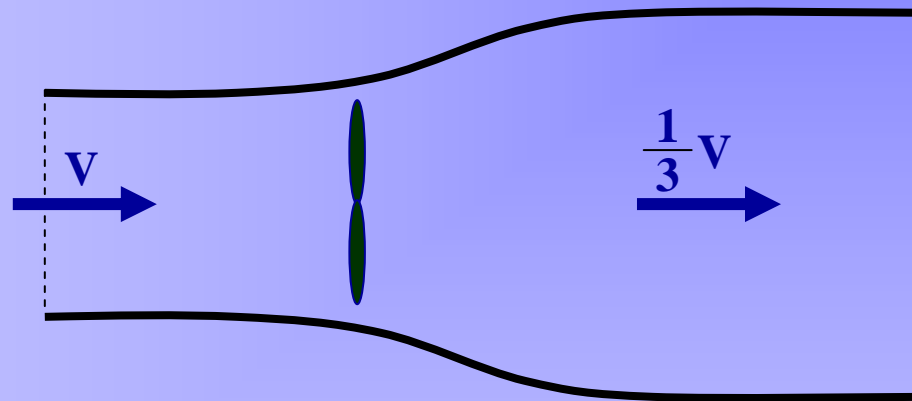
O mapa eólico da Santa Catarina



O rendimento ideal (máximo):
rendimento de Betz

O rendimento de Betz

Albert BETZ (1885-1968)



$$C_p = \frac{\text{Potência extraída}}{\text{Potência disponível}} = \frac{16}{27} = 0,593$$

Rendimento de Betz

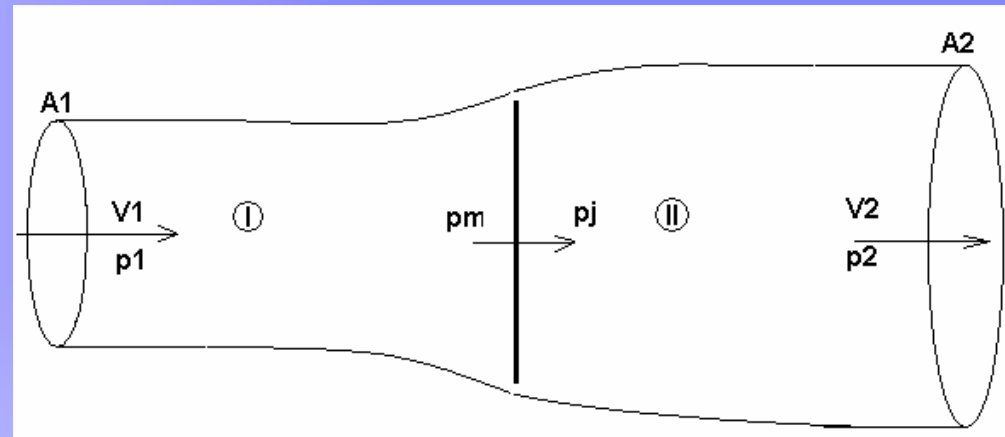
- Para calcular o valor da diferença de pressão antes e depois da turbina, aplica-se a equação de Bernoulli

- Sabendo que:

$$V_M = V_J = V_T$$

- Tem-se:

$$(p_M - p_J) = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_2^2)$$



$$p_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} = p_M + \frac{\rho V_M^2}{2}$$

$$p_J + \frac{\rho V_J^2}{2} = p_2 + \frac{\rho V_2^2}{2}$$

Rendimento de Betz

- Ao substituírmos na equação da Força exercida pelo vento e, posteriormente, na da Potência extraída, chega-se a:

$$P_{EX} = \frac{1}{2} \rho A_T V_T (V_1^2 - V_2^2)$$

- A velocidade do vento na turbina é diferente da velocidade do vento incidente

$$a = \frac{V_1 - V_T}{V_1} \qquad V_T = V_1(1 - a)$$

- E pode-se demonstrar que:

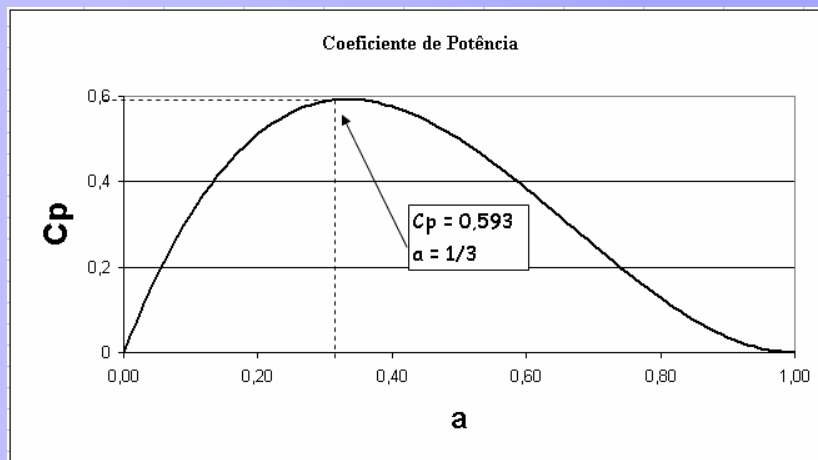
$$V_T = \frac{V_1 + V_2}{2} \qquad V_2 = V_1(1 - 2a)$$

Rendimento de Betz

- O coef. de potência é calculado como sendo:

$$C_p = \frac{P_{EX}}{P_V}$$

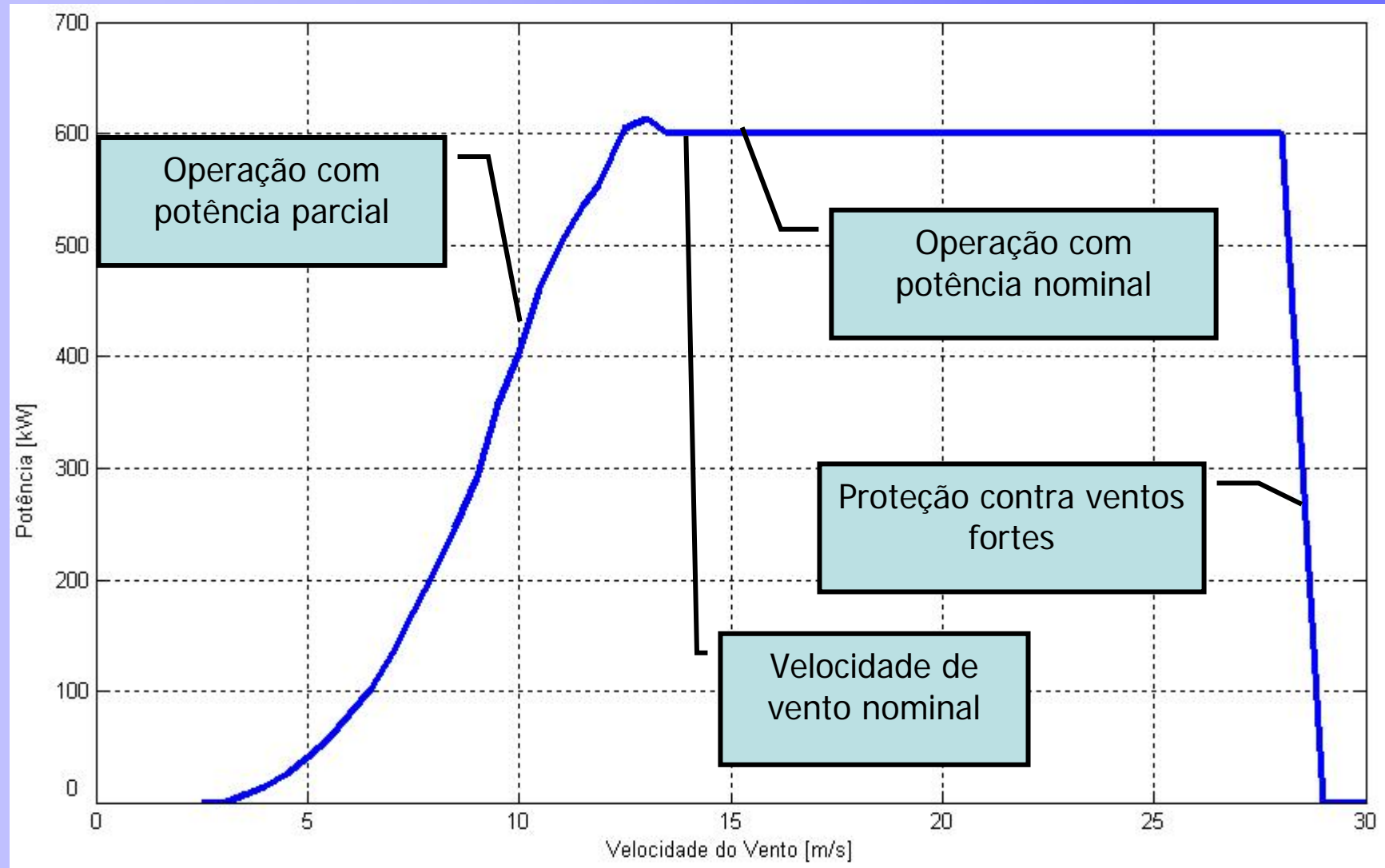
- Substituindo a Potência extraída e a Potência do vento na equação acima, e posteriormente, V_T e V_2 , chega-se a:



$$C_p = 4a(1-a)^2$$

$$C_p = \frac{16}{27} = 0,593$$

Curva de potência de um AG



“Site” sobre Energia Eólica

<http://www.dewi.de>

(Deutsches Windenergie-Institut, ver DEWI Magazin)