

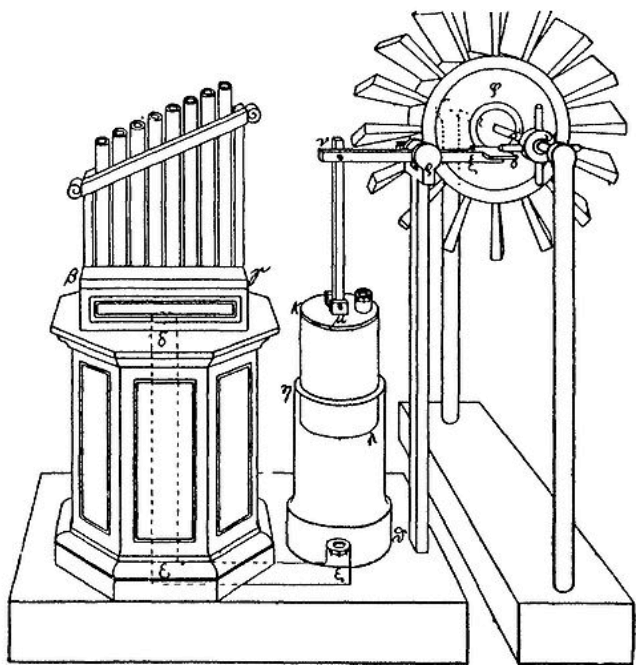
ENERGIA EÓLICA

Energias Renováveis

Miguel Centeno Brito

Utilização da energia do vento

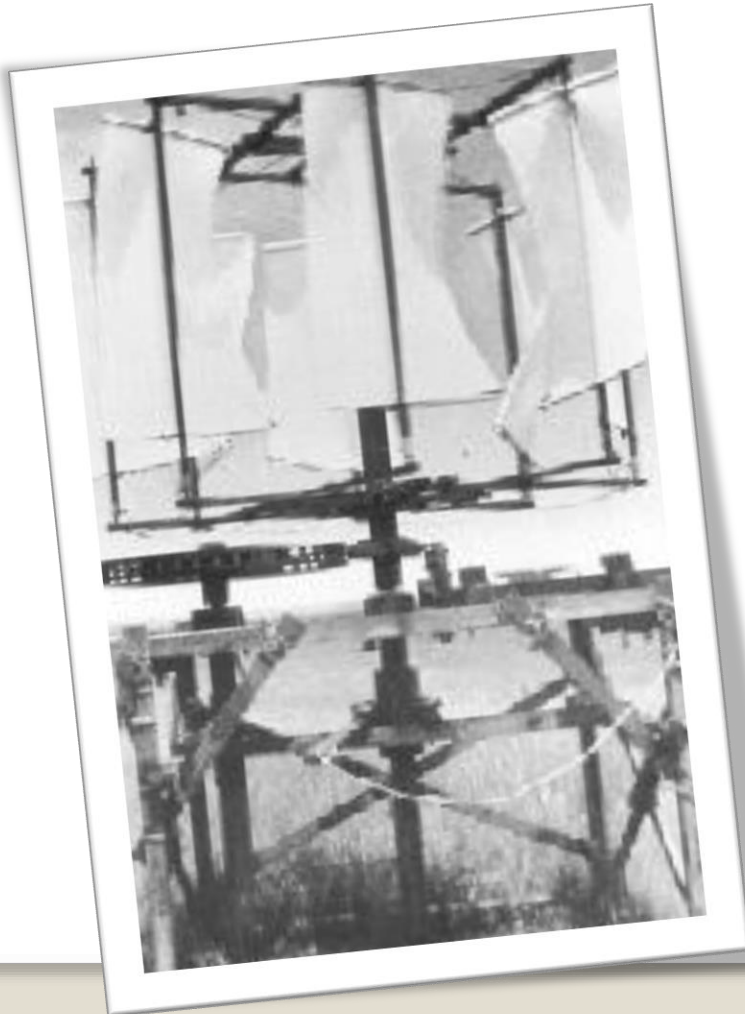
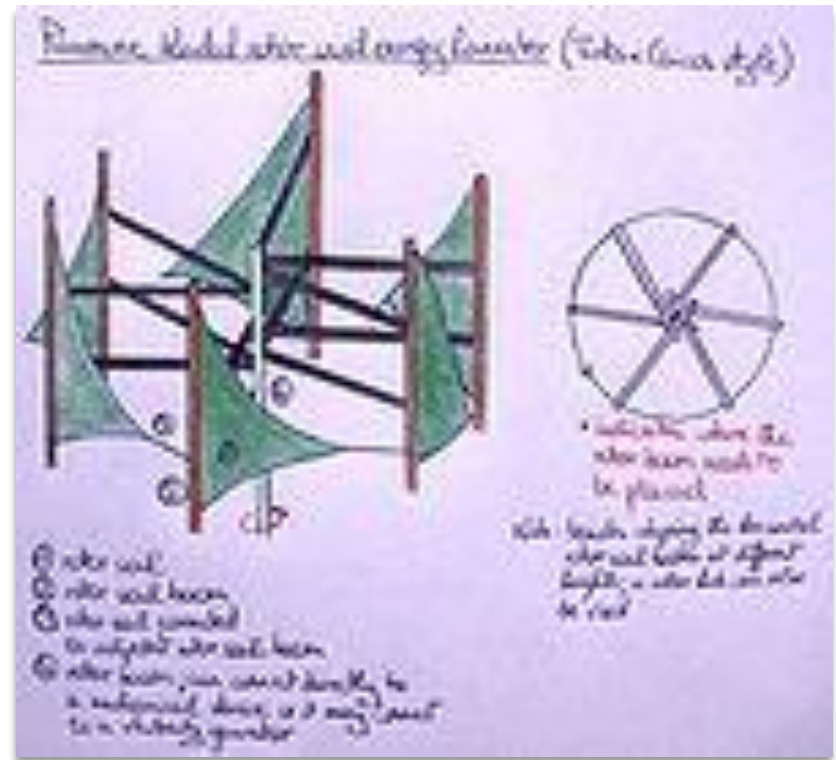
Egipto antigo e barcos fenícios navegaram à vela no Nilo, e no mediterraneo.



Heron (Alexandria)
Orgão musical com
energia do vento

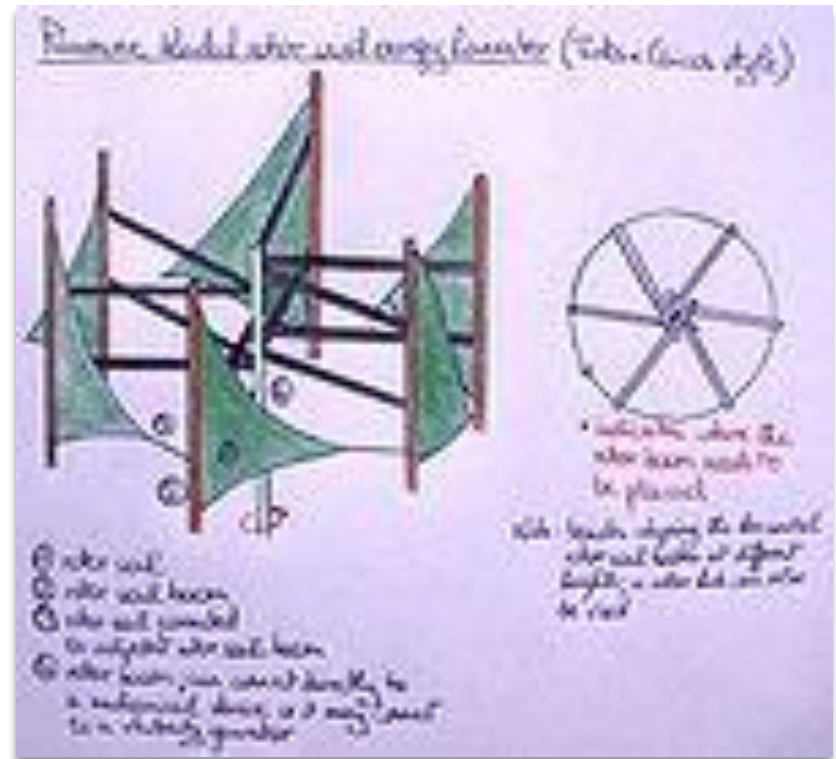
Utilização da energia do vento

Panemone (Pérsia) séc VII
turbina de eixo vertical utilizada
para moer grãos e bombear água



Utilização da energia do vento

Panemone (Pérsia) séc VII
turbina de eixo vertical utilizada
para moer grãos e bombear água



Caravela
portuguesa
Sec XV-XVI

Utilização da energia do vento

Moinhos "Smock" Sec XV-XVI
Inglaterra, Holanda com eixo principal
horizontal e sistema de orientação
automática



Caravela
portuguesa
Sec XV-XVI

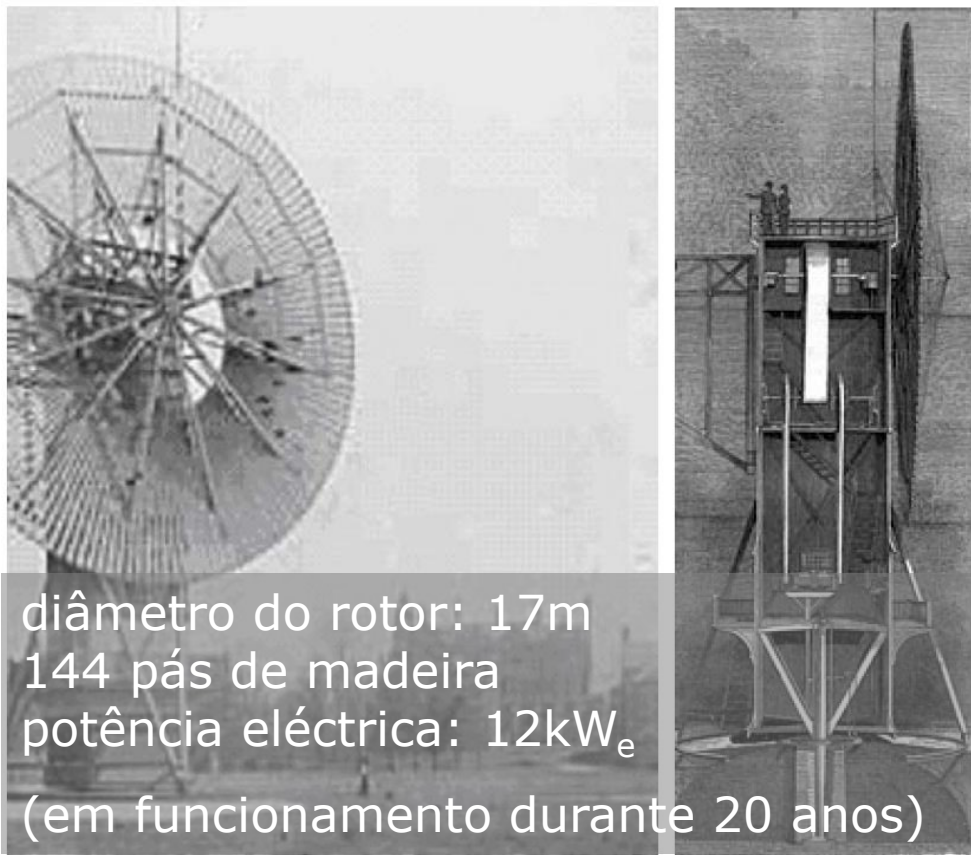


Grande disseminação de moínhos por toda a Europa
Mais de 50,000 em 1850, gradualmente substituídos por carvão...



Utilização da energia do vento

Charles F. Brush (1877)



Moínhos de múltiplas pás,
para bombeamento de água

Utilização da energia do vento

Turbina de Smith-Putman (Grandpa's Knob, Vermont) 1941



diâmetro do rotor: 53m

comprimento pá: 20m

potência eléctrica: 1250kWe

funcionamento a 28 rpm

(controlo do ângulo de ataque das pás)



Utilização da energia do vento

Enercon E126

diâmetro do rotor: 126m

altura da turbina: 135m

potência eléctrica: 7MWe

funcionamento: 5-12rpm
(variável)

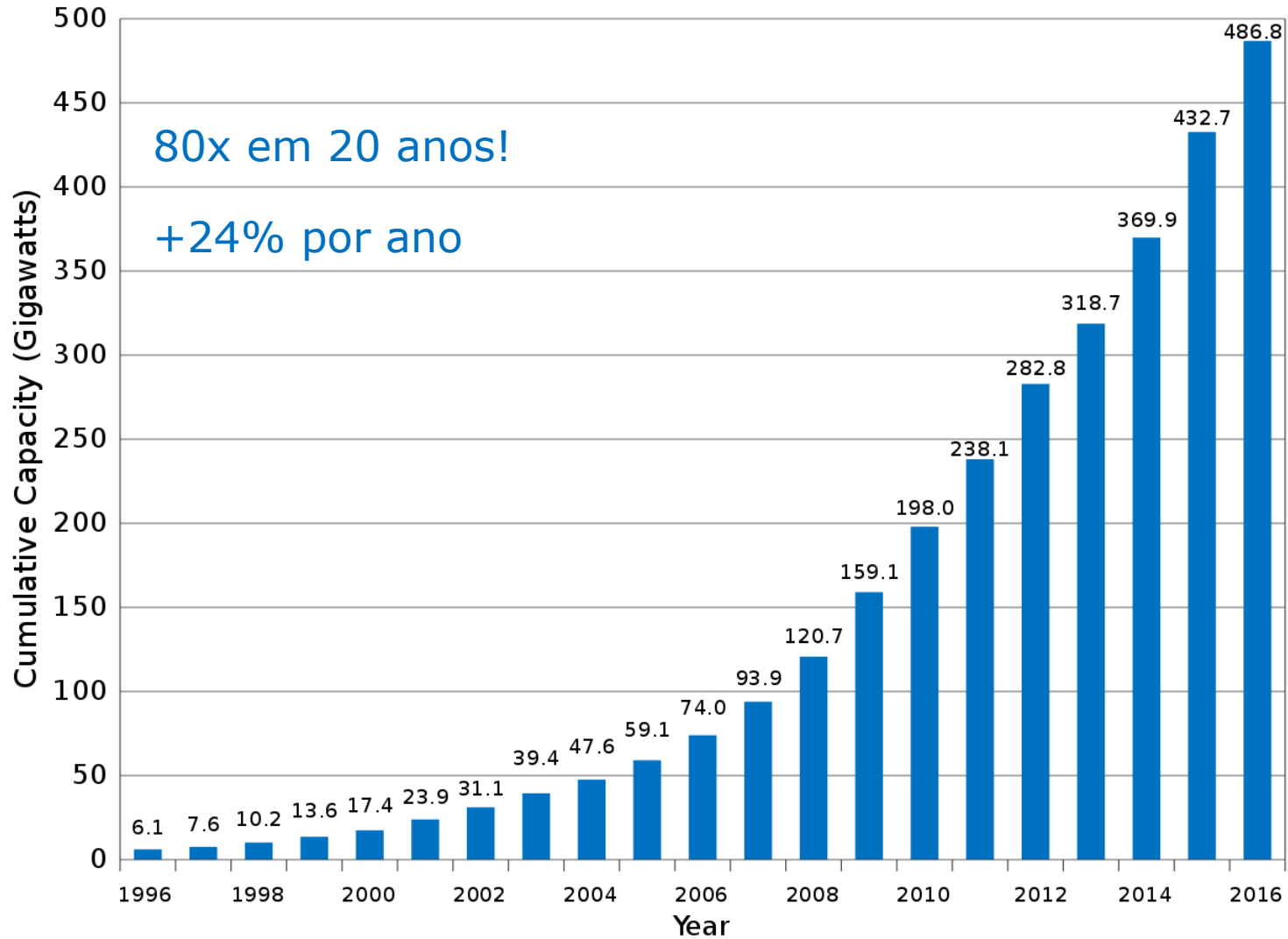
injecção na rede: inversor

vento máximo: 28-34 m/s

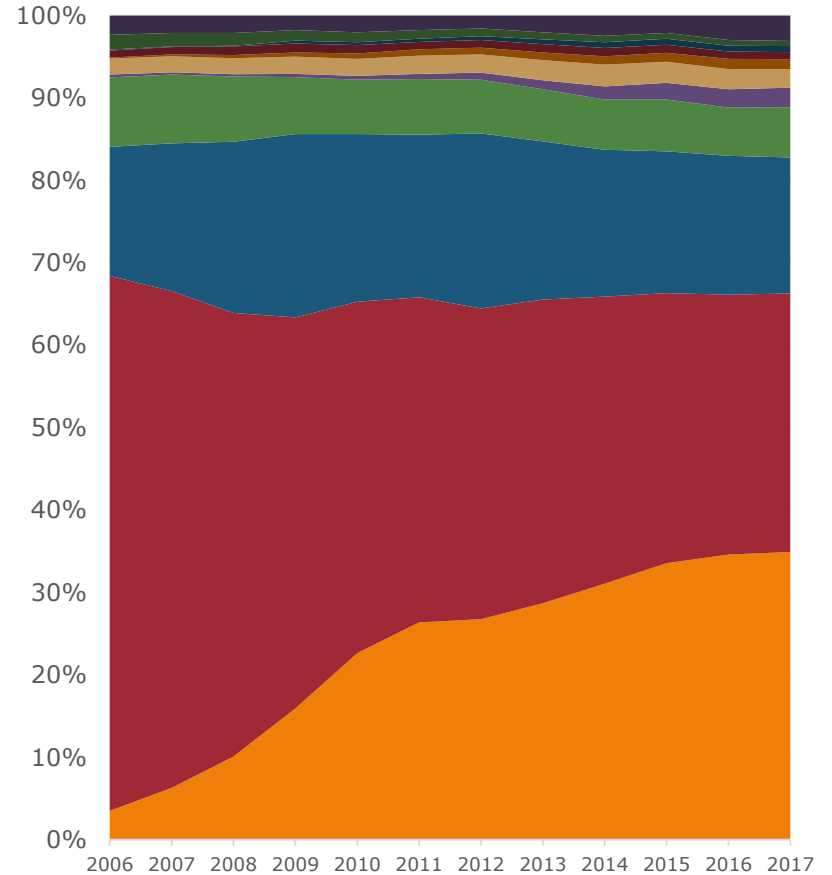
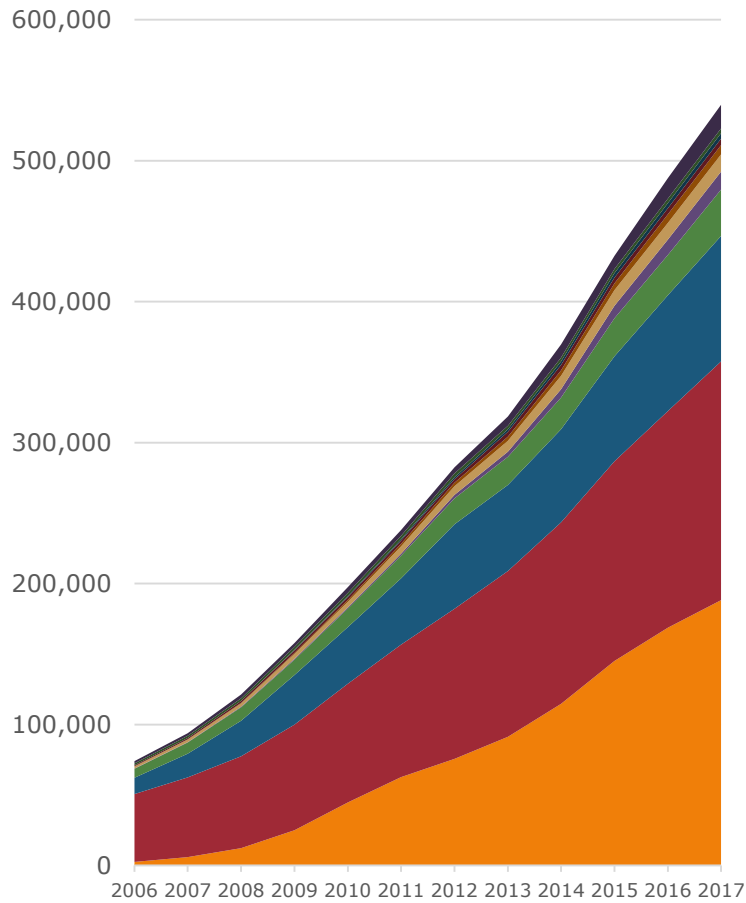


Utilização da energia do vento

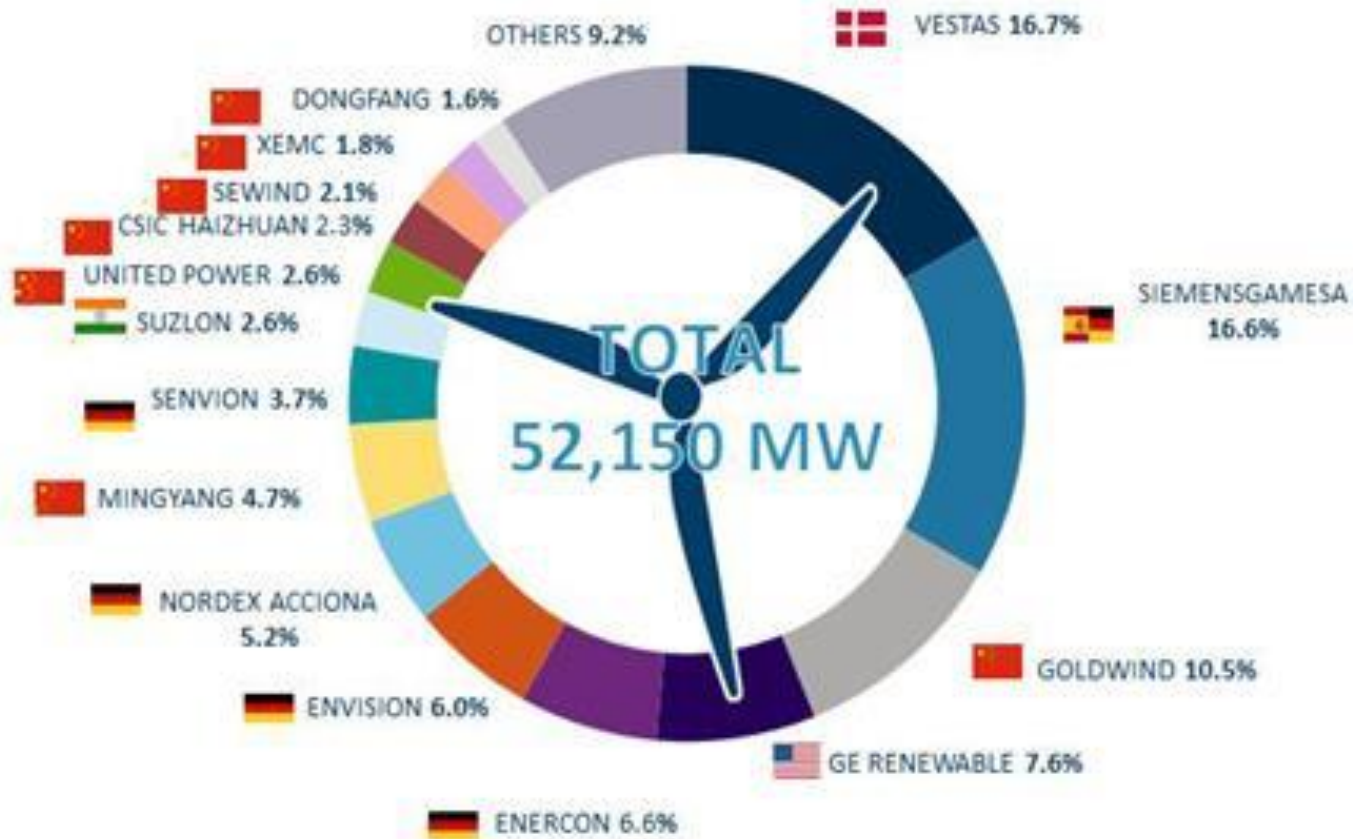
Global Wind Power Cumulative Capacity (Data: GWEC)



Capacidade instalada

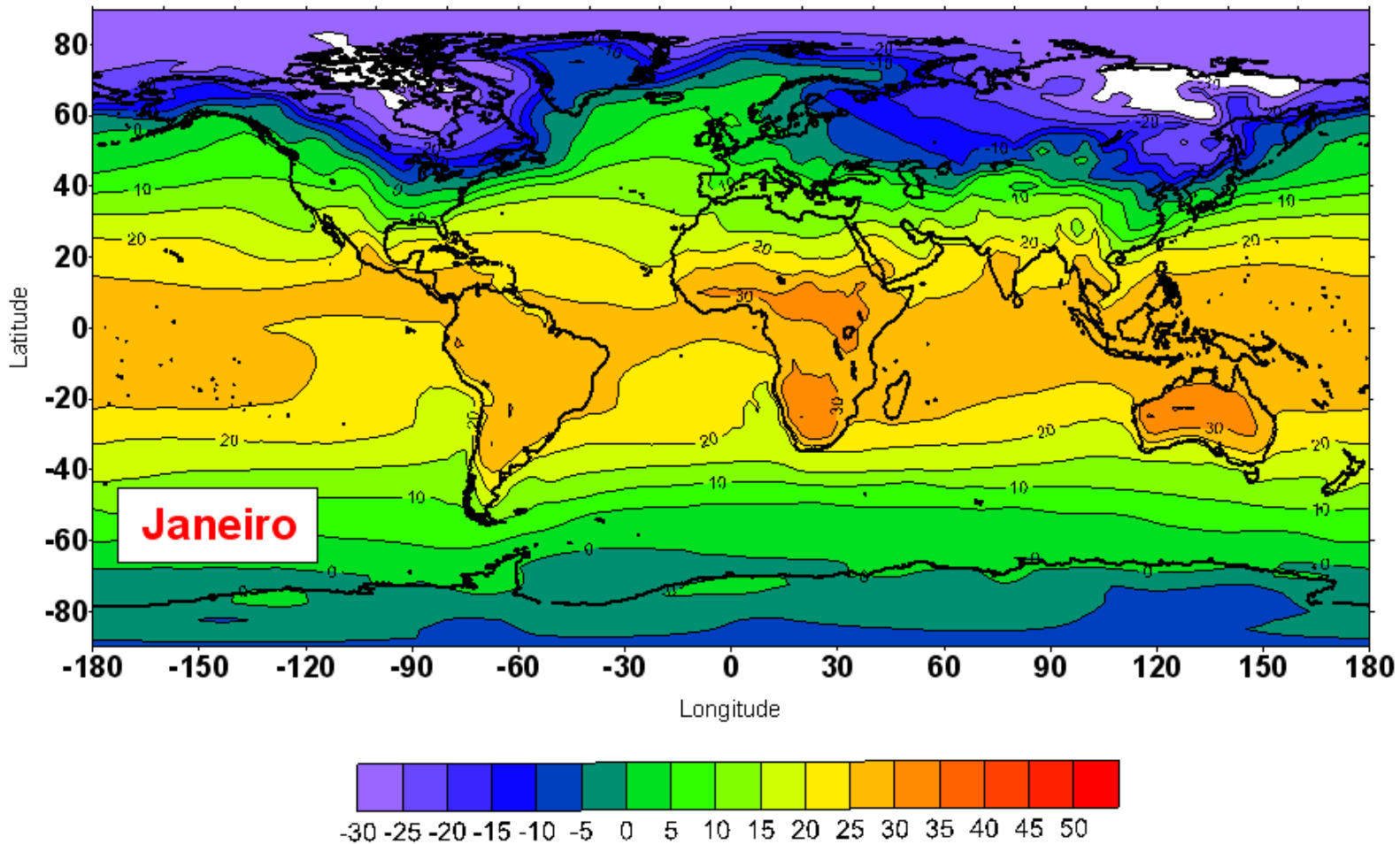


Top 15 wind turbine suppliers in annual global market in 2017



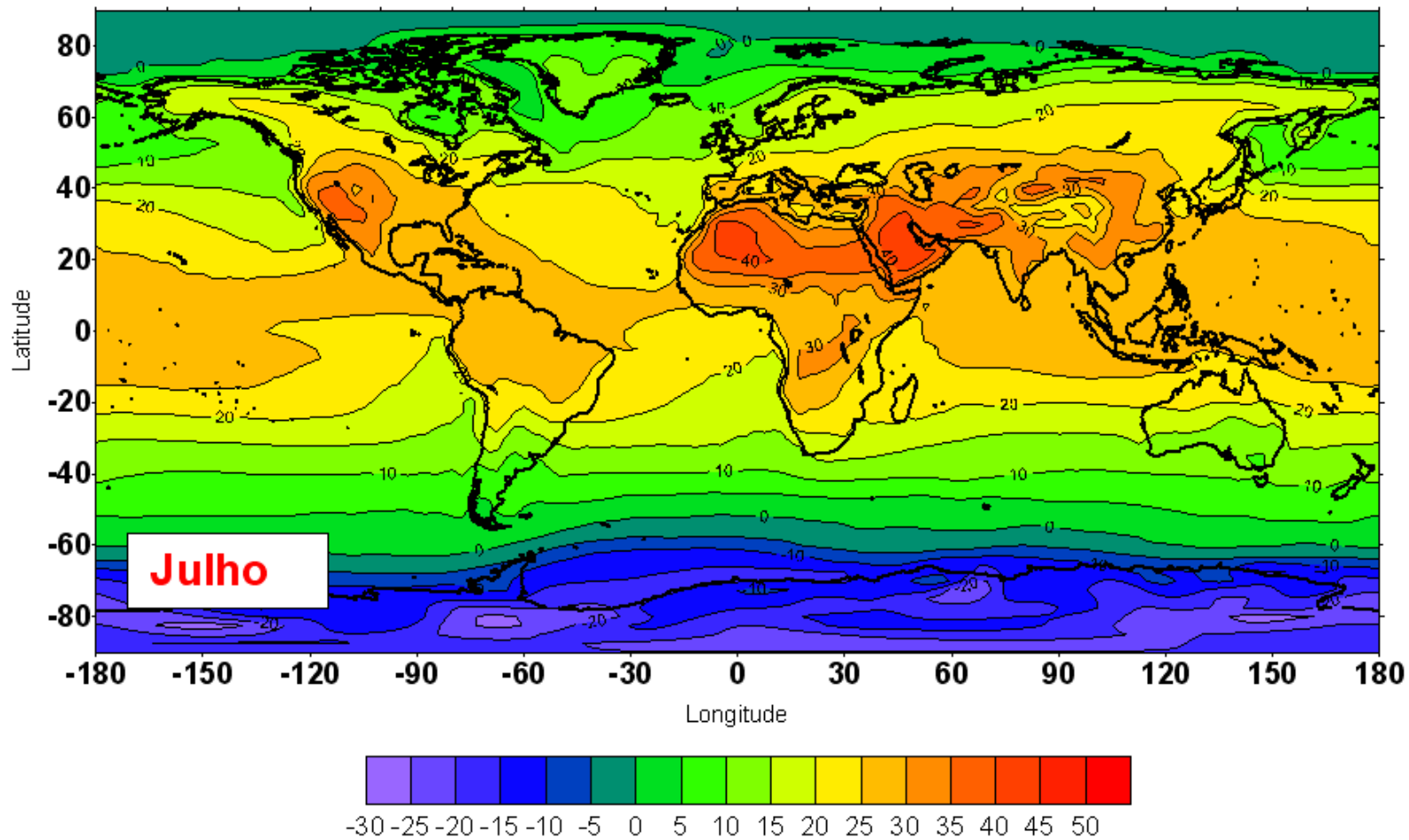
Recurso eólico

Temperatura



Recurso eólico

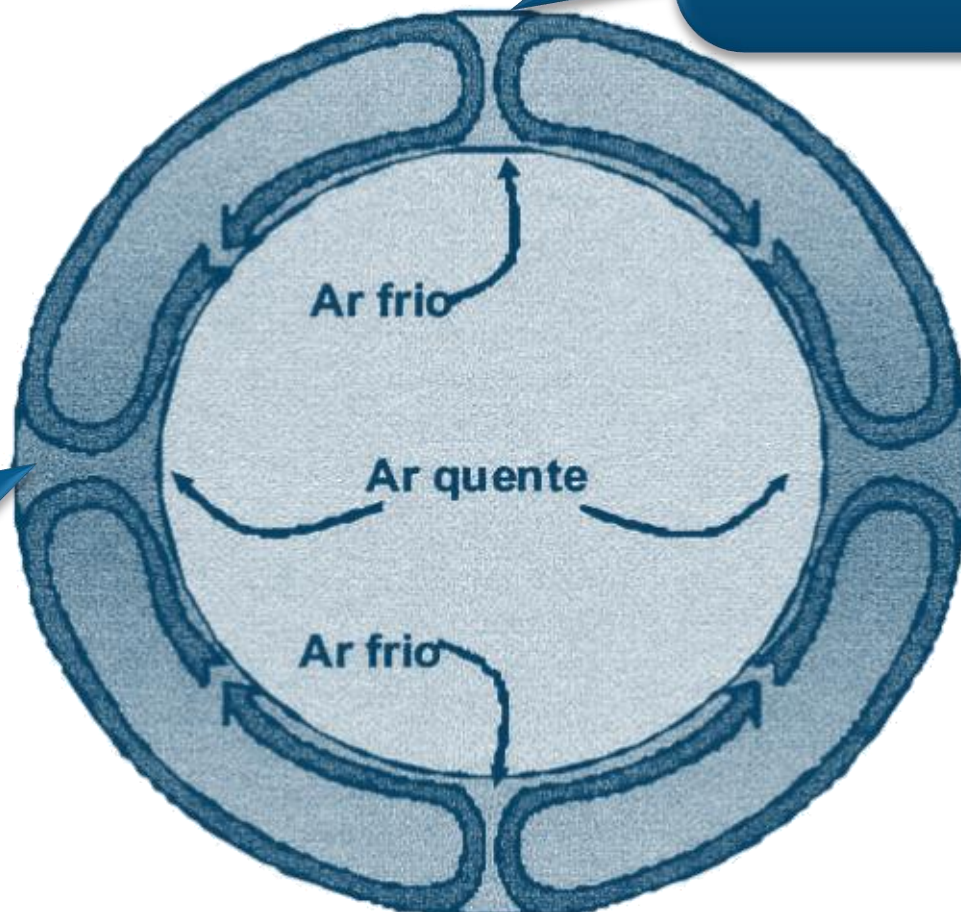
Temperatura



Recurso eólico

Sem rotação da Terra

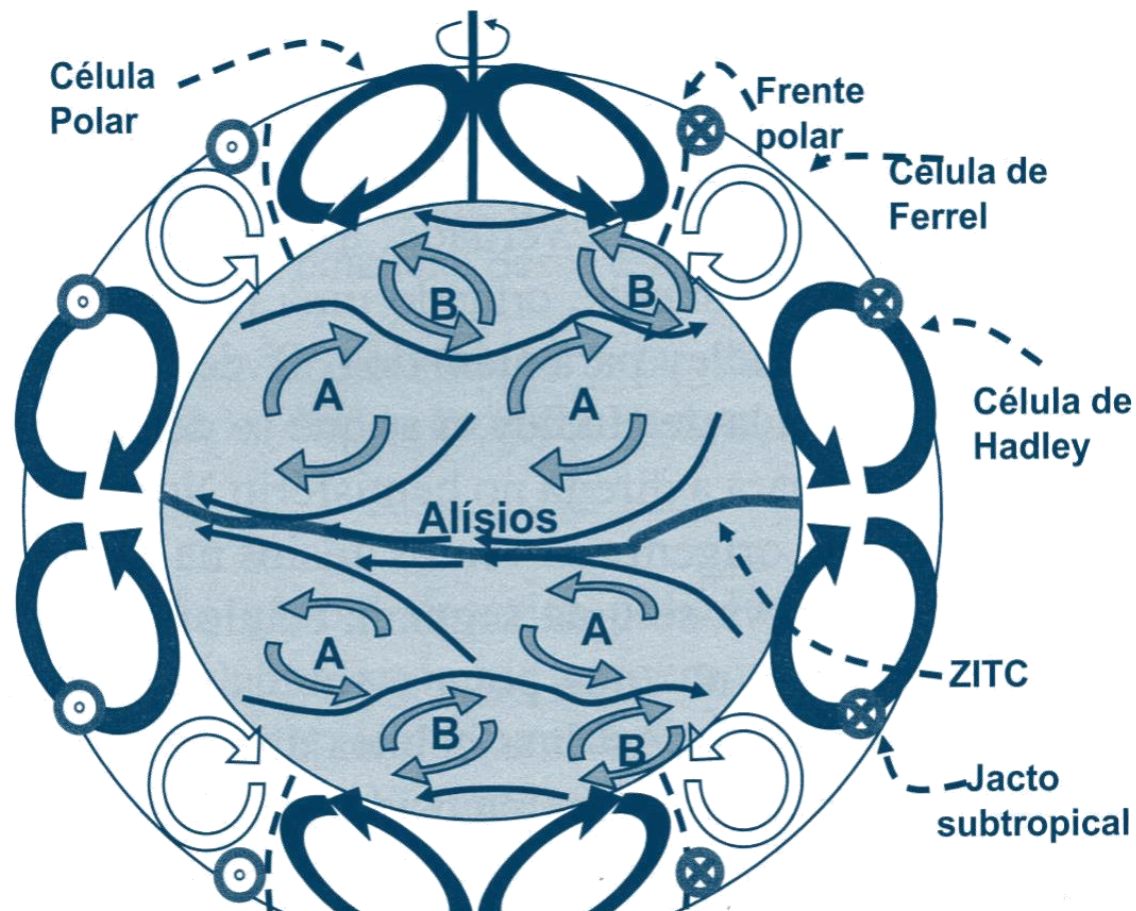
Zona de convergência em altitude e divergência à superfície na zona mais fria



Zona de divergência em altitude e convergência à superfície na zona mais quente

Recurso eólico

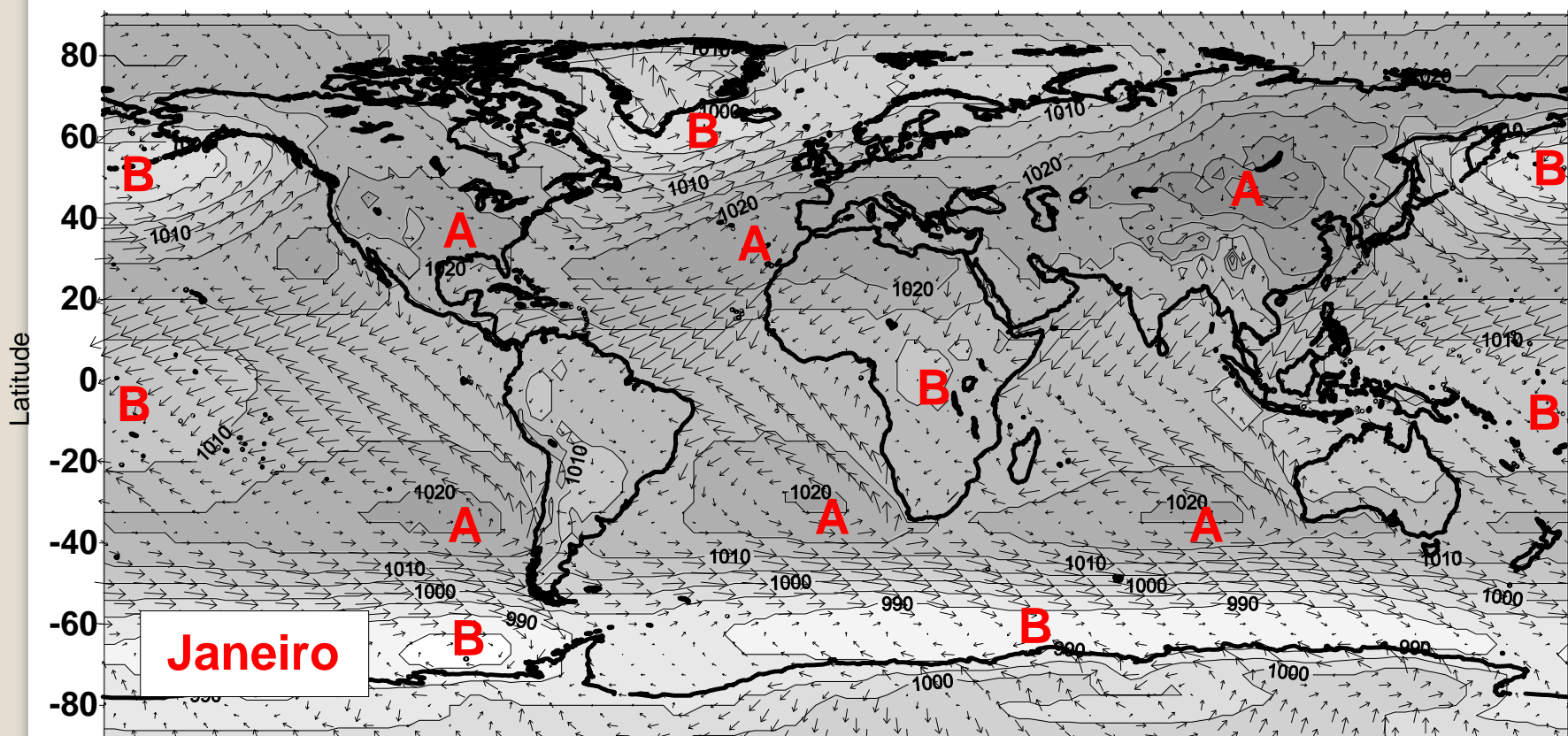
Com rotação da Terra – efeito da força de Coriolis



Embora a “excitação” seja na direcção NS, as principais componentes do vento resultante são na direcção EW.

Recurso eólico

Efeito da interacção continente-oceano



Localmente, ainda mais complexo. É pois absolutamente essencial proceder à medição do vento disponível num dado local antes de se avançar com a instalação.

Variação do vento médio com a altura

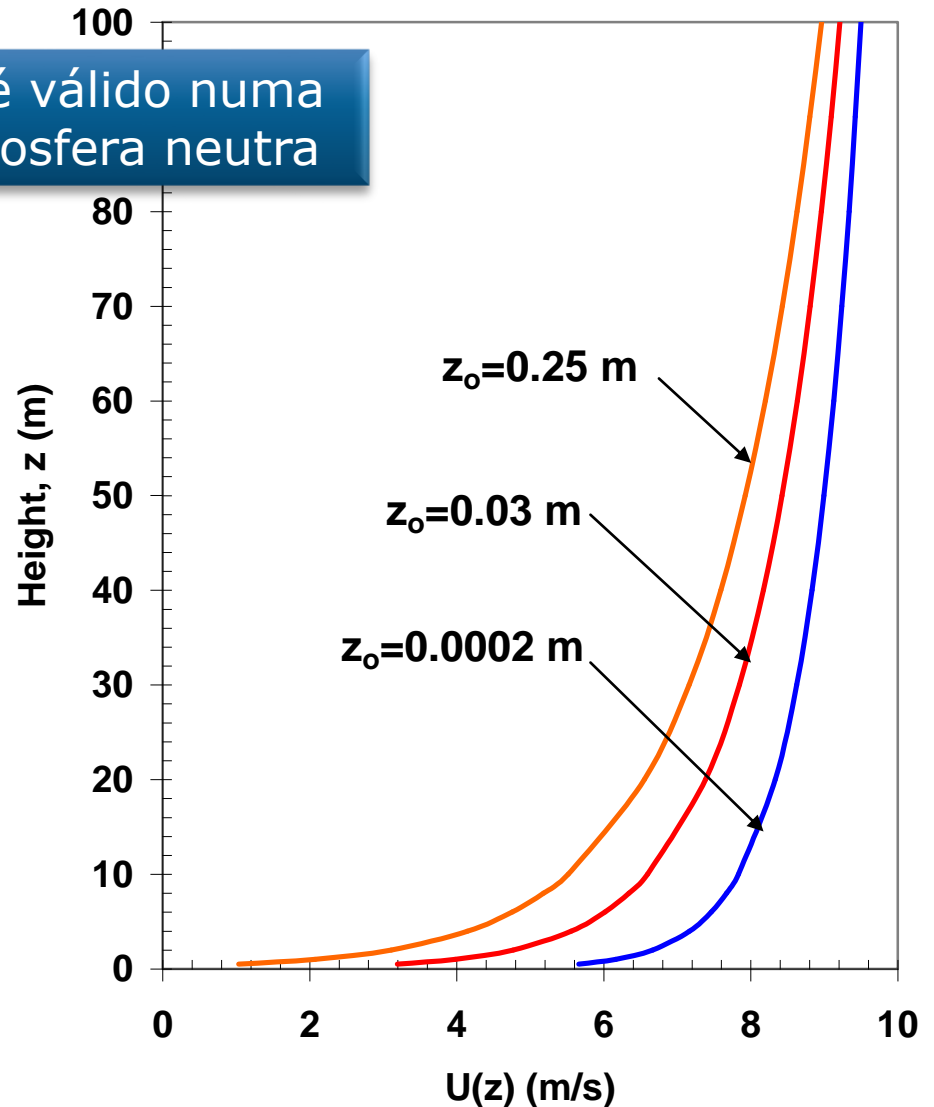
$$U(z) = \frac{U^*}{K} \log\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

Vento a >100-200m determinado por efeitos de larga escala.

Superfície retarda o vento localmente.

Superfície mais *rugosa* tem um maior alcance na perturbação local do vento.

Só é válido numa atmosfera neutra



Variação do vento médio com a altura

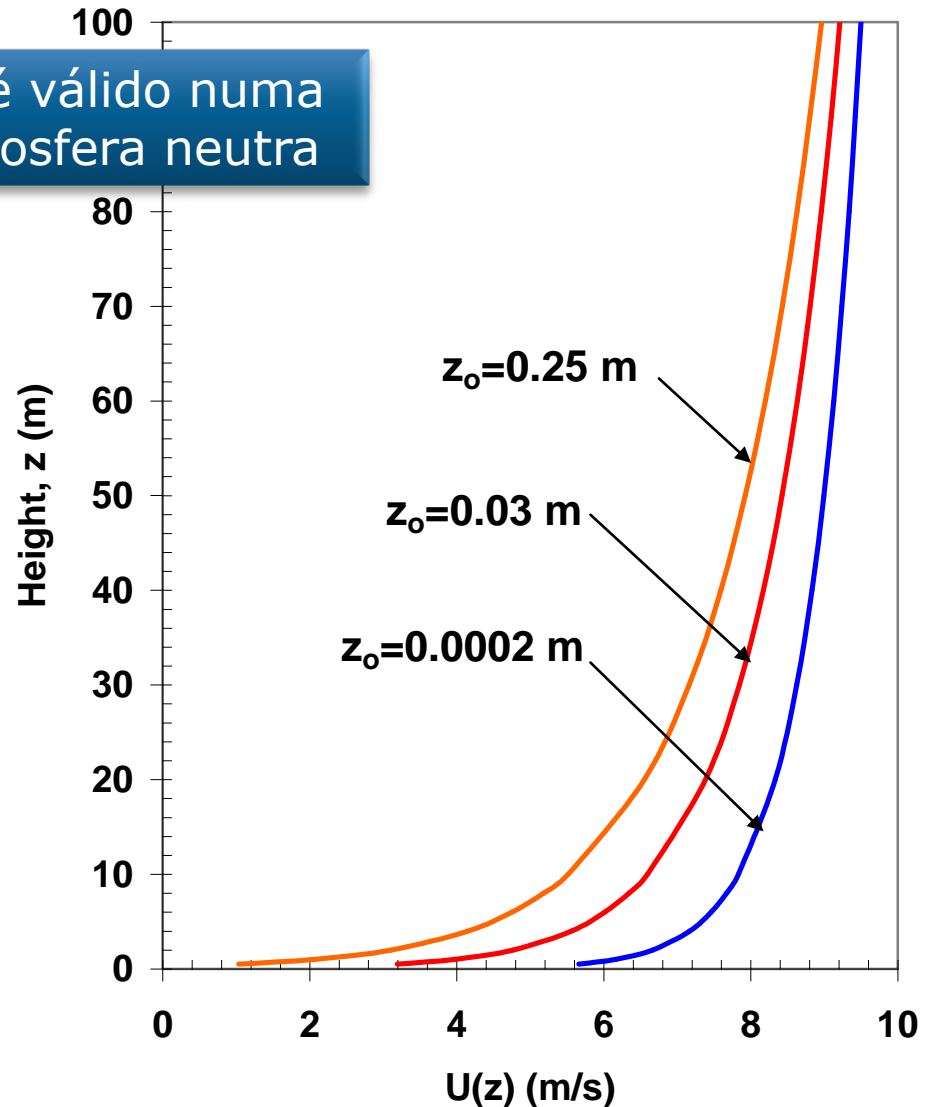
$$U(z) = \frac{U^*}{K} \log\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

Só é válido numa atmosfera neutra

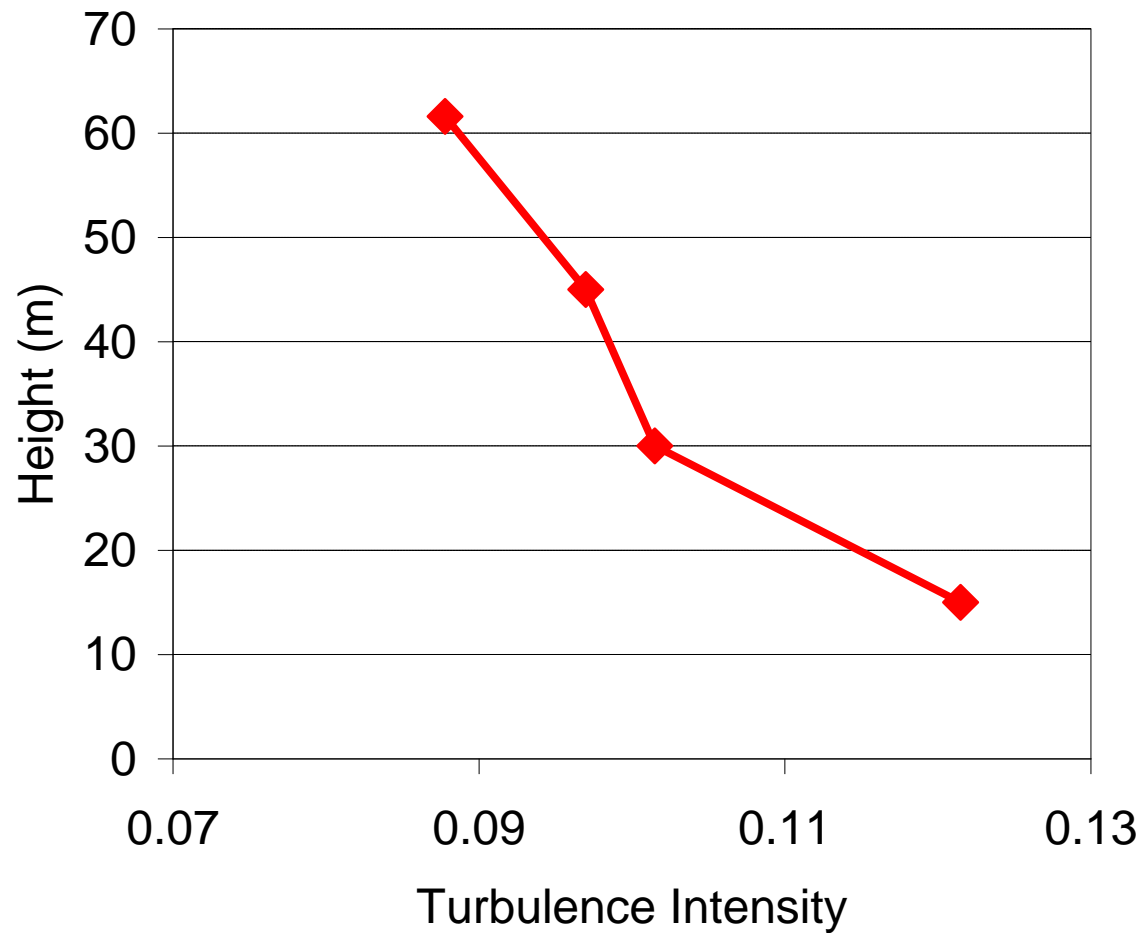
Solução empírica:

$$\frac{U_h}{U_{ref}} = \left(\frac{h}{h_{ref}}\right)^n$$

com $n = 0.15 - 0.16$



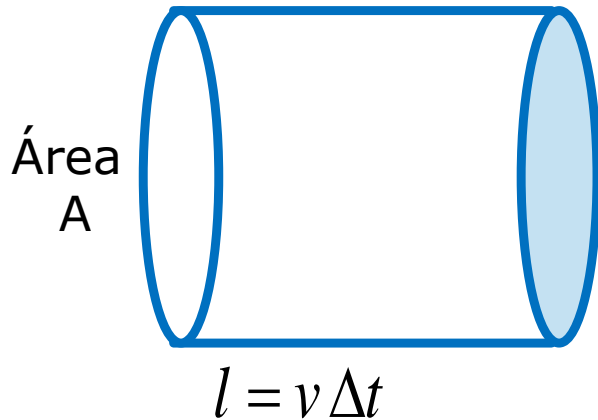
Variação do vento médio com a altura



intensidade de turbulência =

= desvio padrão da velocidade do vento / velocidade média

Quanta é a energia do vento



Energia cinética

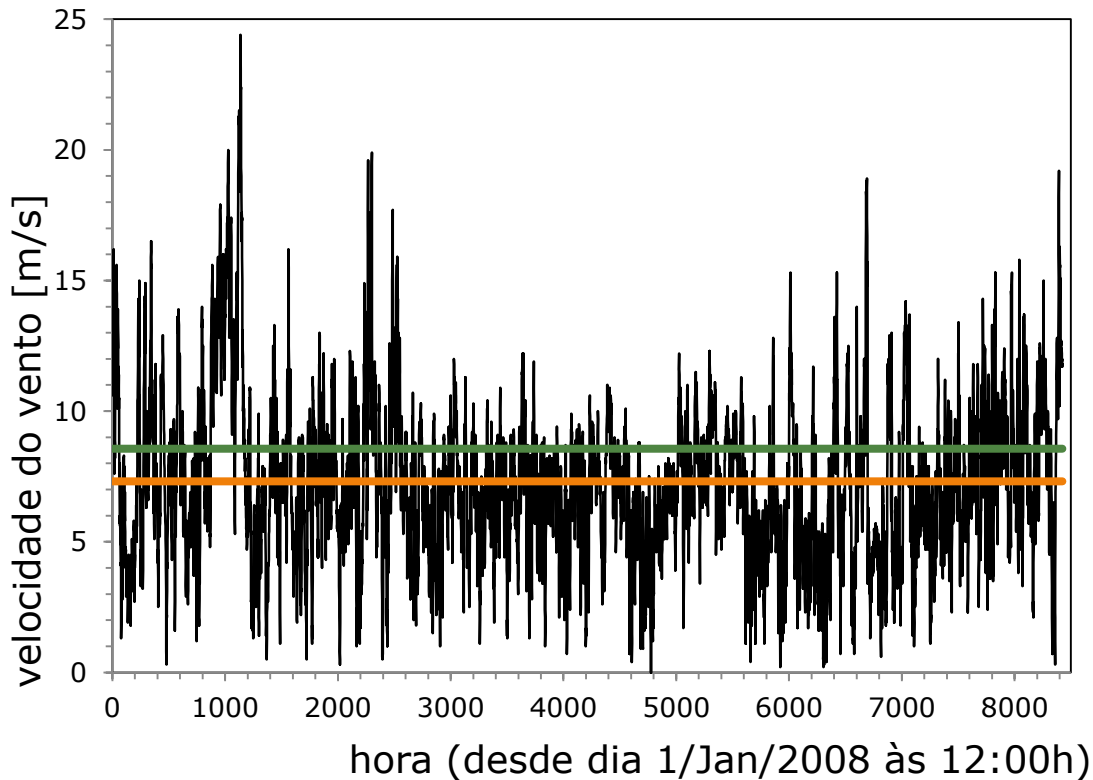
$$E = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} (\rho A v \Delta t) v^2 = \frac{1}{2} \rho A \Delta t v^3$$

Potência

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

Não basta saber a velocidade média do vento mas a sua distribuição

Quanta é a energia do vento



Velocidade

$$\sqrt[3]{\langle v^3 \rangle} = 8.6 \text{ m/s}$$

+17%

Velocidade

$$\langle v \rangle = 7.3 \text{ m/s}$$

Potência

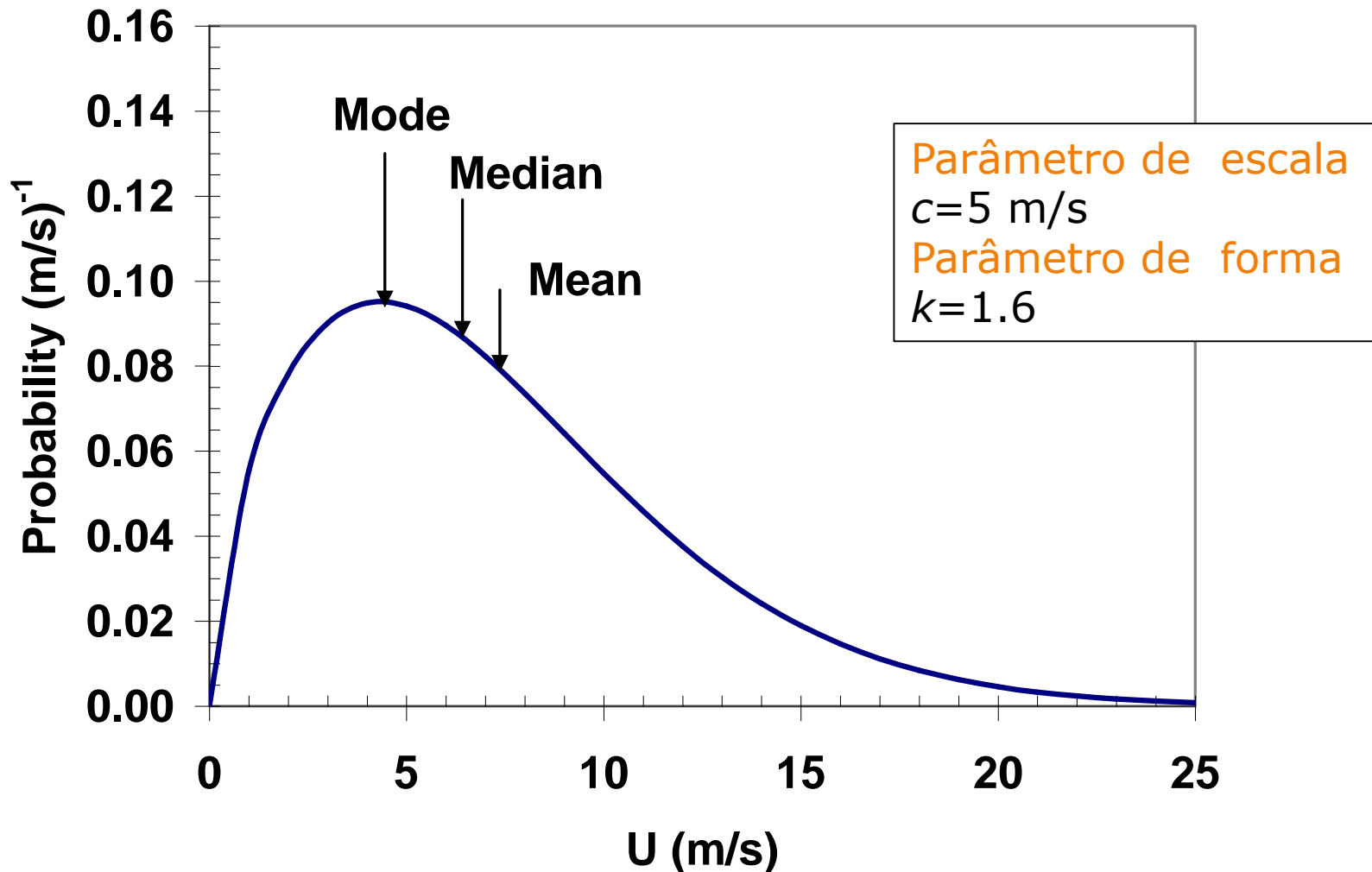
$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

Não basta saber a velocidade média do vento mas a sua distribuição

Distribuição da velocidade do vento

Distribuição de Weibull

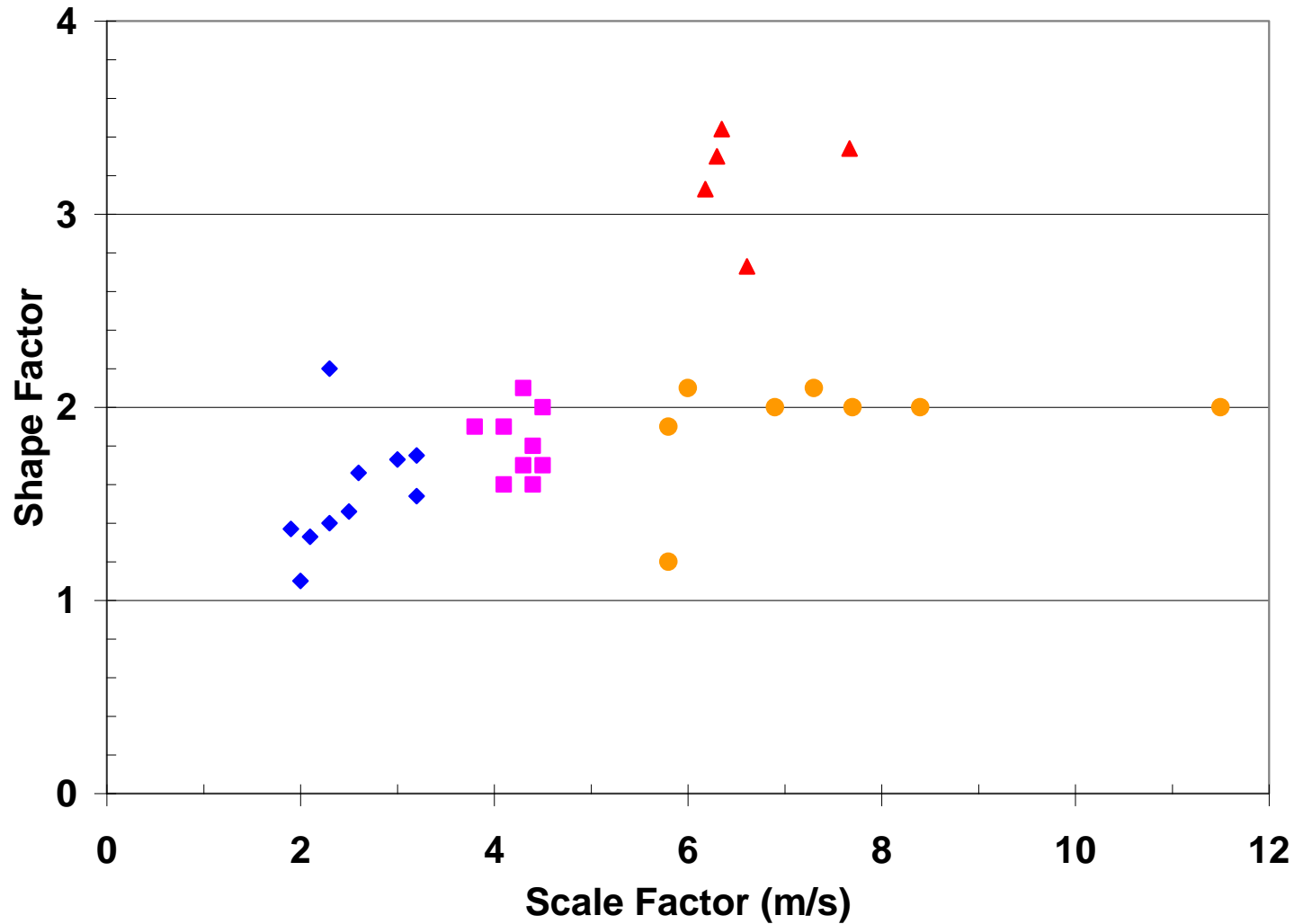
$$f(u) = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c} \right)^{k-1} e^{-(u/c)^k}$$



Distribuição da velocidade do vento

Distribuição de Weibull

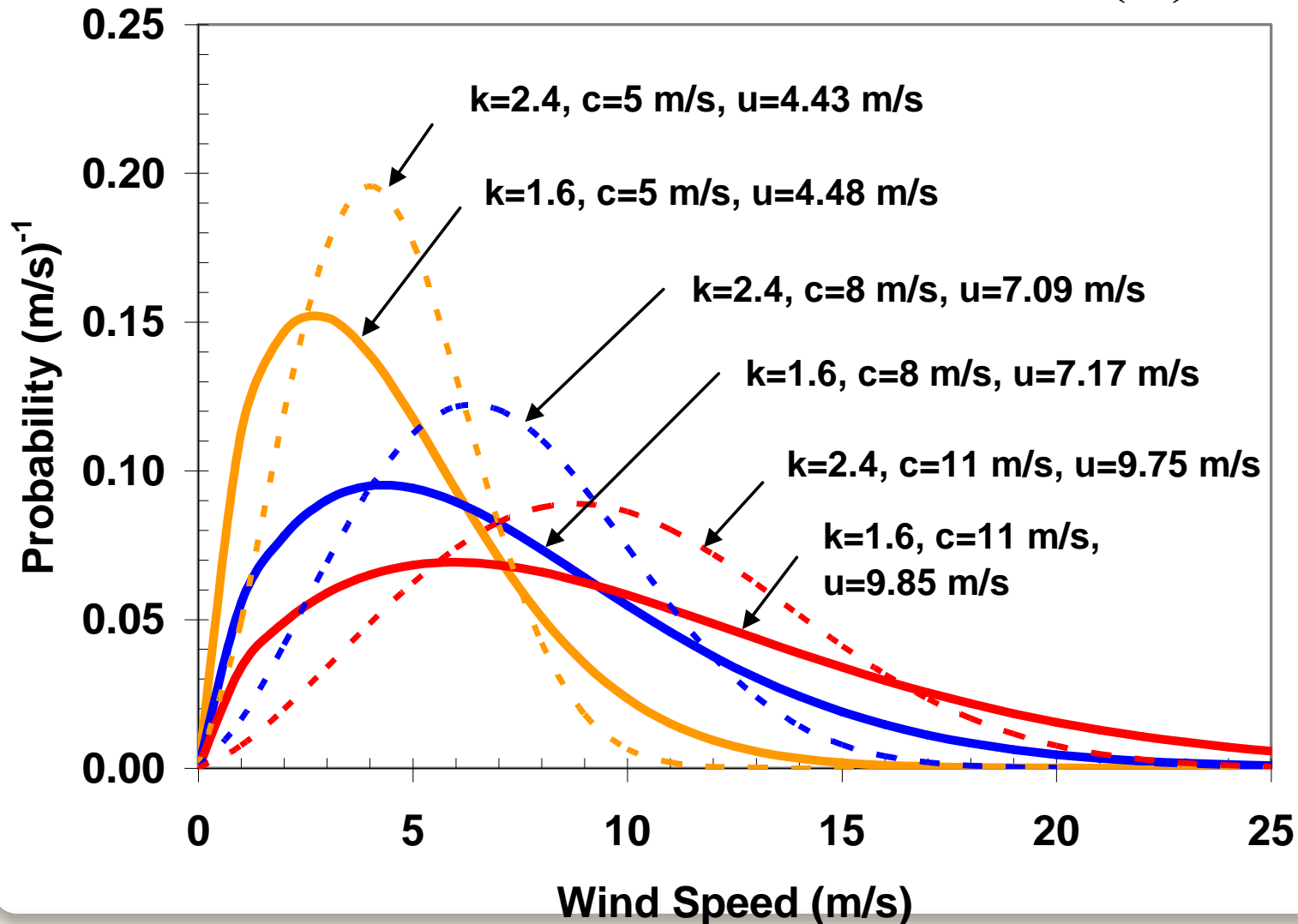
$$f(u) = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c} \right)^{k-1} e^{-(u/c)^k}$$



Distribuição da velocidade do vento

Distribuição de Weibull

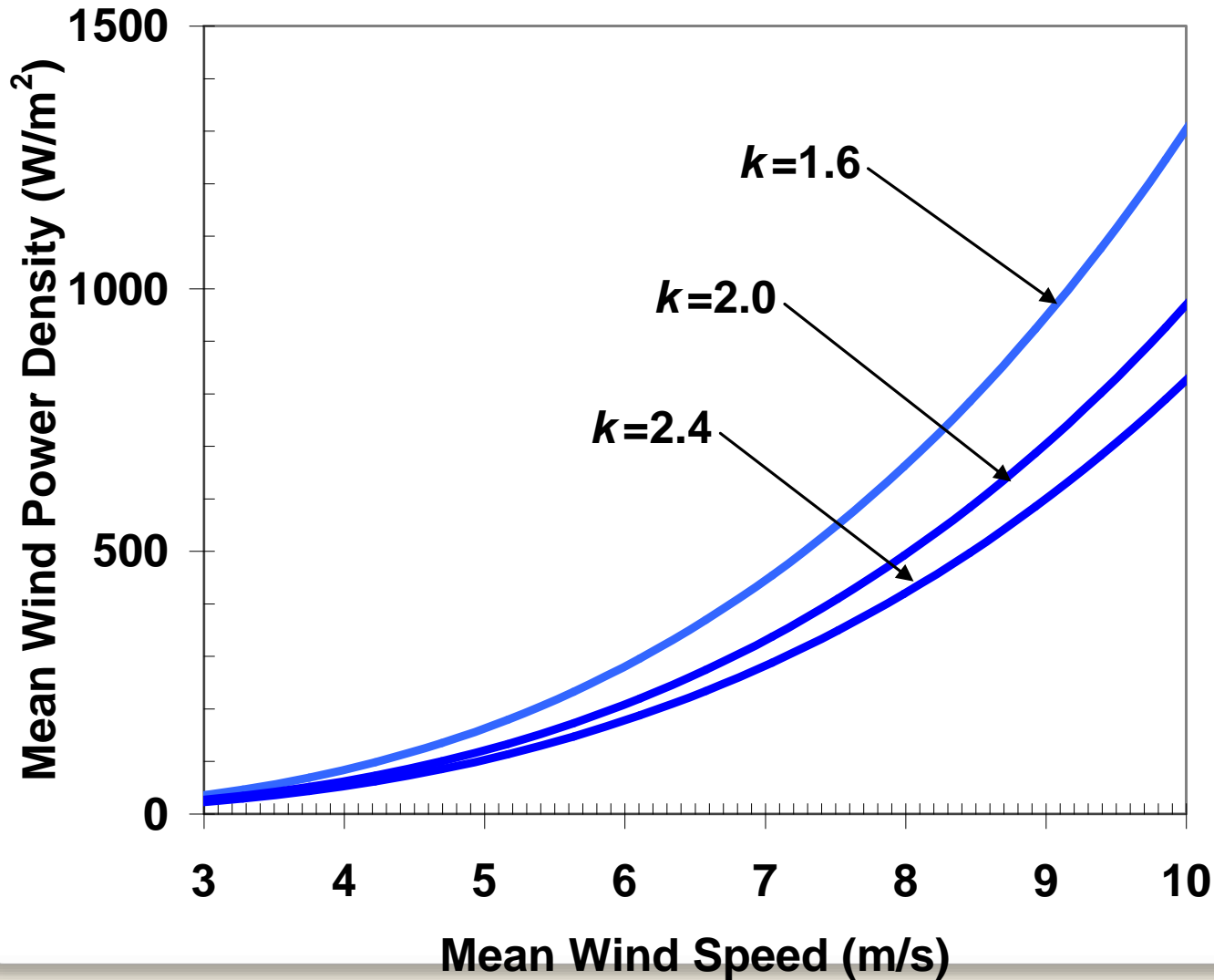
$$f(u) = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c} \right)^{k-1} e^{-(u/c)^k}$$



Distribuição da velocidade do vento

Distribuição de Weibull

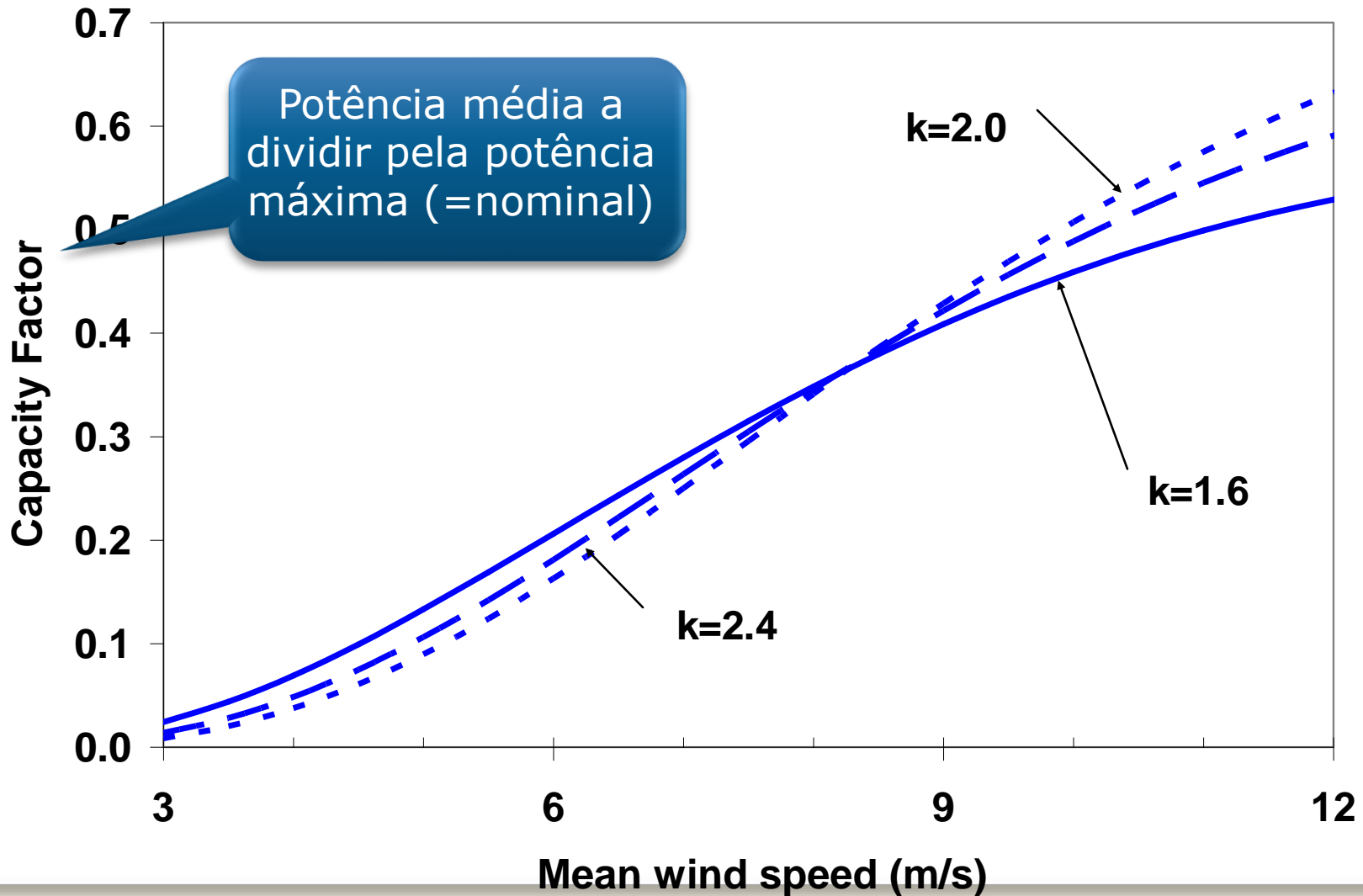
$$f(u) = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c} \right)^{k-1} e^{-(u/c)^k}$$



Distribuição da velocidade do vento

Distribuição de Weibull

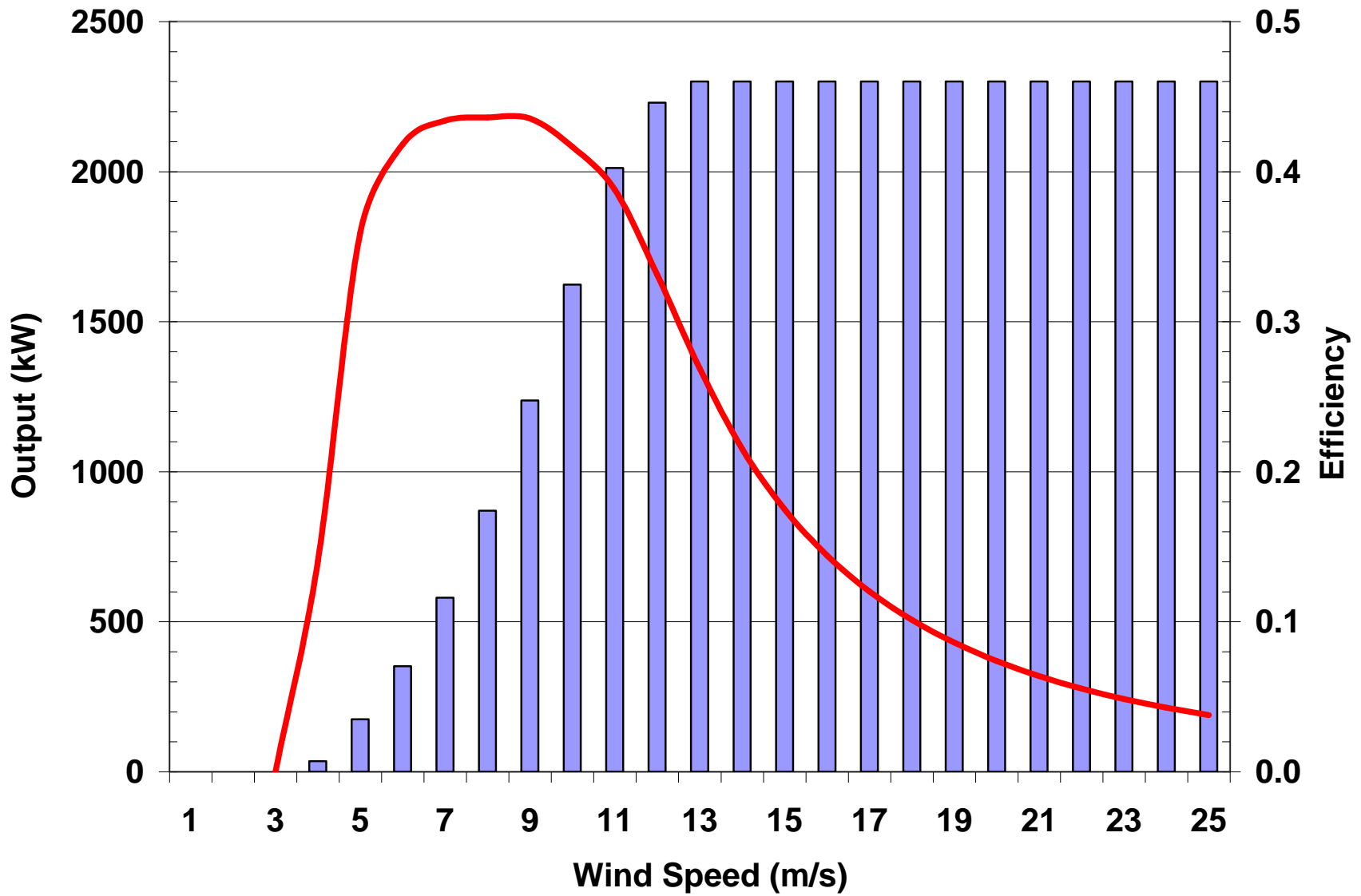
$$f(u) = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c} \right)^{k-1} e^{-(u/c)^k}$$



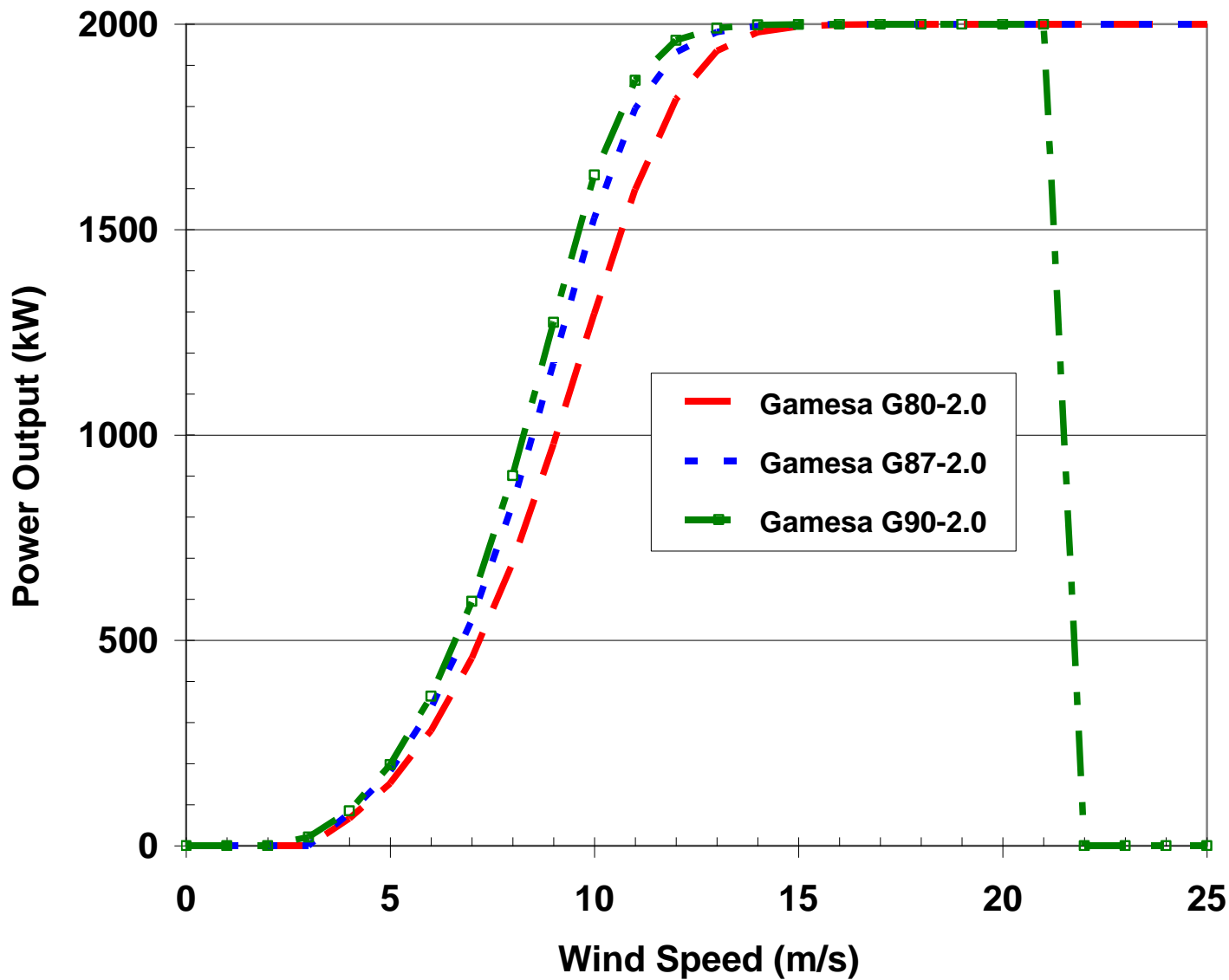
Factor de capacidade:

Potência média a dividir pela
potência máxima (=nominal)

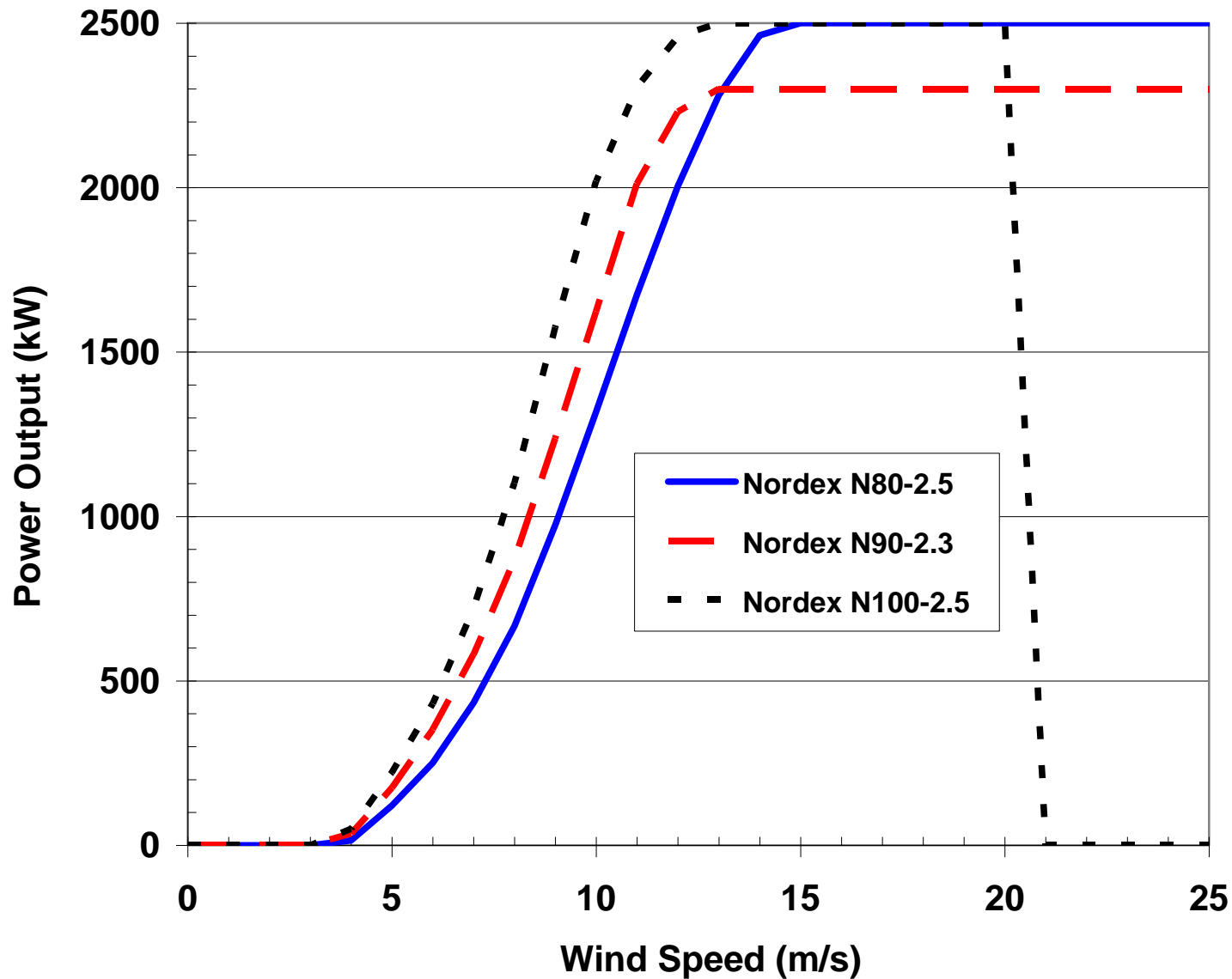
País	Factor de capacidade
Reino Unido	0.32
Grécia	0.29
Dinamarca	0.26
Espanha	0.24
Holanda	0.24
China	0.24
Suécia	0.24
Itália	0.23
Alemanha	0.21
India	0.20



Eficiência diminui com velocidade de vento porque limitada à potência nominal



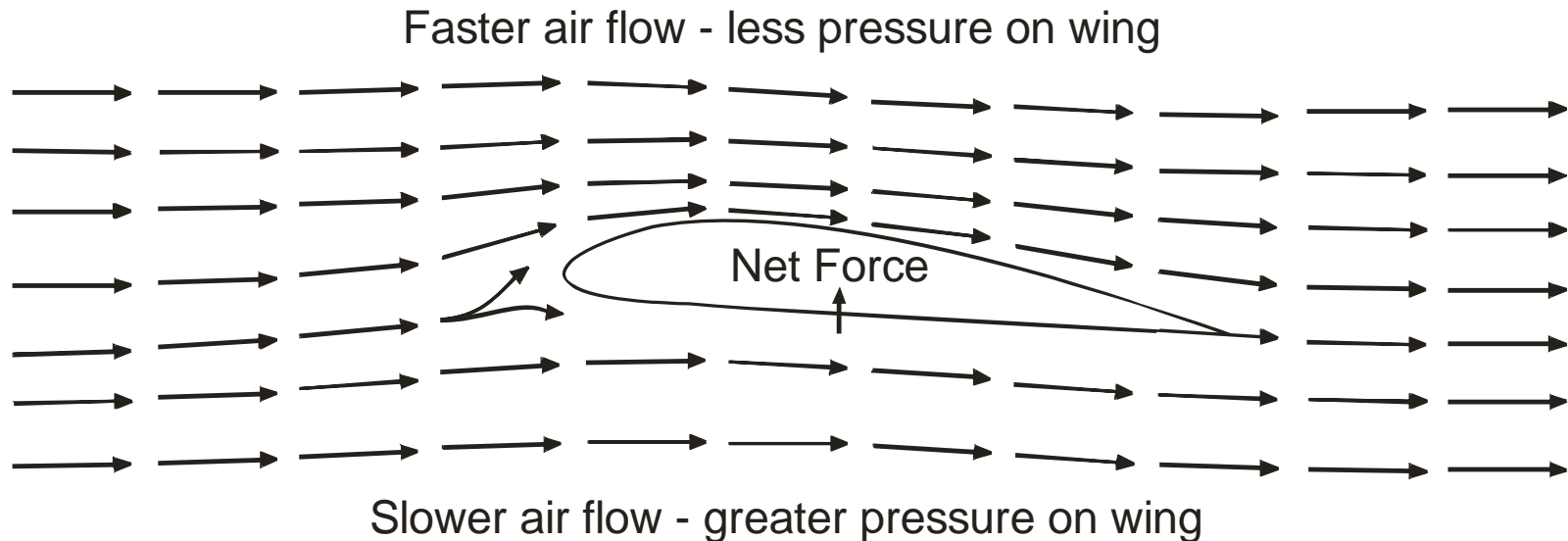
Curvas de potência para diferentes diâmetros de rotor



Curvas de potência para diferentes diâmetros de rotor e geradores

Qual a eficiência de uma turbina eólica

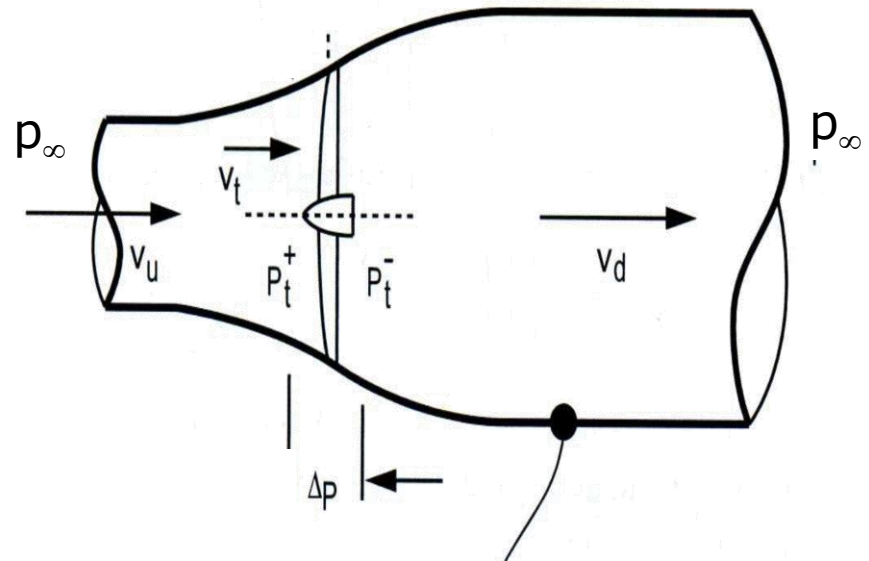
A pá de uma turbina funciona como uma asa de avião. O mecanismo é baseado na diferença de pressões nas duas faces da pá e não na força!



Qual a eficiência de uma turbina eólica

Ao longo de uma linha de corrente correspondente ao escoamento permanente de um fluido com viscosidade nula e massa volúmica constante, é válida a relação de **Bernoulli** (equação de conservação da energia mecânica transportada pelo fluido)

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{constante}$$

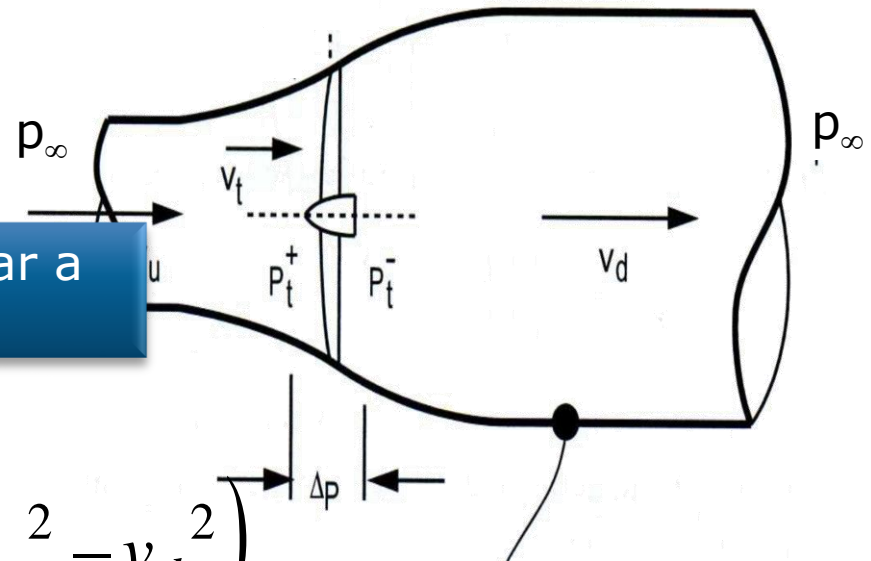


Qual a eficiência de uma turbina eólica

Trabalho realizado na turbina

$$W_t = (p_t^+ - p_t^-) \Phi :$$

Preciso de aprender a determinar a velocidade do fluido na turbina



e portanto

$$p_t^+ - p_t^- = \frac{1}{2} \rho (v_u^2 - v_d^2)$$

Qual a eficiência de uma turbina eólica

Conservação de massa

$$V_u = V_t = V_d$$

$$A_u v_u \Delta t = A_t v_t \Delta t = A_d v_d \Delta t$$

$$A_u = A_t \frac{v_t}{v_u}$$

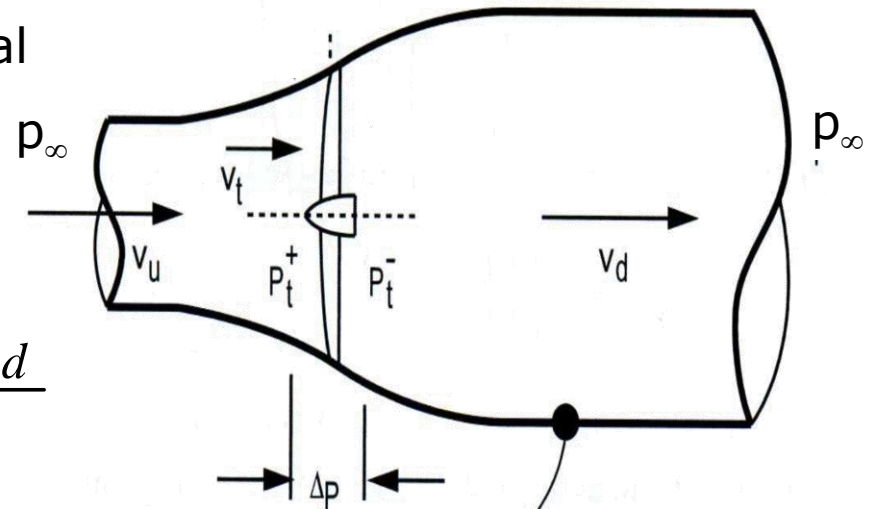
e portanto

$$A_d = A_t \frac{v_t}{v_d}$$

Conservação de momento linear

(a força aplicada na turbina é igual à variação do momento linear transportado pelo fluido por unidade de tempo)

$$\begin{aligned} (p_t^+ - p_t^-) A_t &= \frac{\rho V_u v_u}{\Delta t} - \frac{\rho V_d v_d}{\Delta t} \\ &= \frac{\rho A_u v_u \Delta t v_u}{\Delta t} - \frac{\rho A_d v_d \Delta t v_d}{\Delta t} = \rho (A_u v_u^2 - A_d v_d^2) \end{aligned}$$



Qual a eficiência de uma turbina eólica

Conservação de massa

$$V_u = V_t = V_d$$

$$A_u v_u \Delta t = A_t v_t \Delta t = A_d v_d \Delta t$$

$$A_u = A_t \frac{v_t}{v_u}$$

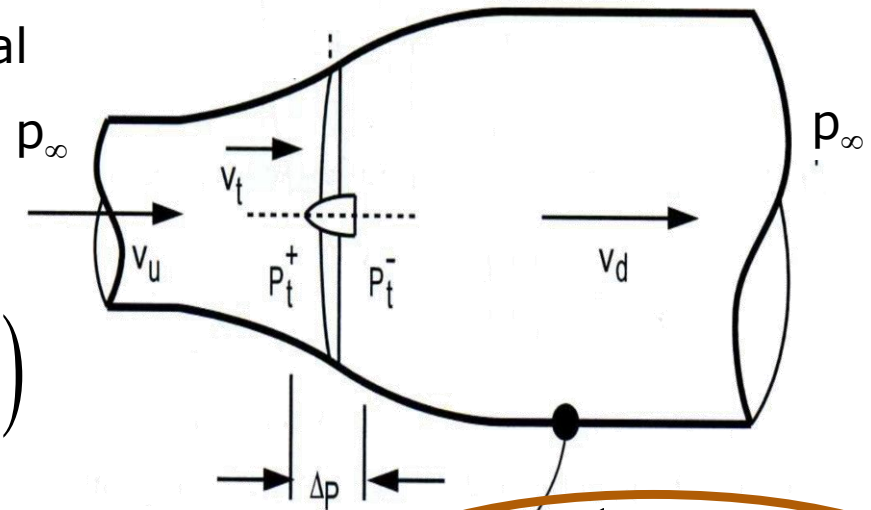
$$A_d = A_t \frac{v_t}{v_d}$$

Conservação de momento linear

(a força aplicada na turbina é igual à variação do momento linear transportado pelo fluido por unidade de tempo)

$$\begin{aligned} (p_t^+ - p_t^-) A_t &= \rho (A_u v_u^2 - A_d v_d^2) \\ &= \rho A_t v_t (v_u - v_d) \end{aligned}$$

$$(p_t^+ - p_t^-) = \rho v_t (v_u - v_d)$$

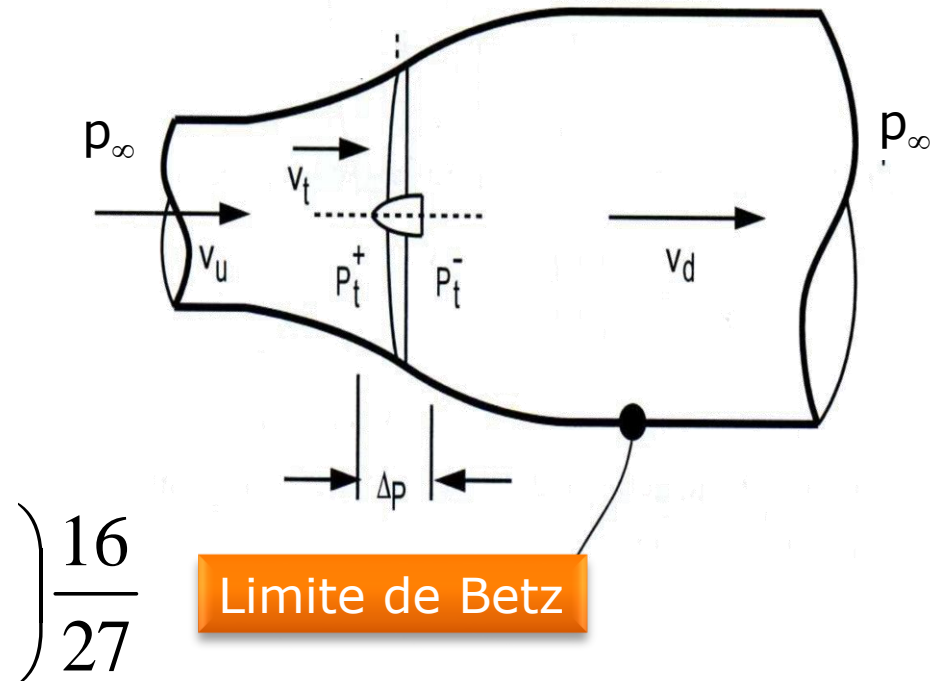


$$v_t = \frac{1}{2} (v_u + v_d)$$

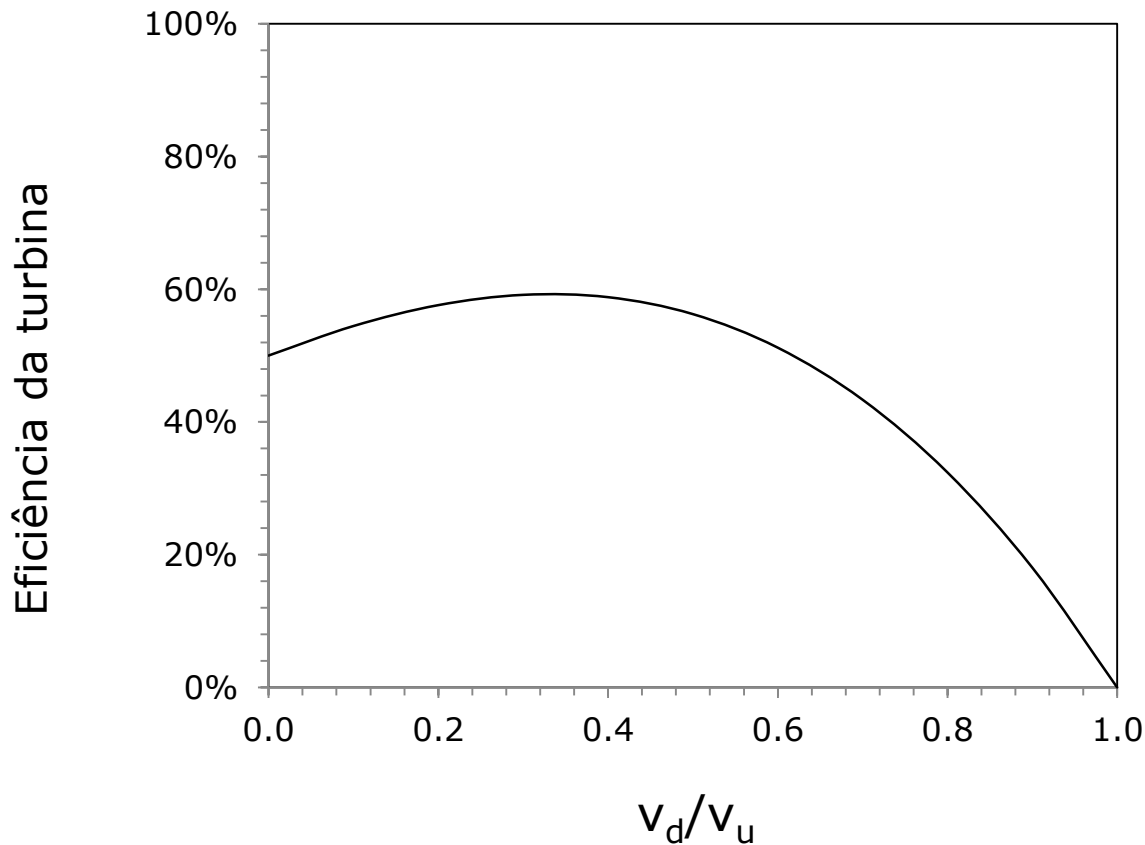
Qual a eficiência de uma turbina eólica

Trabalho realizado na turbina

$$W_t = \frac{1}{2} A \rho (v_u^2 - v_d^2) v_t = \frac{1}{4} A \rho (v_u^2 - v_d^2) (v_u + v_d)$$



Qual a eficiência de uma turbina eólica



$$\rightarrow W_t = \left(\frac{1}{2} A \rho v_u^3 \right) \frac{16}{27}$$

Limite de Betz

Qual a eficiência de uma turbina eólica

Eficiência total

= eficiências aerodinâmica x mecânica x eléctrica

= 60% (Betz) x 96-99% x 96-99%

= 44% (valor pico) x 96-99% x 96-99%

= 25% (valor médio) x 96-99% x 96-99%

Qual a densidade de energia de uma parque eólico



Efeito esteira – umas turbinas interferem com as outras

Qual a densidade de energia de uma parque eólico

Considerando 5 diâmetros de folga entre turbinas cada turbina ocupa $25 D^2$

Efeito esteira – umas turbinas interferem com as outras

Qual a densidade de energia de uma parque eólico

$$\frac{P}{A} = \frac{\left(\frac{1}{2} A \rho v_u^3\right) \frac{16}{27}}{25 D^2} = A \frac{\left(\frac{1}{2} \rho v_u^3\right) \frac{16}{27}}{25 D^2}$$

$$= \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \frac{\left(\frac{1}{2} \rho v_u^3\right) \frac{16}{27}}{25 D^2} = \frac{2\pi \rho v_u^3}{27 \times 25}$$

Assumindo

$$\begin{cases} \rho = 1.3 \text{ kg/m}^3 \\ v_u = 6 \text{ m/s} \end{cases} \rightarrow \frac{P}{A} = 2.6 \text{ W/m}^2$$

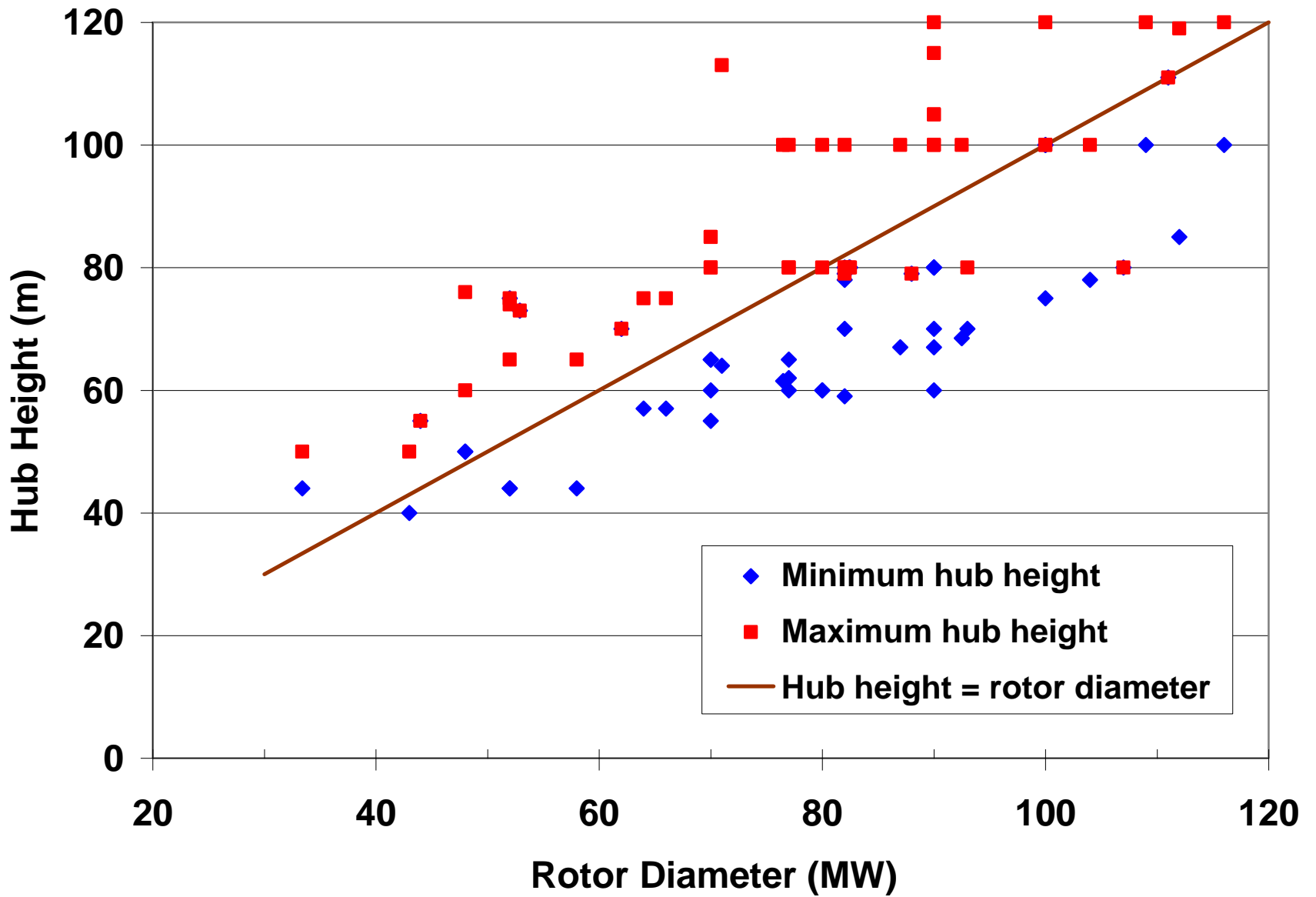
Qual a densidade de energia de uma parque eólico



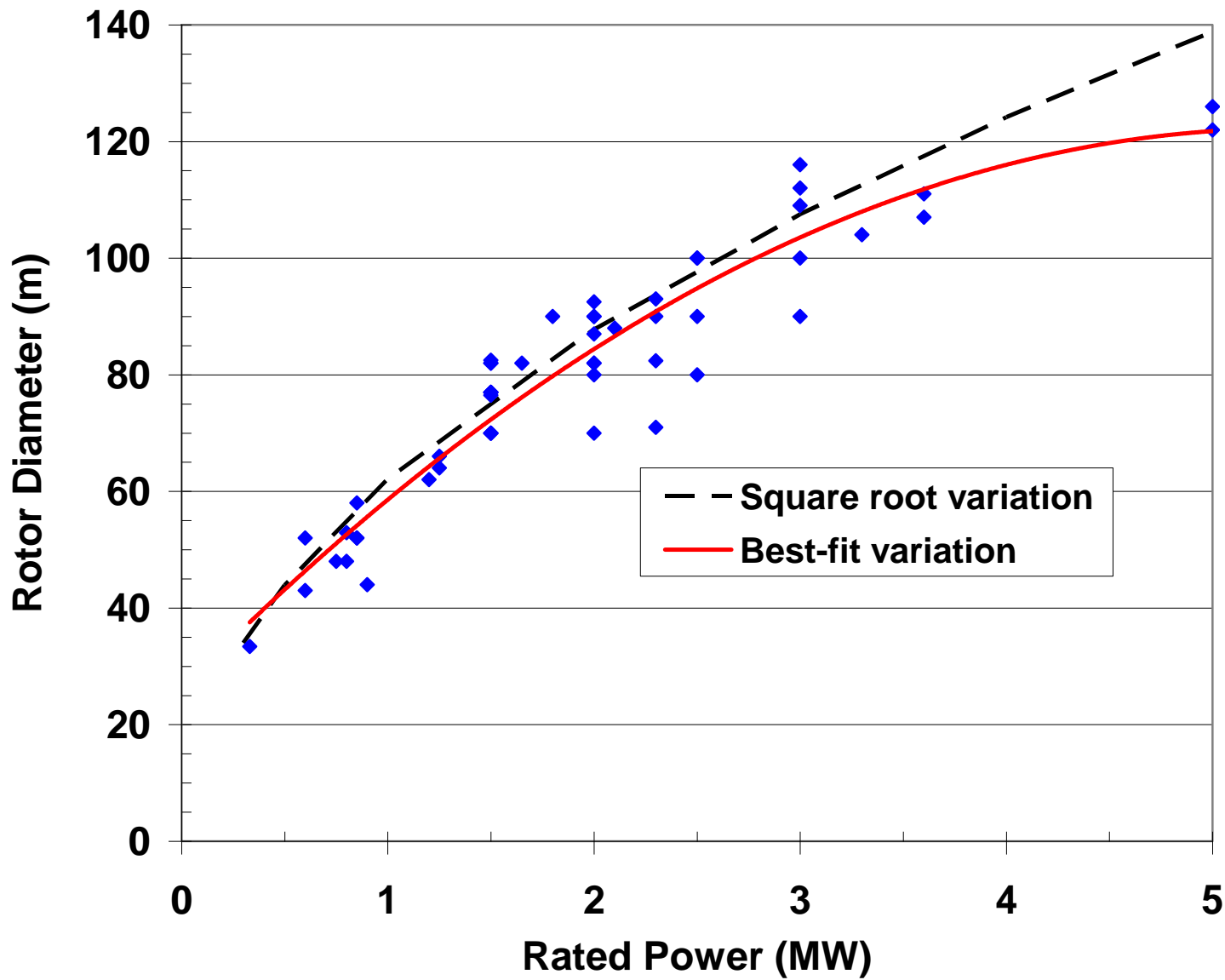
Assumindo

$$\begin{cases} \rho = 1.3 \text{ kg/m}^3 \\ v_u = 6 \text{ m/s} \end{cases} \rightarrow \frac{P}{A} = 2.6 \text{ W/m}^2$$

Mas a área ocupada não é de uso exclusivo pelas turbinas e pode ter outros usos.

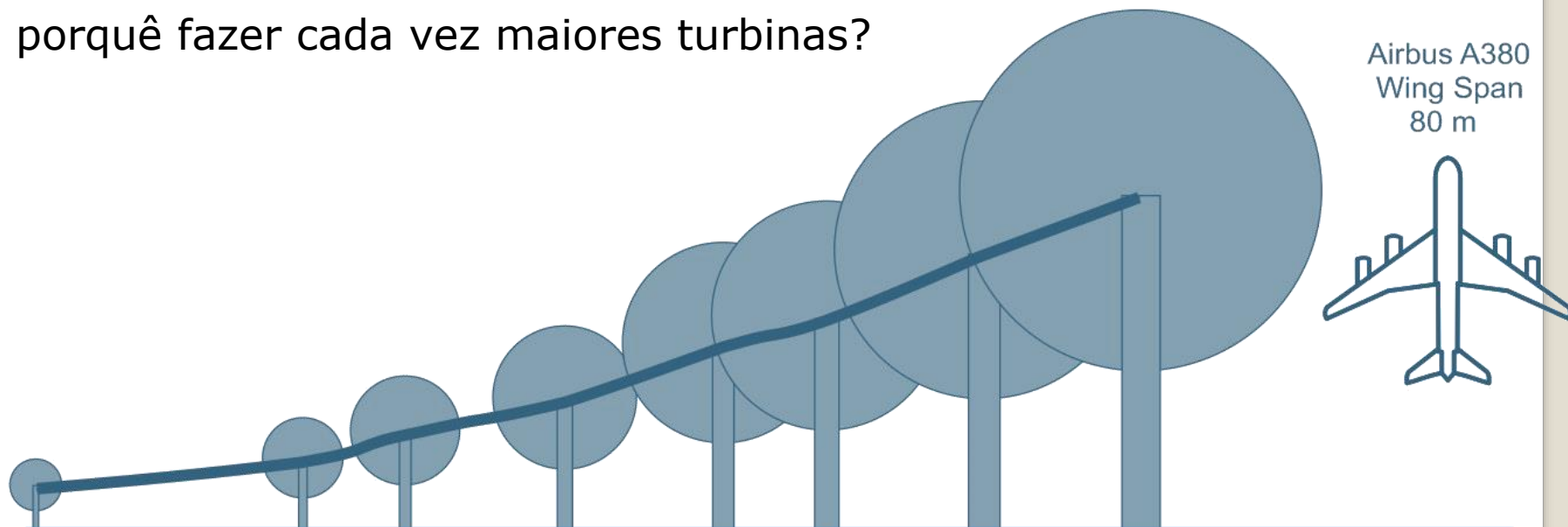


Altura da turbina parecida com o diâmetro do rotor



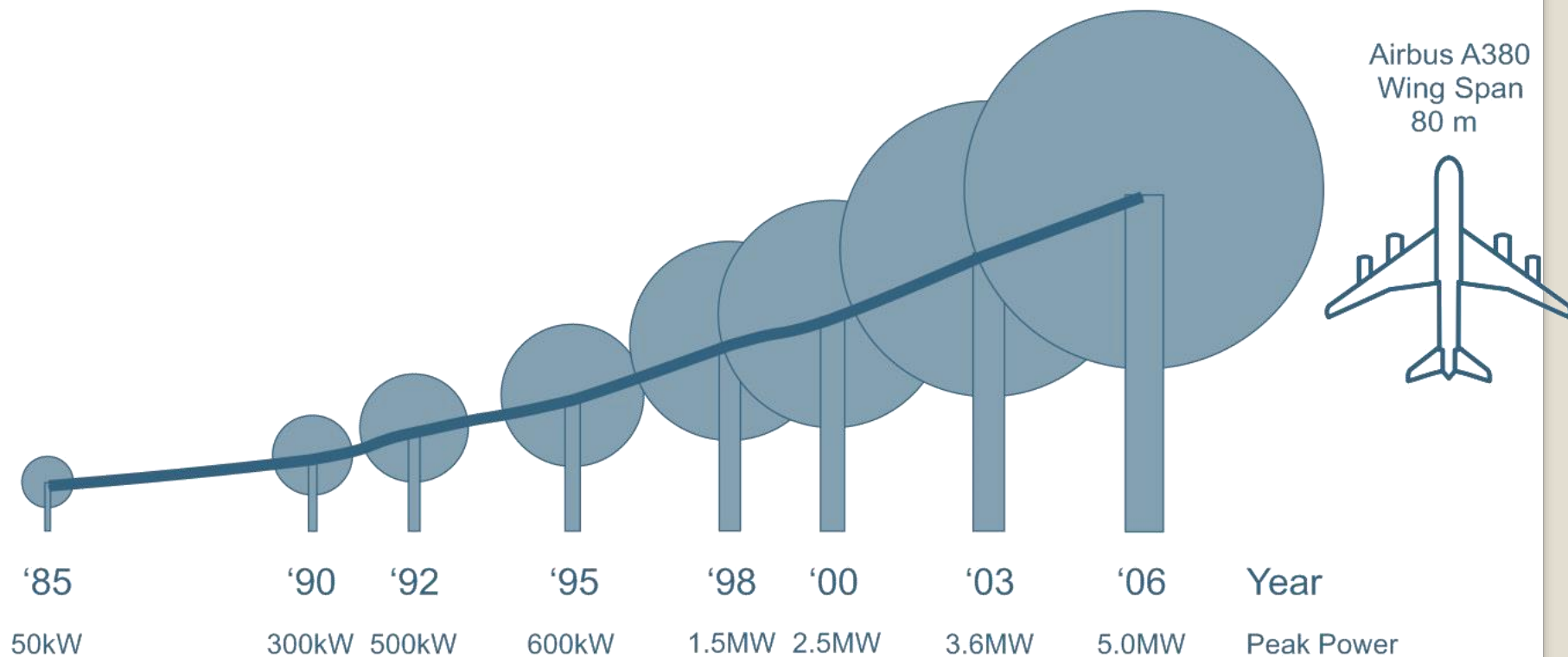
Quanto maior o diâmetro do rotor maior a potência nominal

Se a densidade de energia (kWh/m²) não depende da potência, porquê fazer cada vez maiores turbinas?

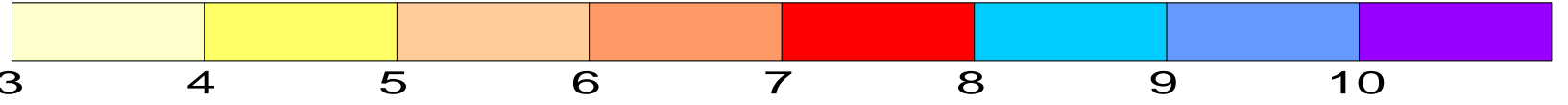
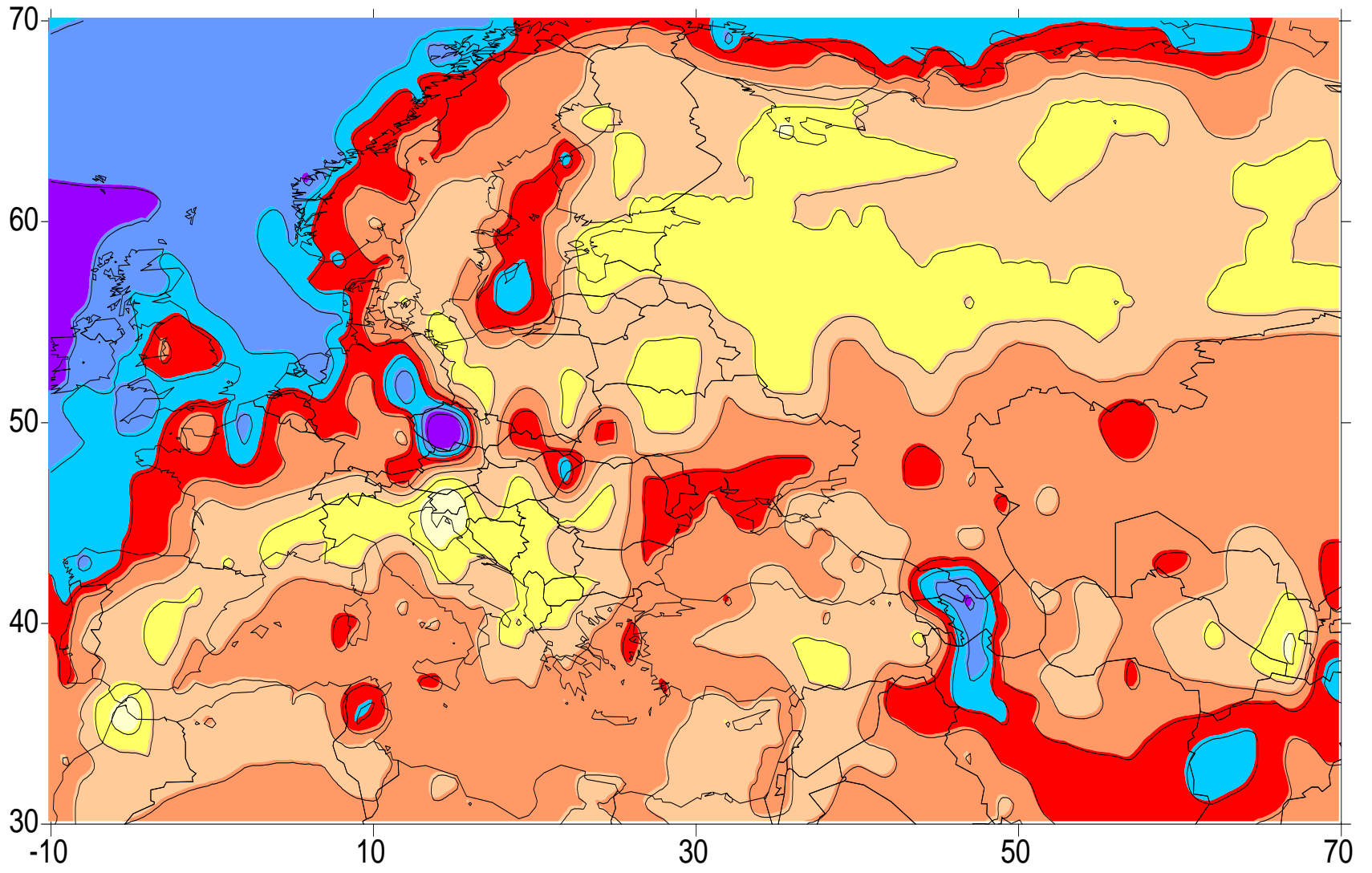


- Como a potência aumenta com v^3 e a velocidade média da vento aumenta com a altura, turbinas mais altas produzem mais do que turbinas menores
- A diferença entre vento no topo e fundo das pás é menor quanto mais alta a turbina
- A turbulência diminui com altura, e portanto distribuição de vento também é mais favorável.

Se quanto maior melhor, qual o limite para as dimensões das turbinas?



- 1
- Desafios logísticos: transporte de pás e torre; mesmo se fosse transportado em segmentos e montado no local, é preciso levar a grua...
 - Poucas turbinas maiores introduzem mais flutuações na rede do que muitas turbinas pequenas



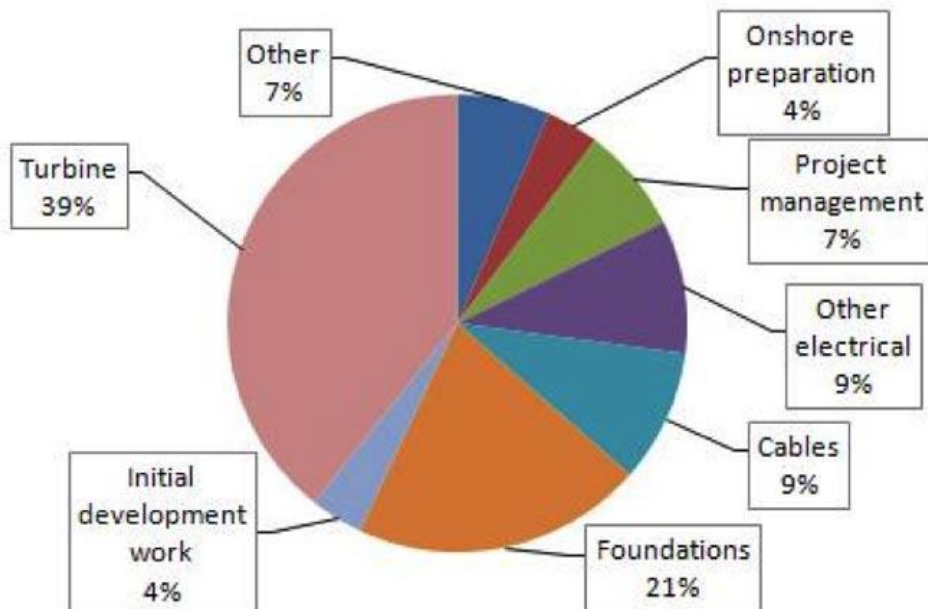
Wind speed (m/s) @ 100m

Parques eólicos *offshore*

- custos mais elevados (2-3x)
- maior produção de electricidade (2x)
- maior factor de capacidade

40-50% em vez de 20-25%

Typical offshore wind energy project costs



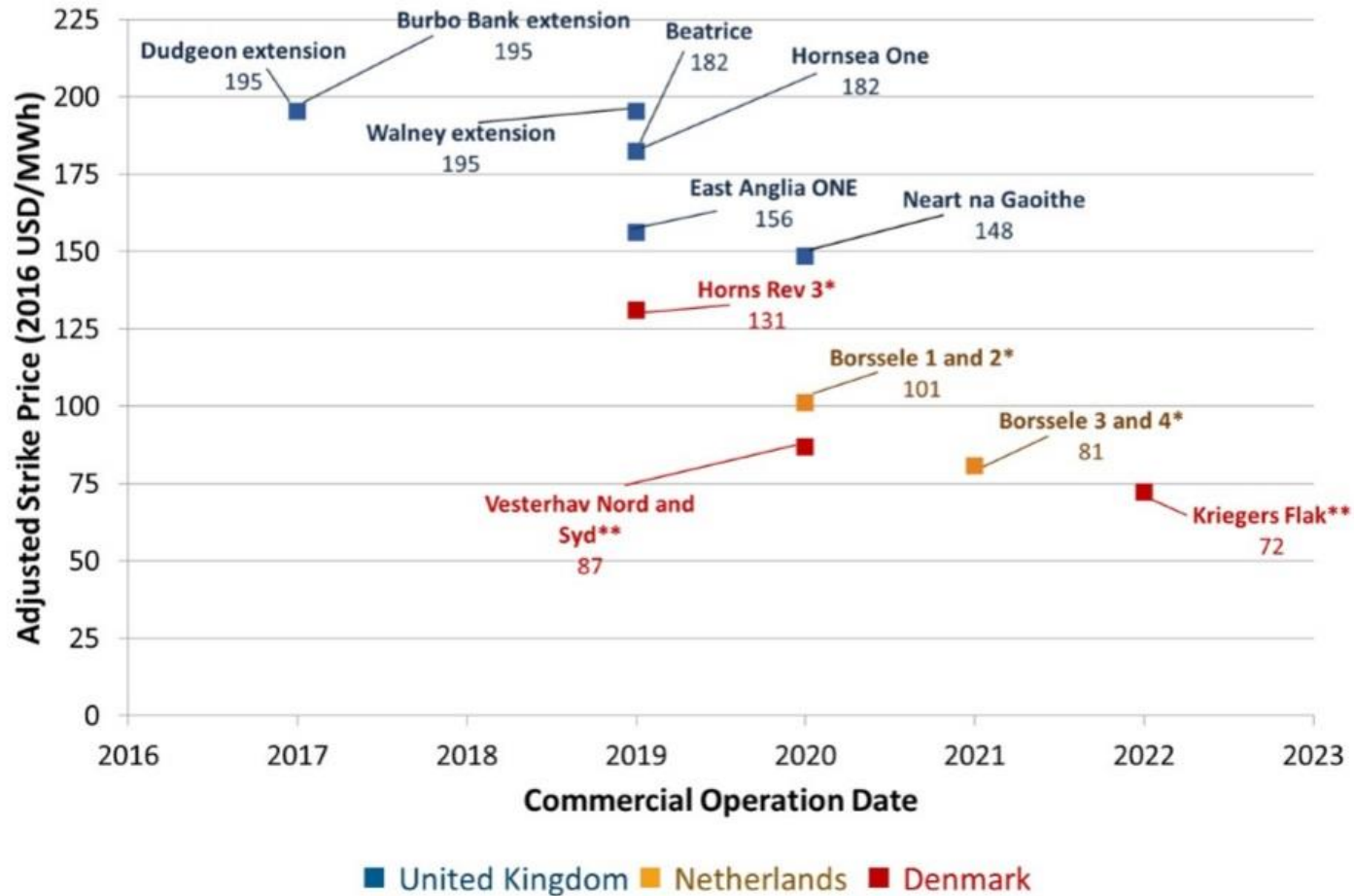
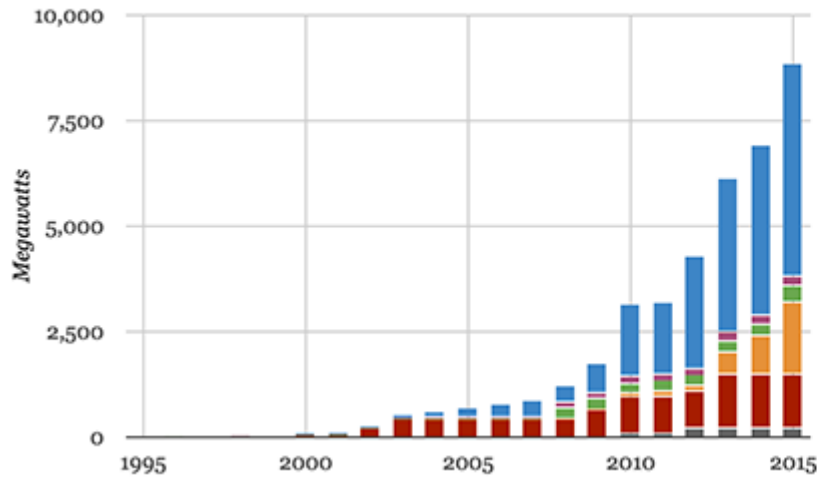
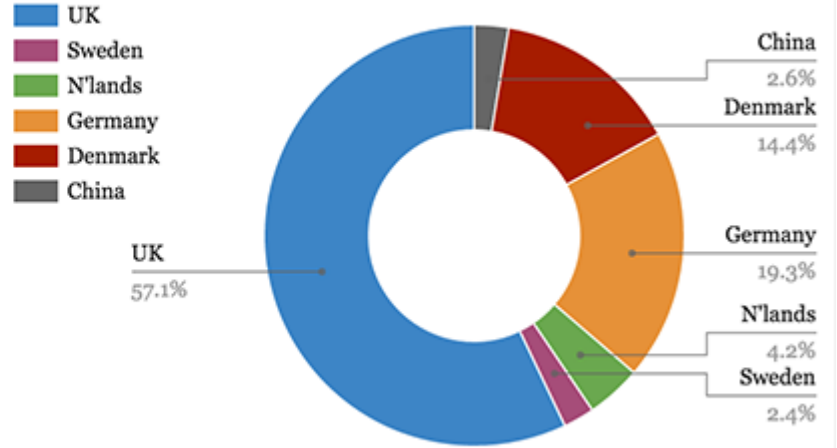


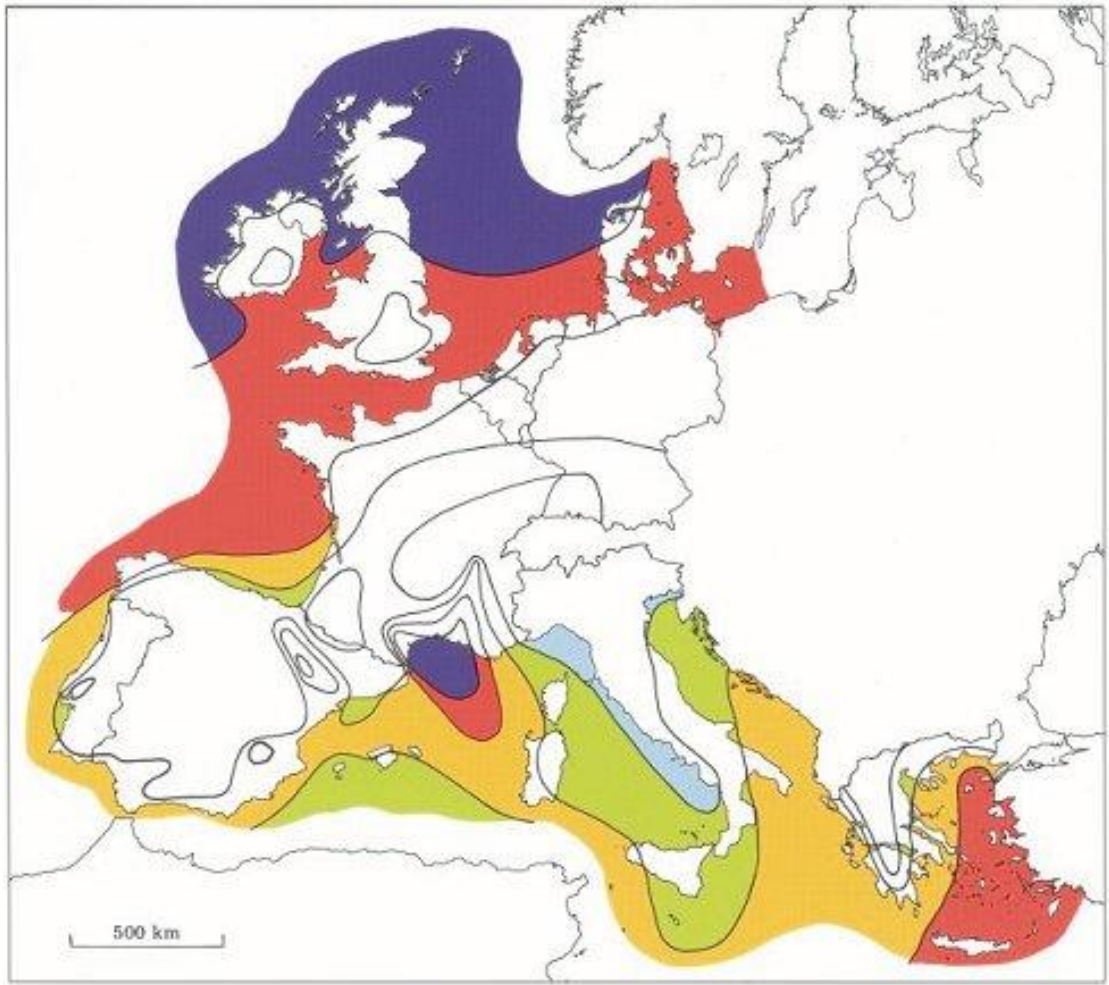
Figure 1. Recent strike prices of European offshore wind winning tenders adjusted to U.S. dollars, with grid cost, development cost, and contract length adders

Cumulative offshore wind capacity



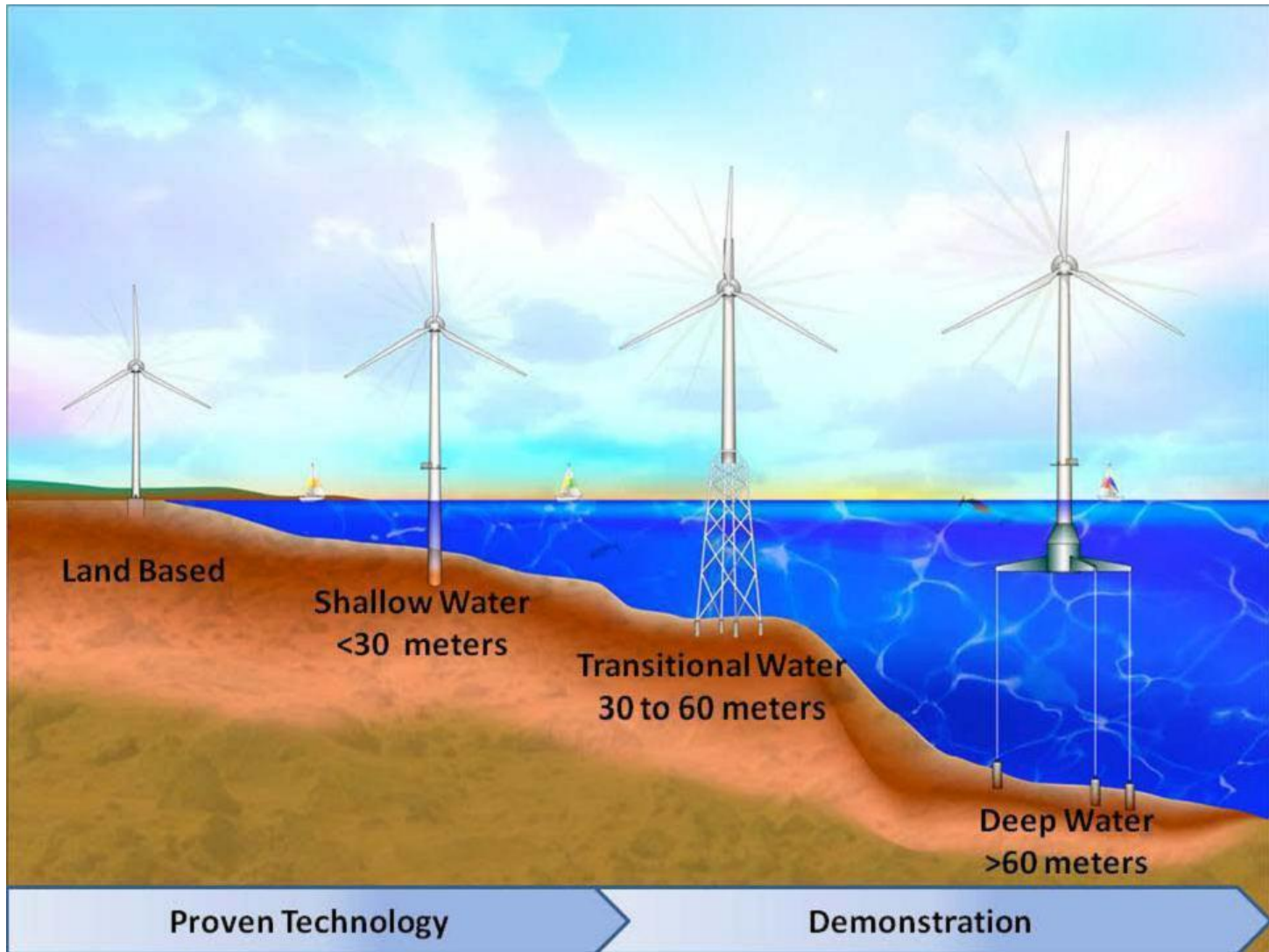
Share of current offshore wind capacity





Wind resources over open sea (more than 10 km offshore) for five standard heights

	10 m		25 m		50 m		100 m		200 m	
	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}
Dark Purple	> 8.0	> 600	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 10.0	> 1100	> 11.0	> 1500
Red	7.0-8.0	350-600	7.5-8.5	450-700	8.0-9.0	600-800	8.5-10.0	650-1100	9.5-11.0	900-1500
Yellow	6.0-7.0	250-300	6.5-7.5	300-450	7.0-8.0	400-600	7.5- 8.5	450- 650	8.0- 9.5	600- 900
Light Green	4.5-6.0	100-250	5.0-6.5	150-300	5.5-7.0	200-400	6.0- 7.5	250- 450	6.5- 8.0	300- 600
Light Blue	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 6.0	< 250	< 6.5	< 300



Windfloat

Phase 1 - 2MW Prototype

Capacity: 2MW WindFloat prototype

Location: Aguçadoura, grid connected
~5 km of coast, 40 - 50 m water depth

Turbine: 2MW offshore wind turbine

Test period: at least 12 months

Phase 2 - Pre-commercial

Capacity: 15 - 25MW – 3 to 5 WindFloat units

Location: TBD, grid connected

Turbine: TBD, Multi MW

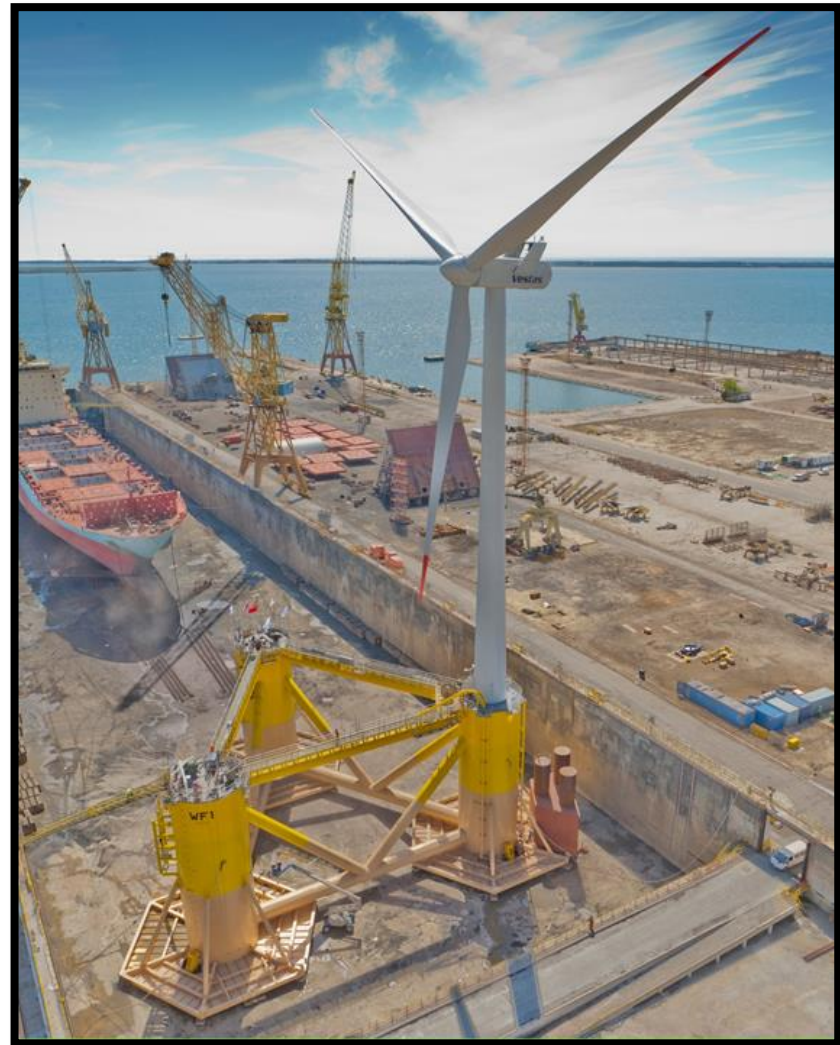
Transformer/support platform: Yes

Phase 3 - Commercial

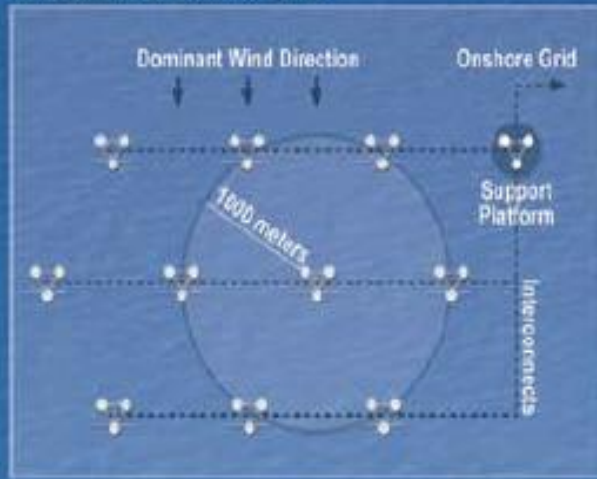
Capacity: 150MW, gradual build-out

Location: TBD, same as Phase 2

Turbine: TBD, same as Phase 2



Wind Farm and Interconnect Layout



Column Stabilization and Closed Loop Active Ballast System



Integrated Column/Tower



Chain Jacks, Boat Landing and Safety Equipment



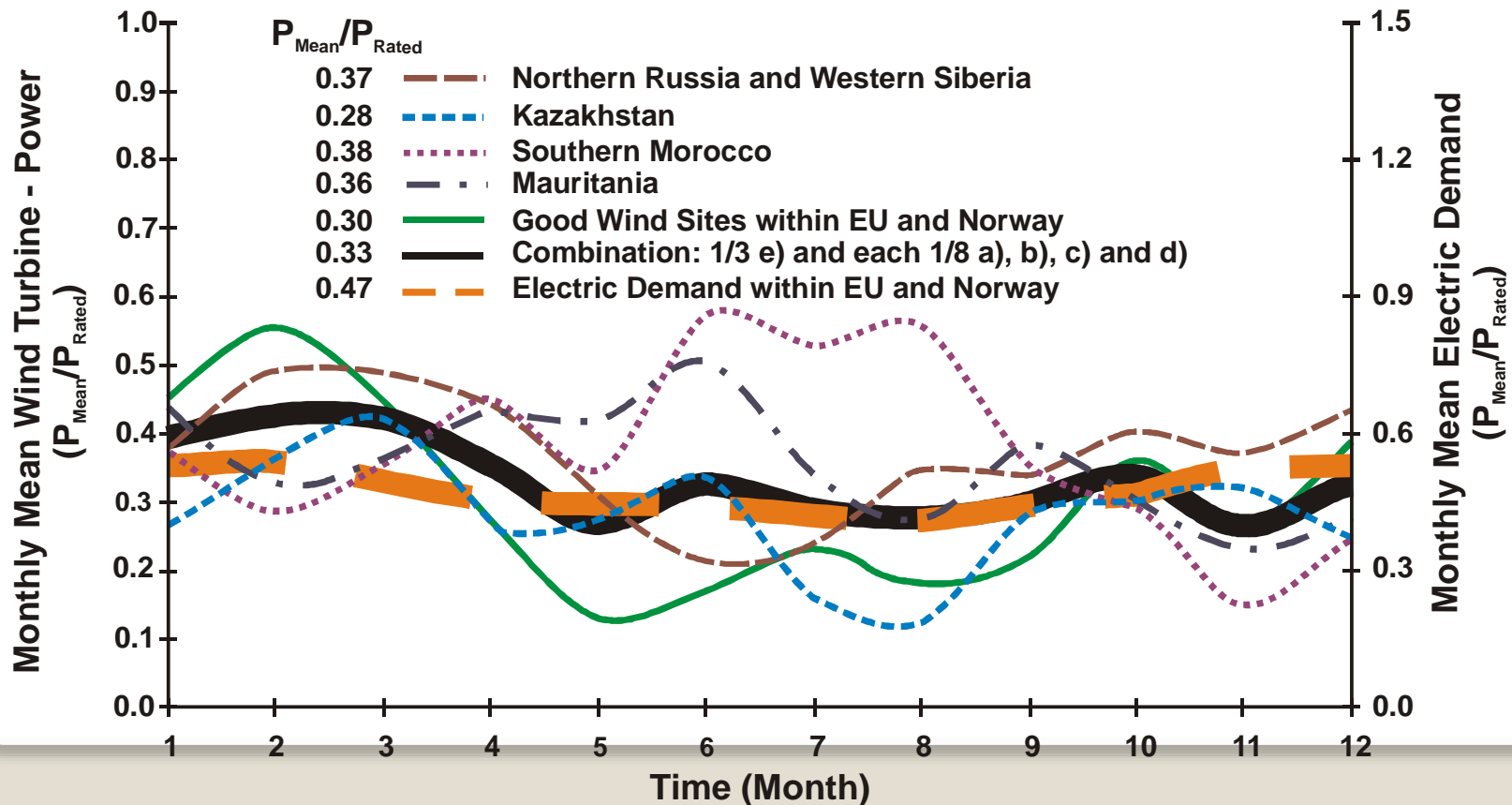




A **variabilidade** do vento

introduz variabilidade e **imprevisibilidade** na produção de electricidade e na resposta instantanea à procura

Soluções/remédios



A **variabilidade** do vento

introduz variabilidade e **imprevisibilidade** na produção de electricidade e na resposta instantanea à procura

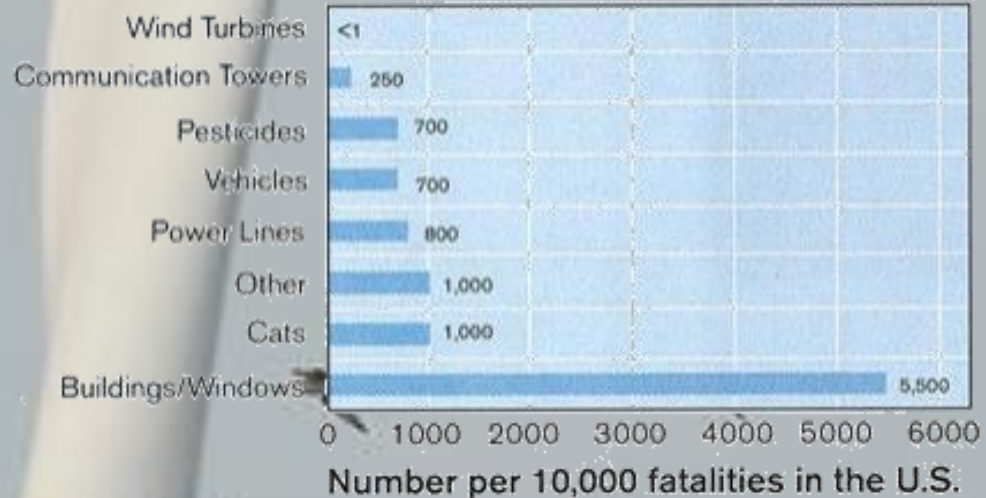
Soluções/remédios

- **Ligação** entre parques não correlacionados
- Melhorar **previsão** a curto-médio prazo
- Centrais de **backup**,
mais caras porque funcionam em regimes ineficientes
mais caras porque têm que estar prontas para intervir
- **Armazenamento** de energia
bombagem de água em albufeiras
baterias (carros eléctricos?)

Impactos relevantes do desenvolvimento de parques eólicos

- na rede eléctrica, devido à **variabilidade**
- **ruído**, que perturba população e biodiversidade
- mortalidade **avifauna**
- alteração da **paisagem**

Causes of Bird Fatalities



AMBIENTE

Turbinas eólicas “roubam” habitat a aves planadoras

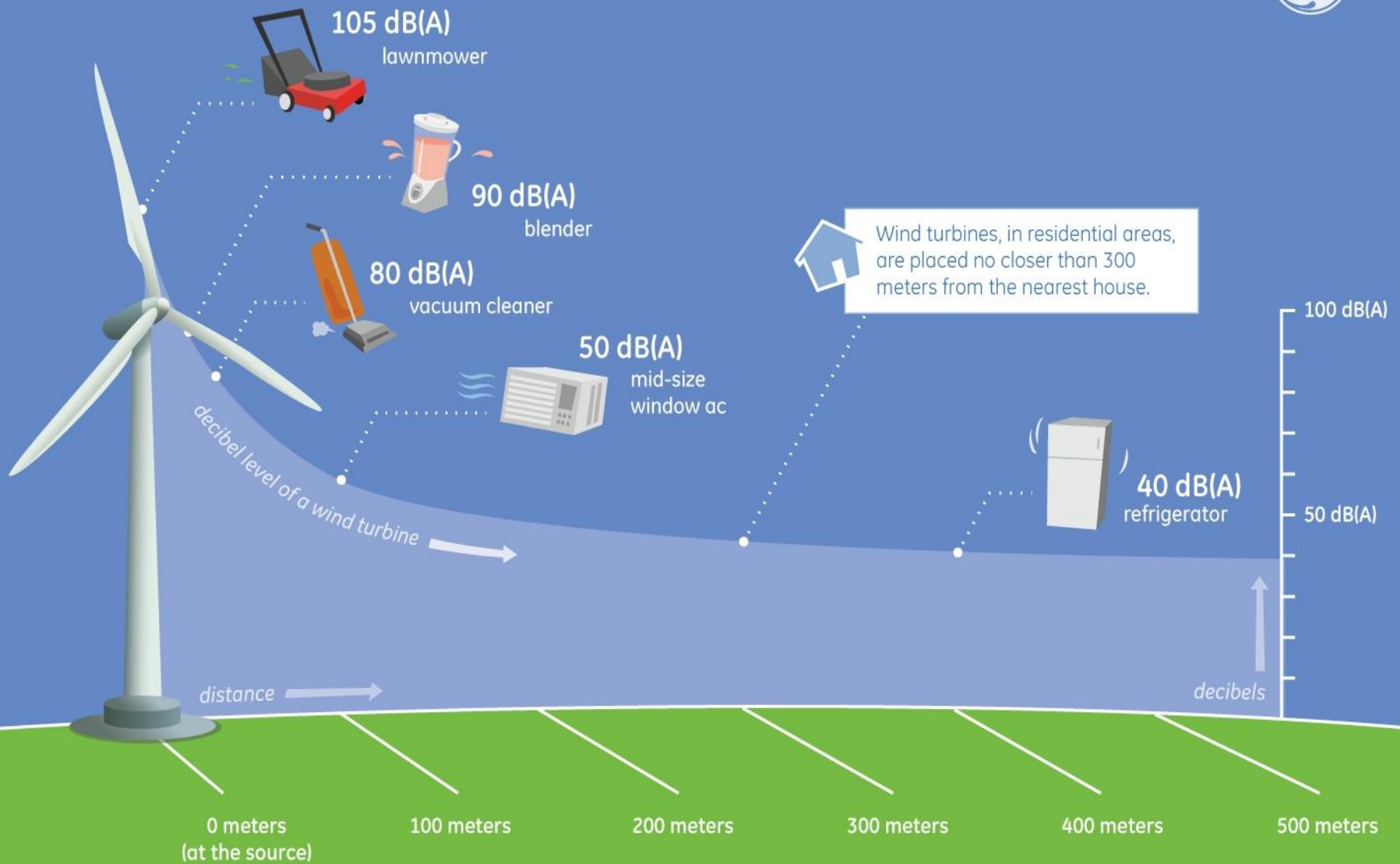
Parques eólicos estão localizados em espaços que oferecem as condições necessárias ao voo planado das aves. No entanto, as aves planadoras não conseguem utilizar estes locais o que se traduz numa perda de habitat de cerca de 700 metros a volta de cada turbina.

Margarida Coutinho · 14 de Março de 2019, 11:21

343
PARTILHAS



How Loud Is A Wind Turbine?



Guess which one produces more noise...



DAVE GRANLUND © www.davegranlund.com

ARGUMENTS AGAINST-



Joehller ©2011 GREENBAY PRESS GAZETTE

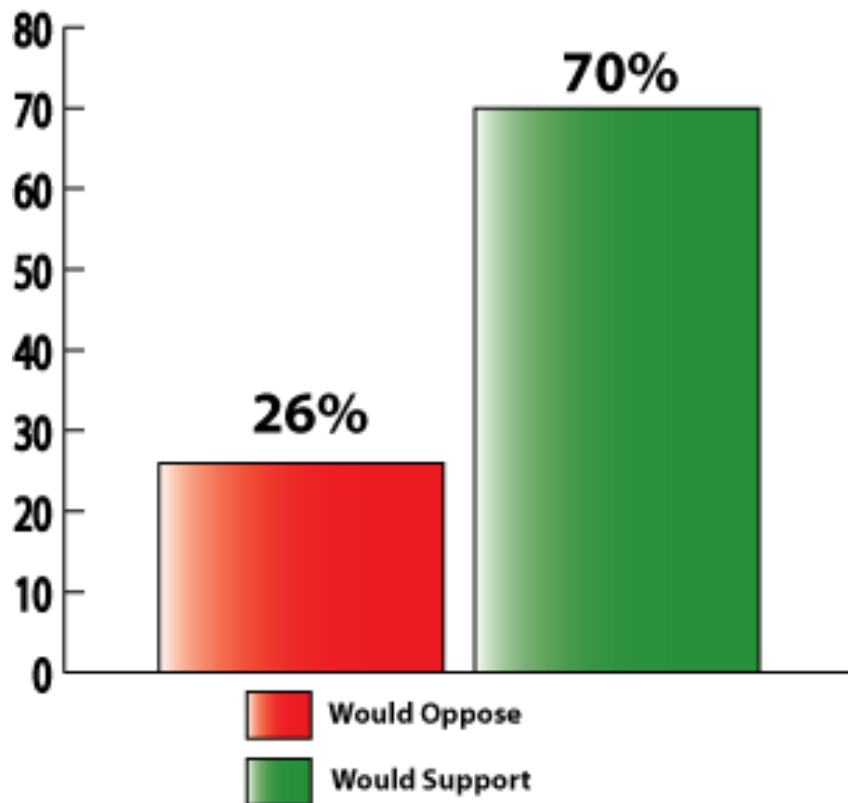
Say **NO** to

WIND

FARM



Opposition and Support for: *Windfarms*



Most Likely Opponents:

- Aged 65+
- Two Year Degree
- Live in an Urban environment
- Live in Northeast, or South
- Identify as Conservative or member of Tea Party

Most Likely Supporters:

- Aged 21-35
- Hold Post-Grad Degree
 - Support at 81%
- Earn between \$35K-\$49K or between \$75K-\$99K
- Live in Rural environment
- Live in Midwest
- Identify as Liberal or Moderate

eolo

diversidade

Turbinas de eixo vertical

Omni-direccionais

Menor eficiência

Mais baixas, logo menos vento

Interessantes para zonas urbanas



Turbinas de eixo vertical

Omni-direccionais

Menor eficiência

Mais baixas, logo menos vento

Interessantes para zonas urbanas





Turbinas integradas em edifícios



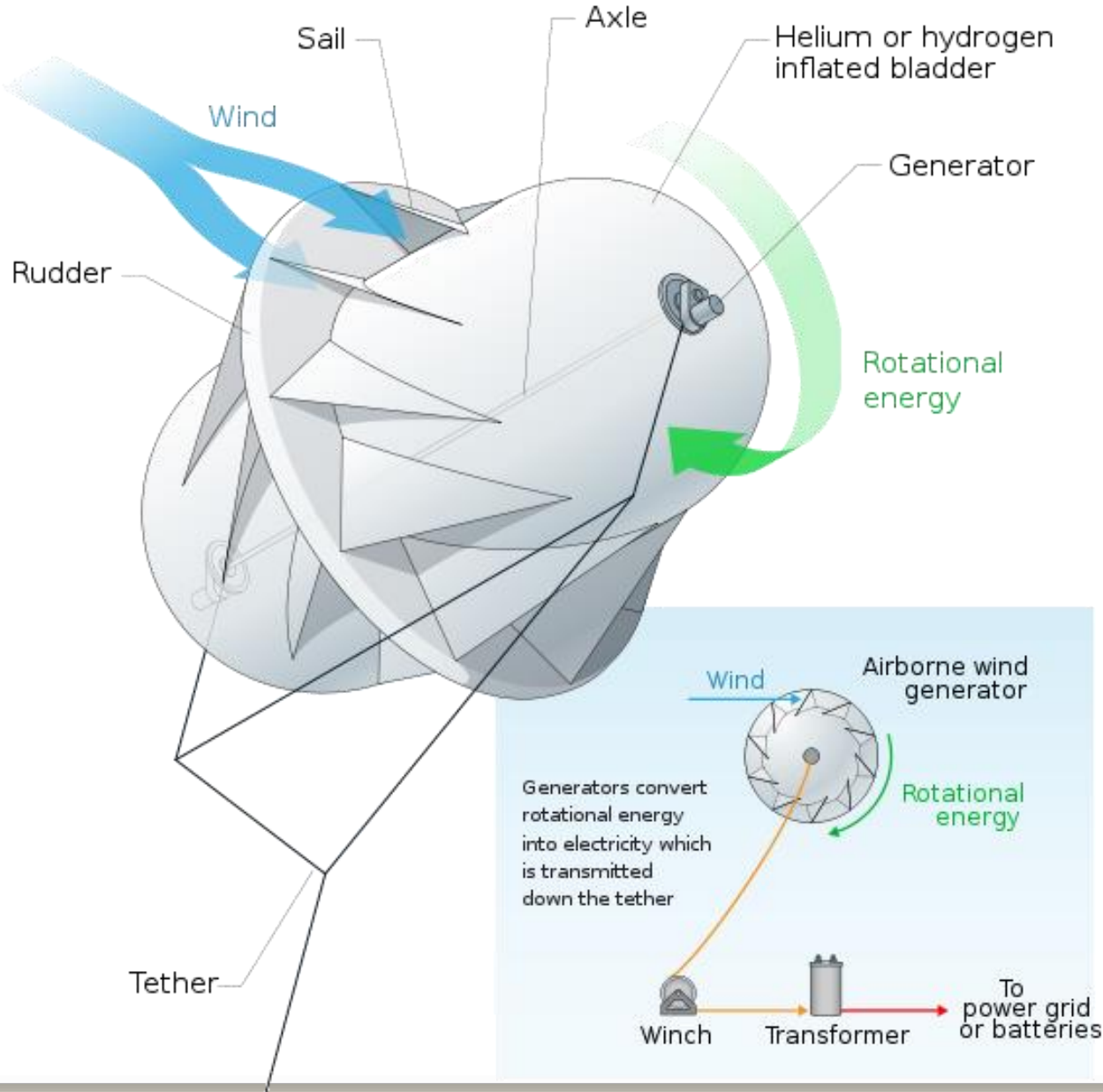
Photography by Lucid Dreams Productions







Grande altitude



Traiettoria a "8",
controllata elettronicamente:
è stabile e consente
il massimo rendimento.

direzione del vento

Forza di recupero:
costa energia ma consente
di completare il ciclo.

Forza di trazione:
consente di ricavare energia.

Gli aquiloni volano ad almeno 1 km
di quota (il disegno non è in scala),
anche a quote diverse,
per non intralciarsi.

La forza degli aquiloni

Schema di una centrale capace di generare 10 MW
(quanto basta a una piccola città),
composta da aquiloni che sfruttano il vento in quota.

Distanza minima tra gli impianti:
100 metri

Base per il controllo e la
generazione di energia.
Le basi possono ruotare
per seguire il vento.

