

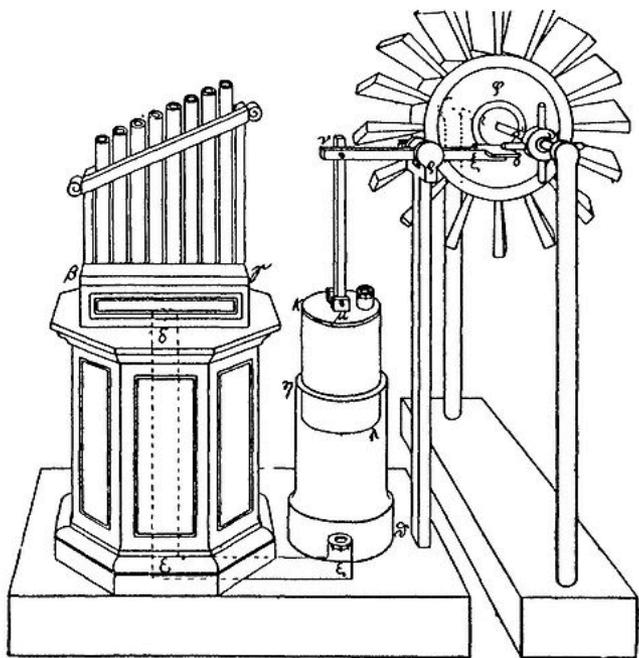
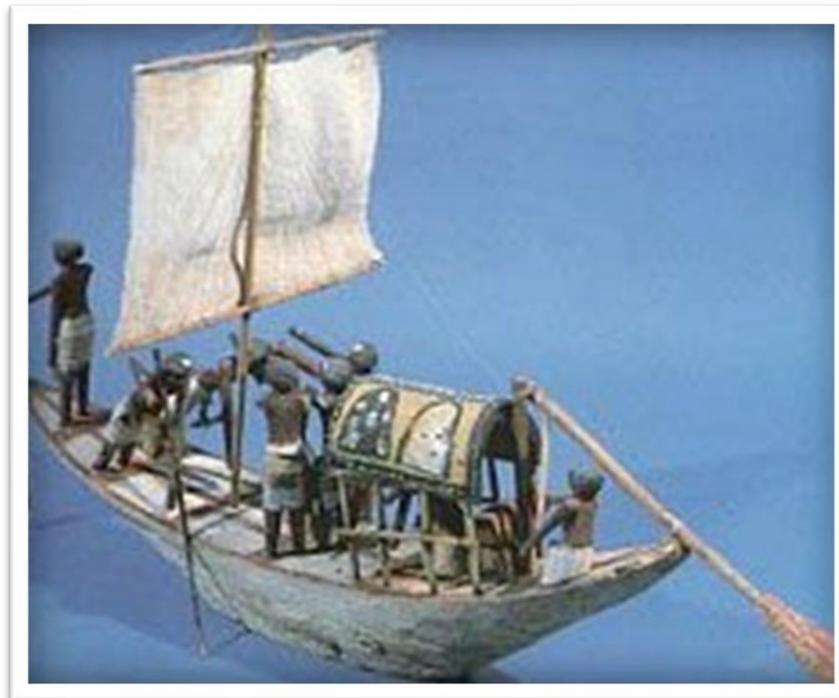
ENERGIA EÓLICA

Energias Renováveis

Miguel Centeno Brito

Utilização da energia do vento

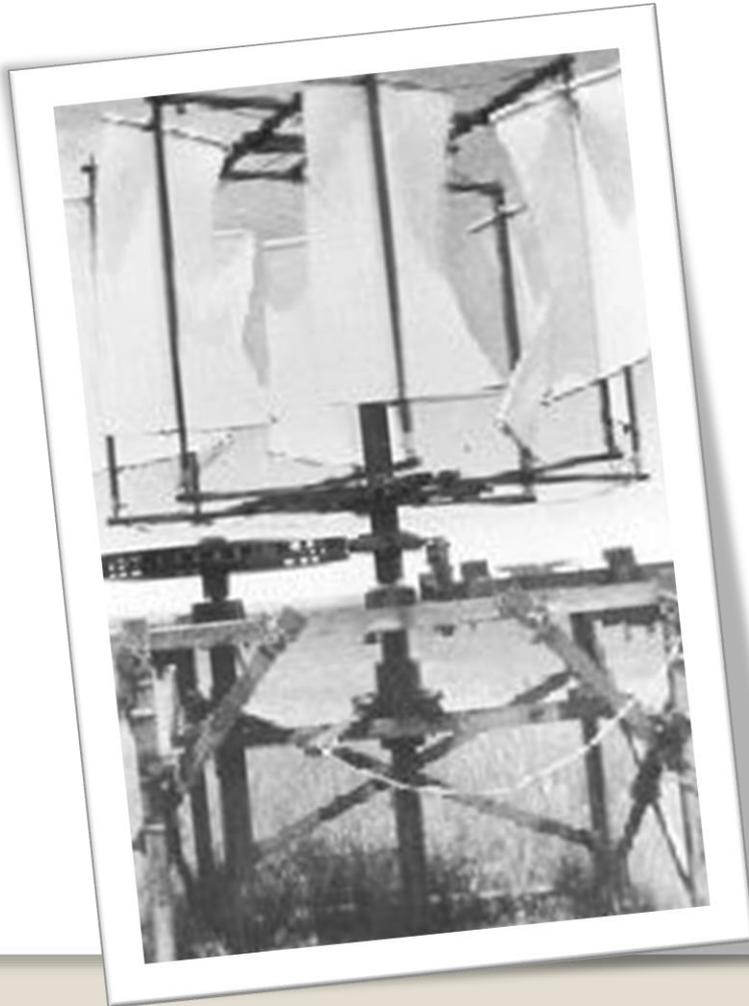
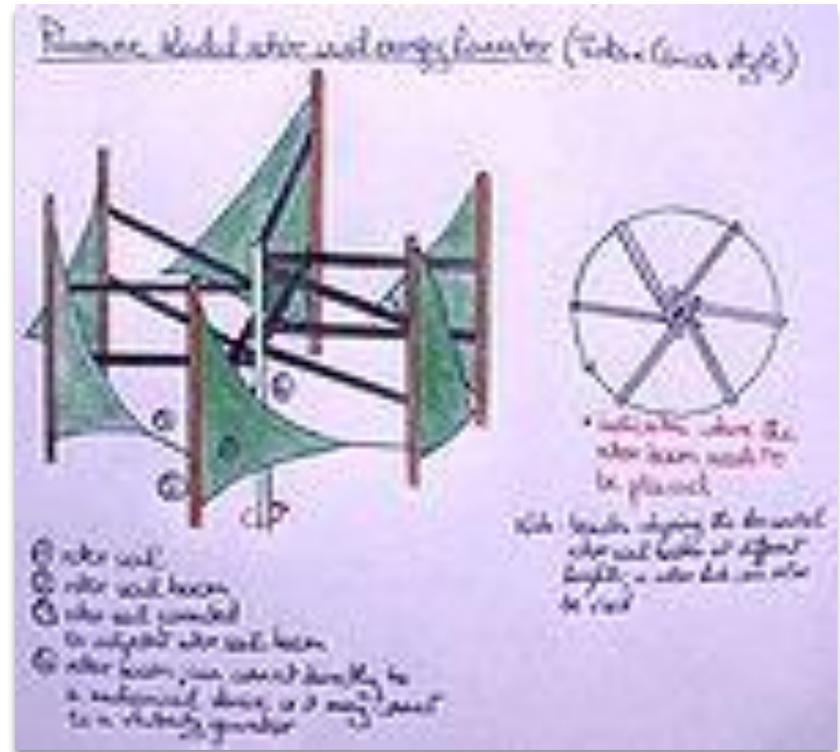
Egipto antigo e barcos fenícios navegaram à vela no Nilo, e no mediterraneo.



Heron (Alexandria)
Orgão musical com
energia do vento

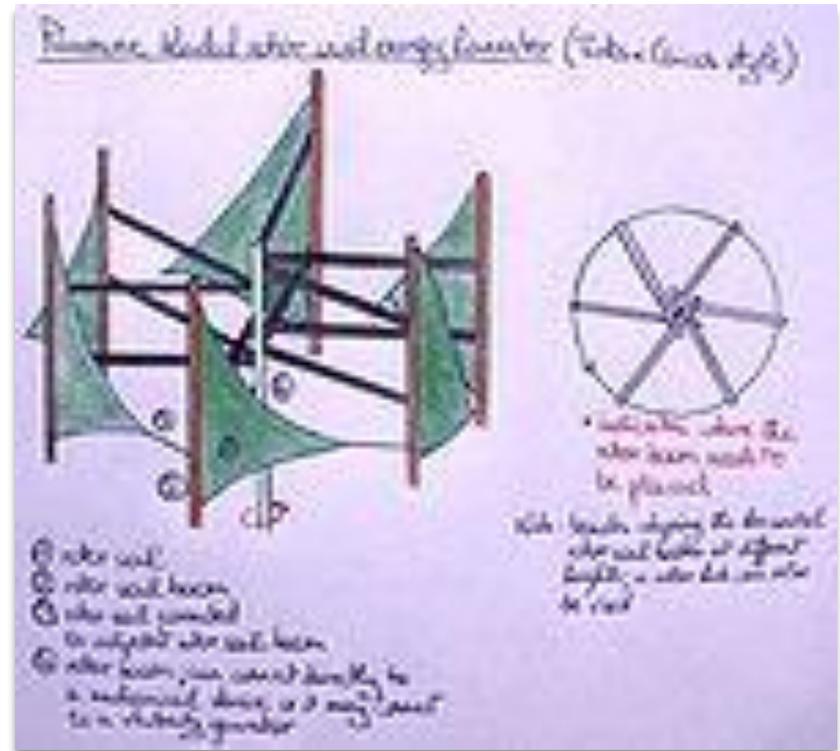
Utilização da energia do vento

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

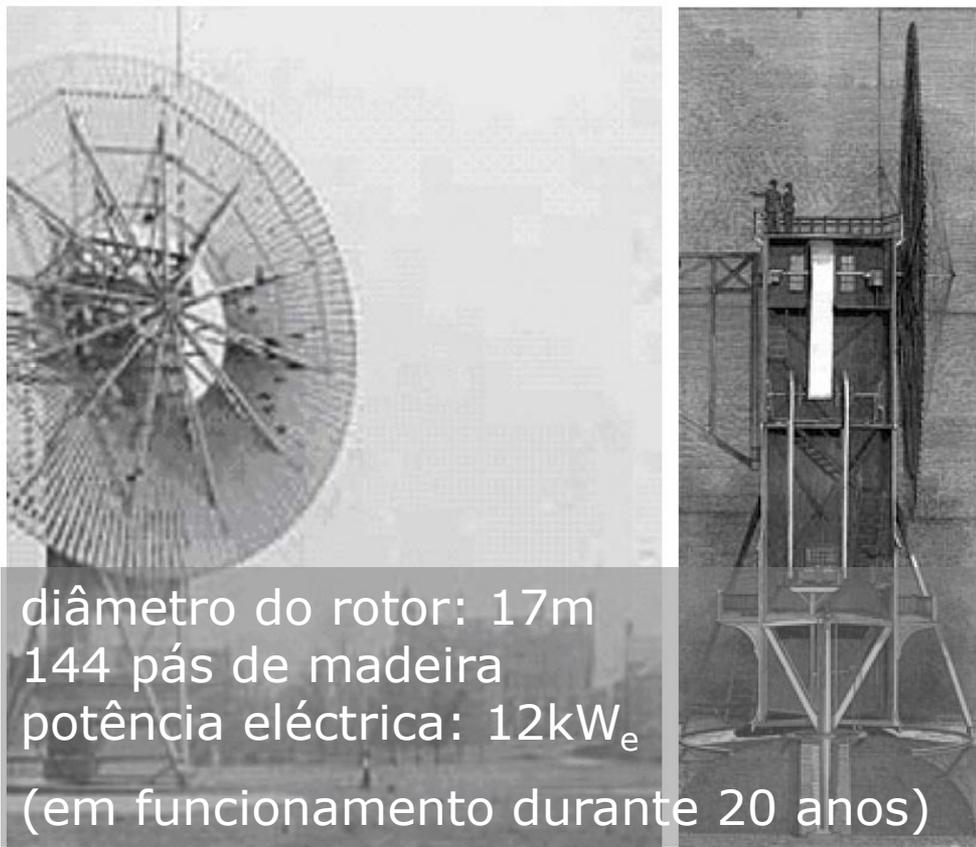


Grande disseminação de moínhos por toda a Europa
Mais de 50,000 em 1850, gradualmente substituídos por carvão...



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



Using wind energy

Goldwind GWH252-16MW

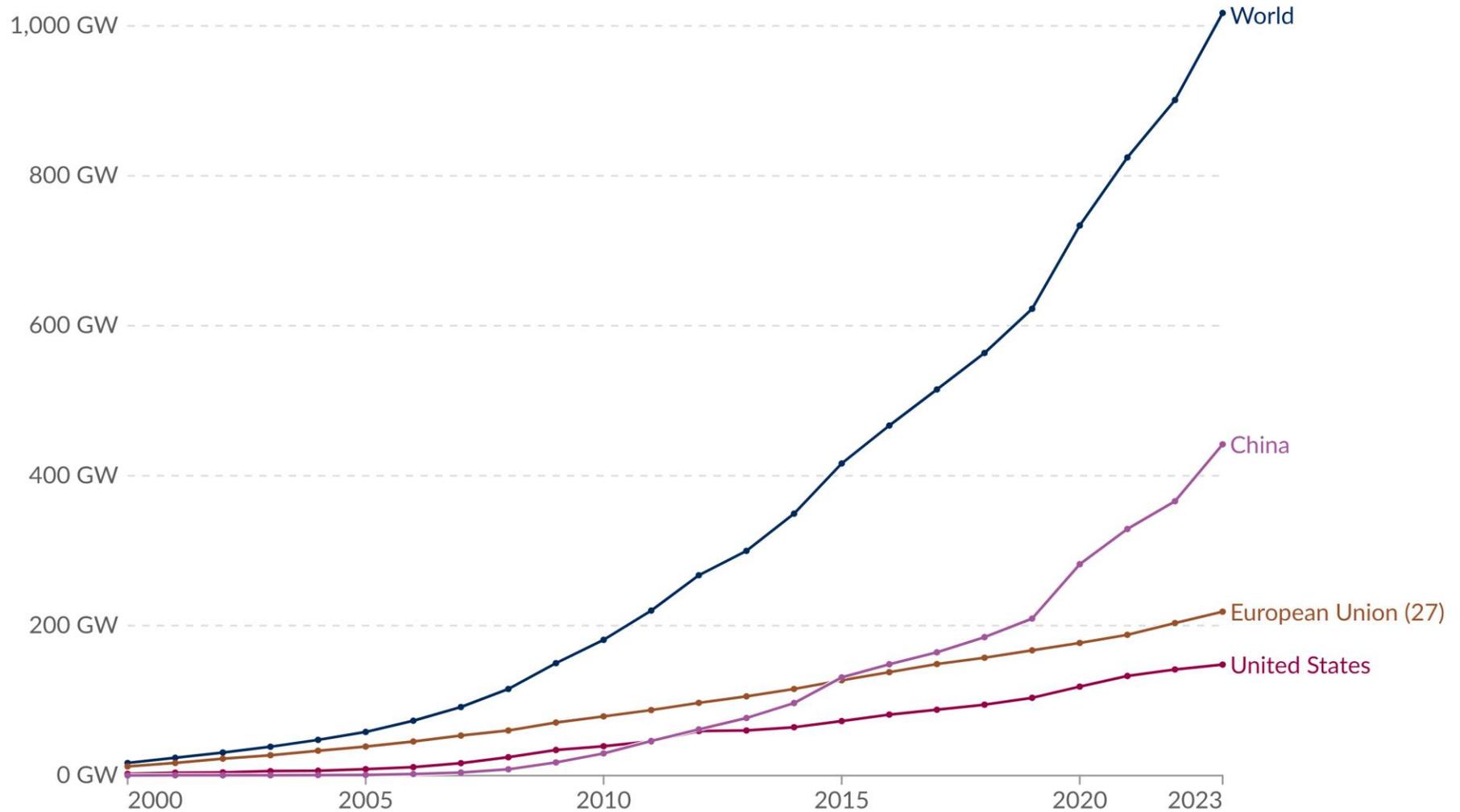
Blade: 123 m

Rotor diameter: 252 m



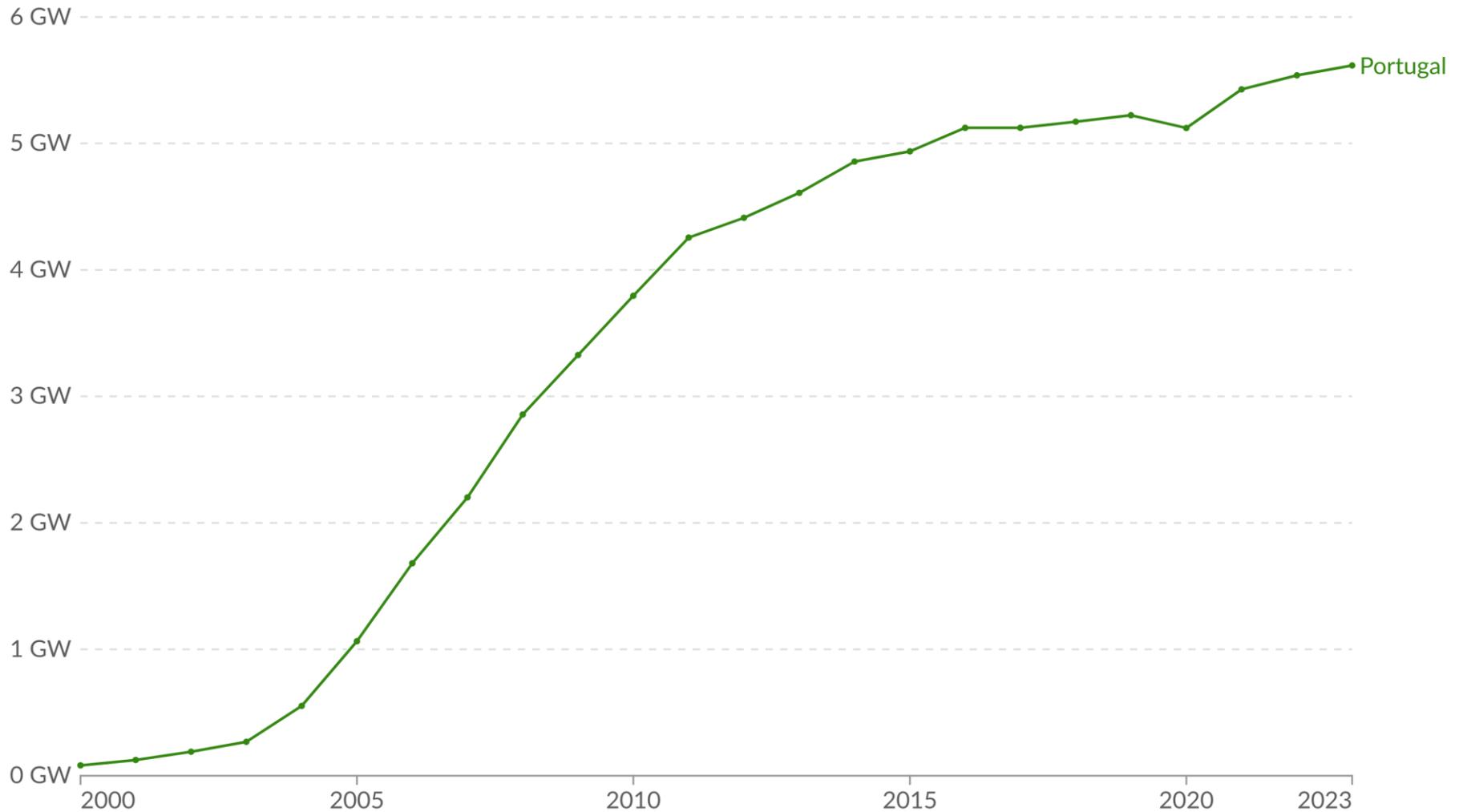
Installed wind energy capacity

Cumulative installed wind energy capacity including both onshore and offshore wind sources, measured in gigawatts (GW).



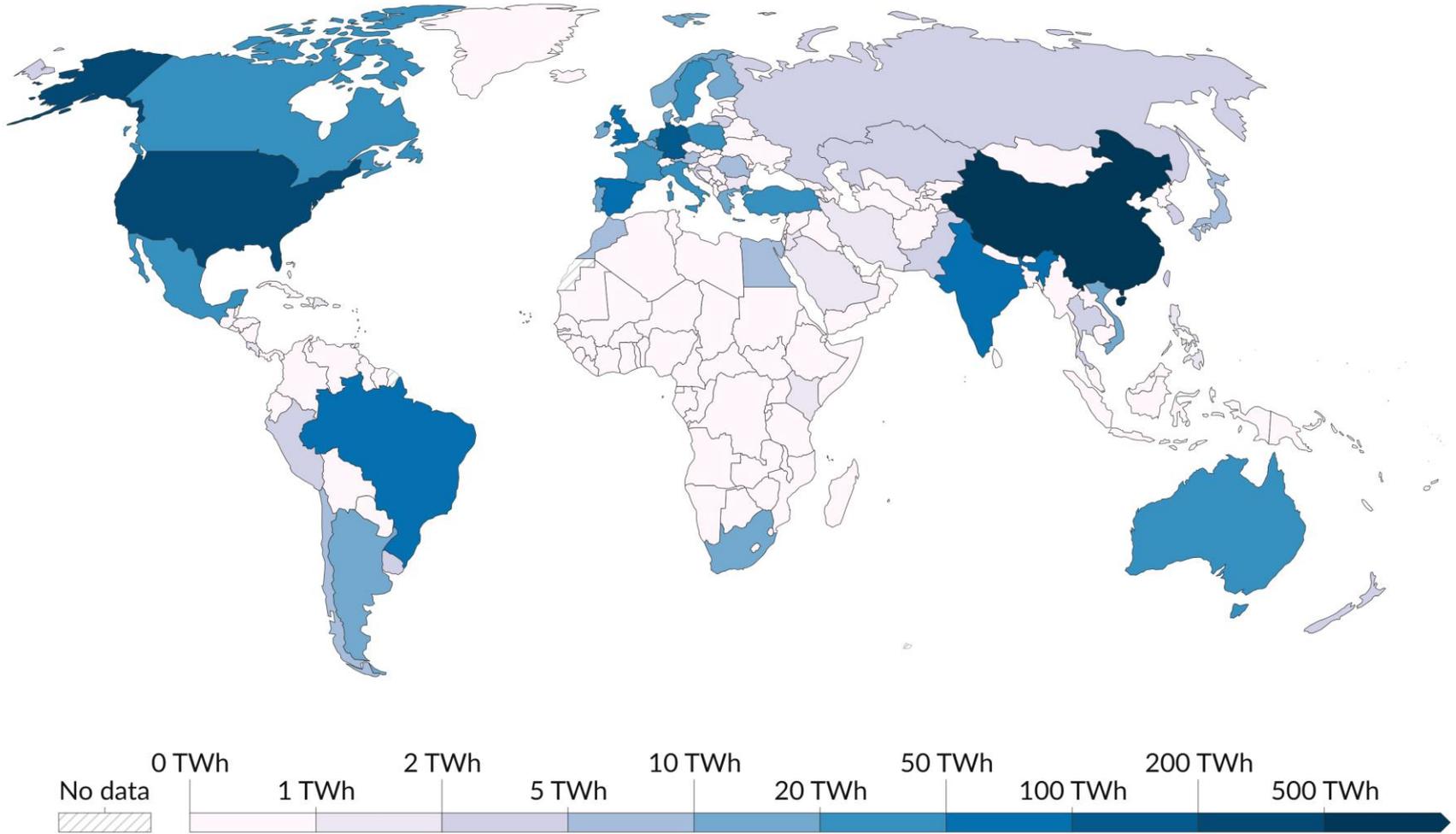
Installed wind energy capacity

Cumulative installed wind energy capacity including both onshore and offshore wind sources, measured in gigawatts (GW).



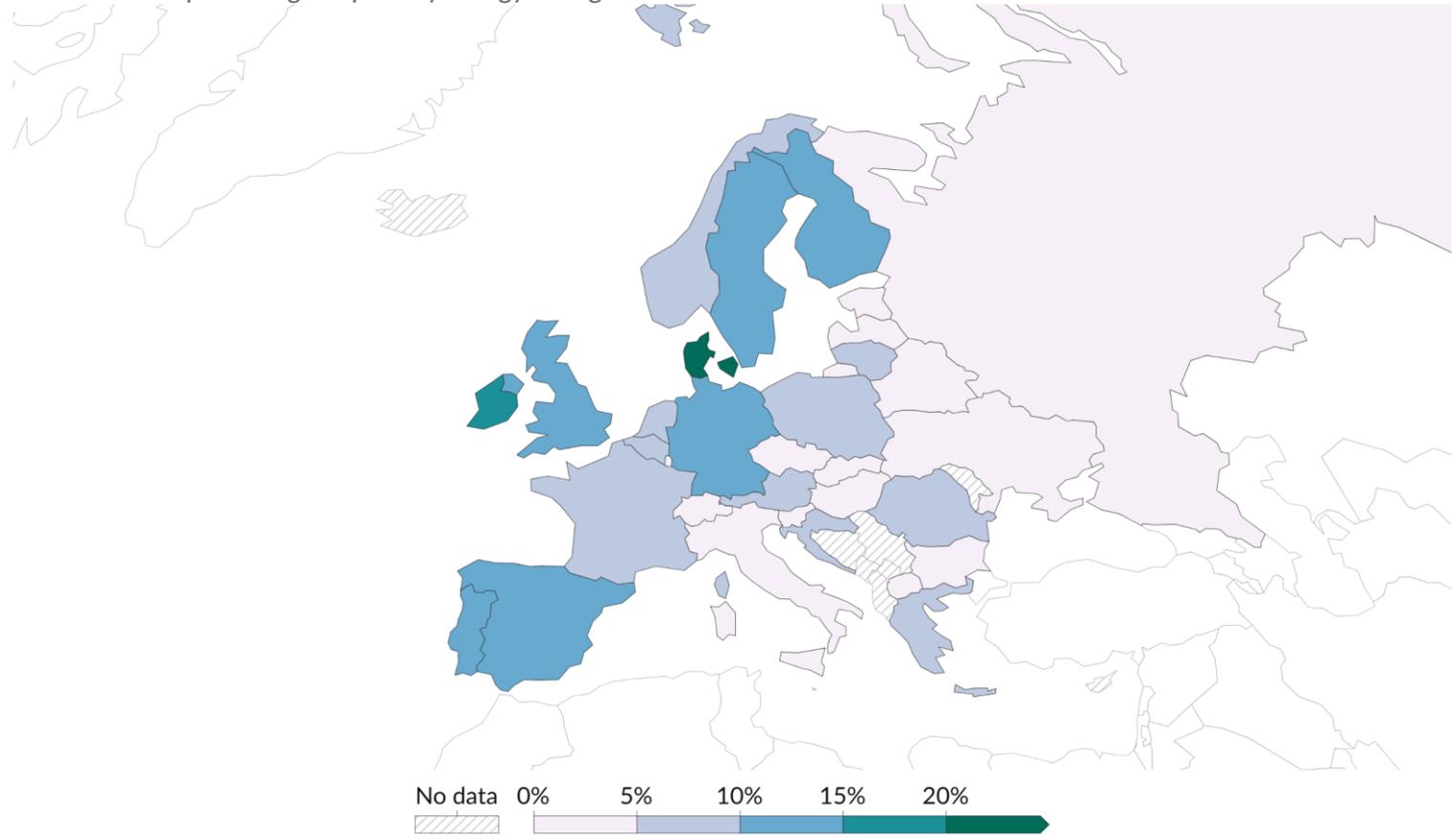
Wind power generation, 2023

Annual electricity generation from wind is measured in terawatt-hours (TWh) per year. This includes both onshore and offshore wind sources.



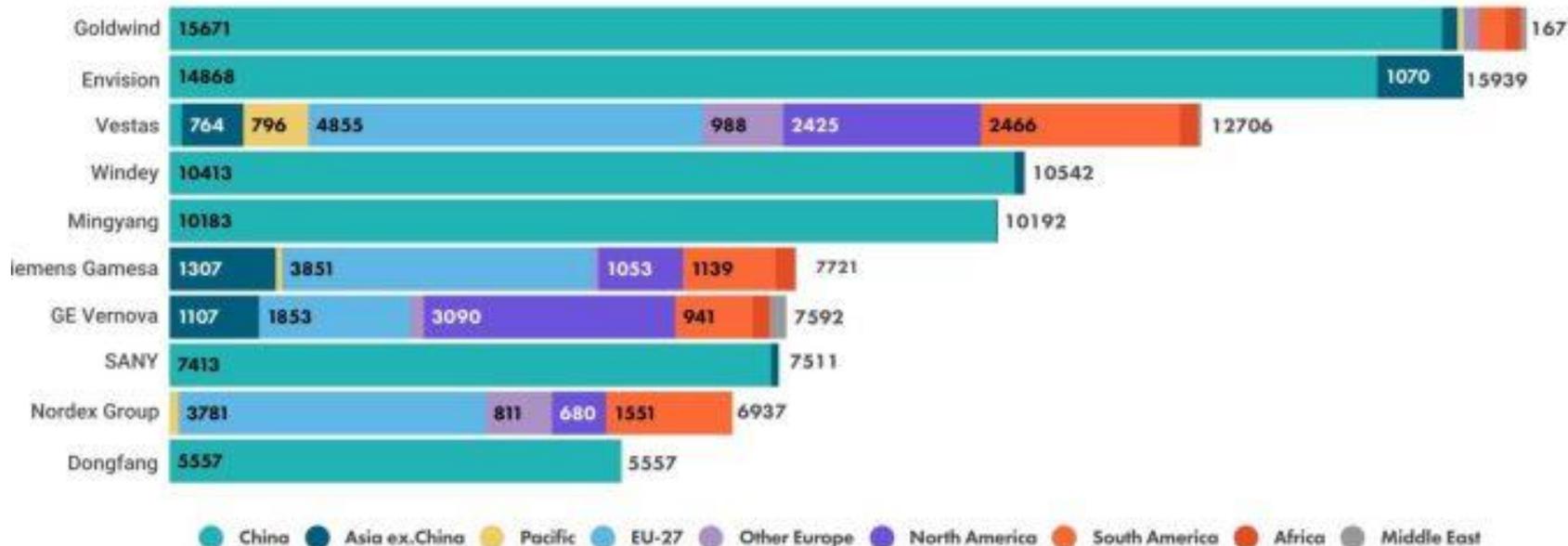
Share of primary energy consumption from wind, 2023

Measured as a percentage of primary energy¹ using the substitution method².



Top 10 wind turbine suppliers in 2023

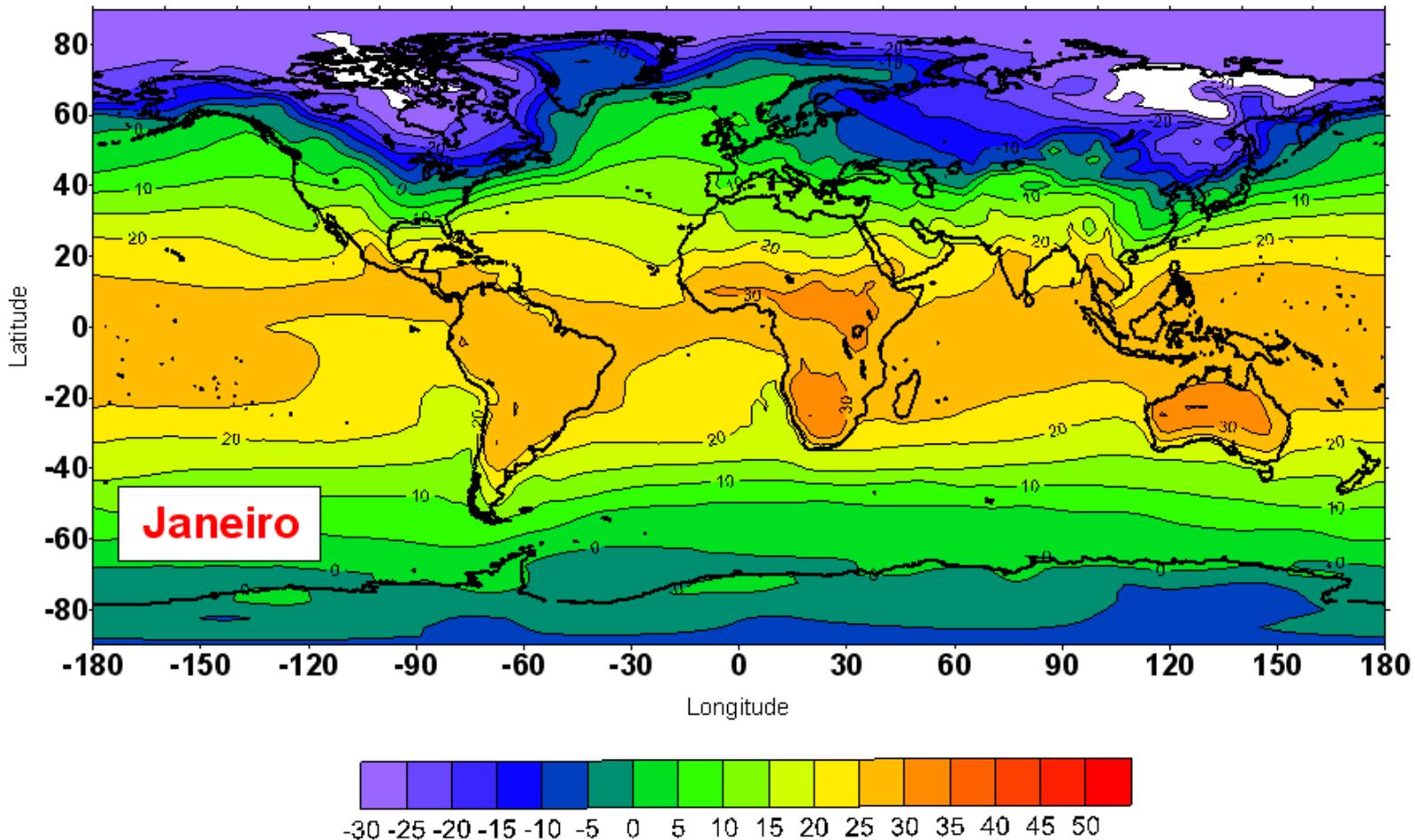
Unit: MW



Source: GWEC Market Intelligence, April 2024

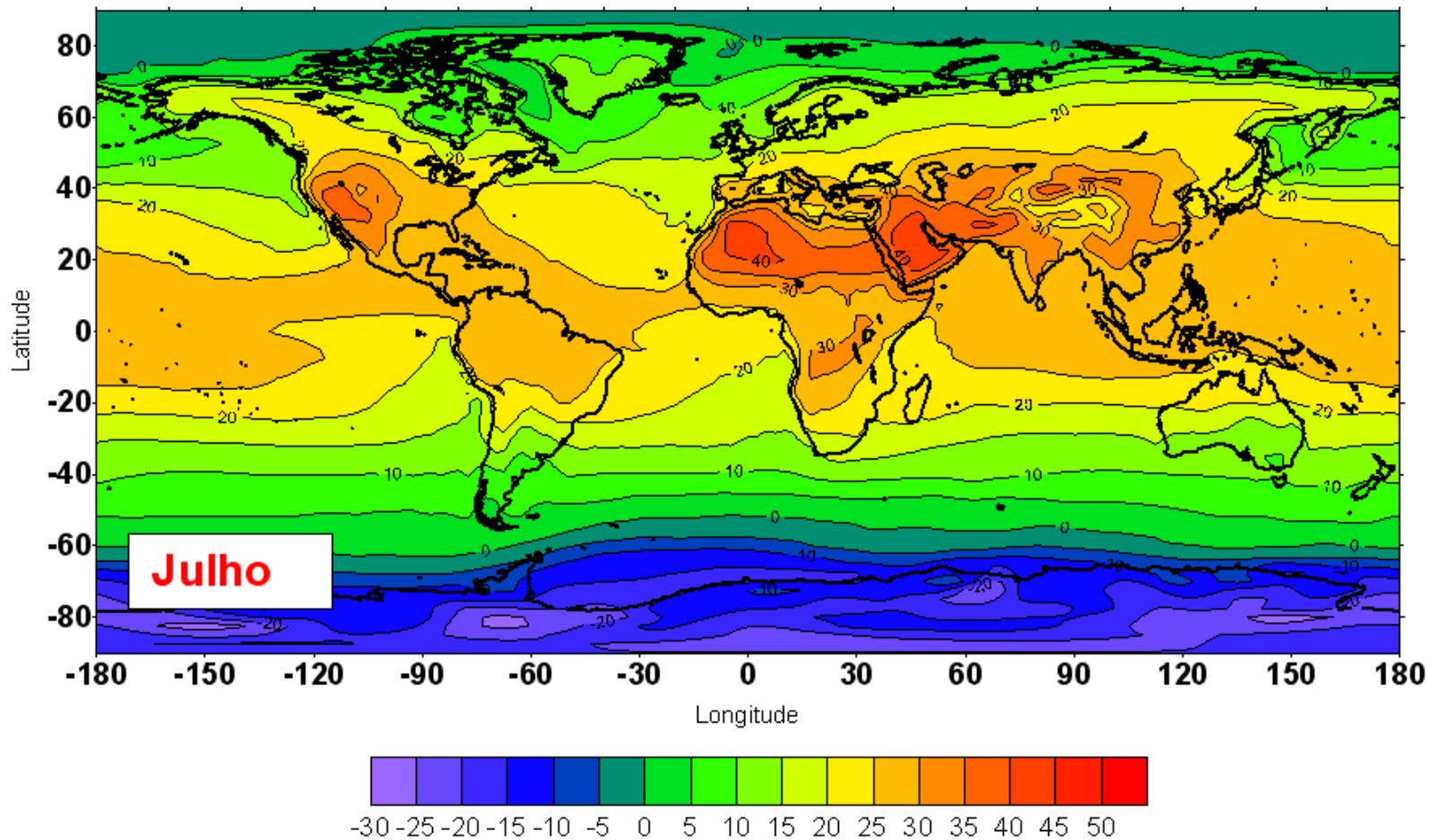
Recurso eólico

Temperatura



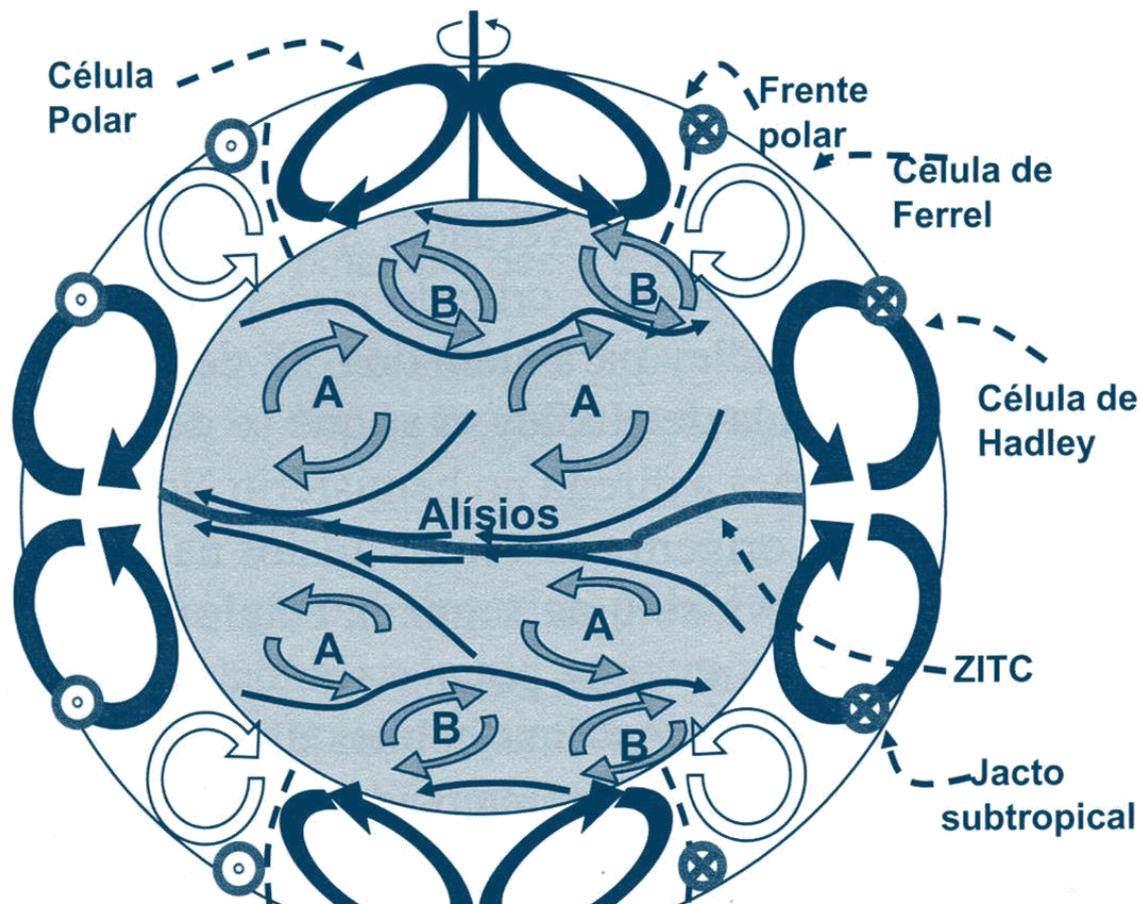
Recurso eólico

Temperatura

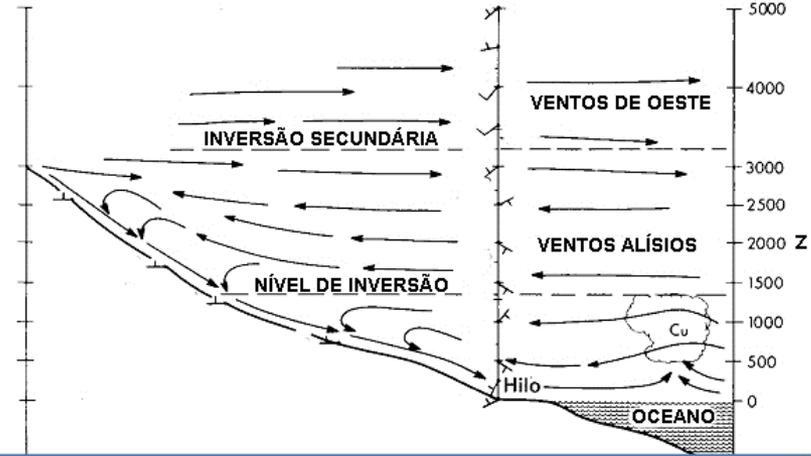
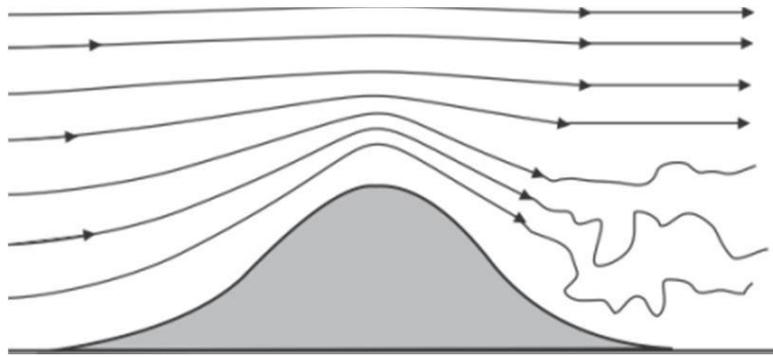
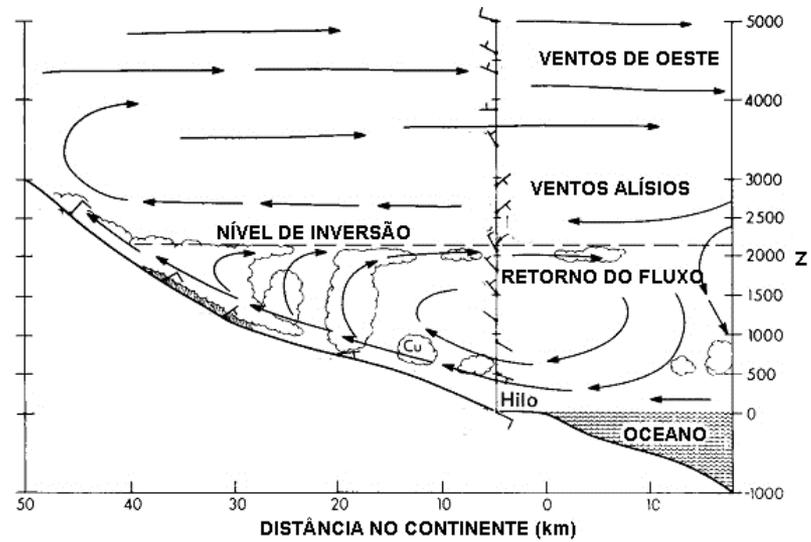
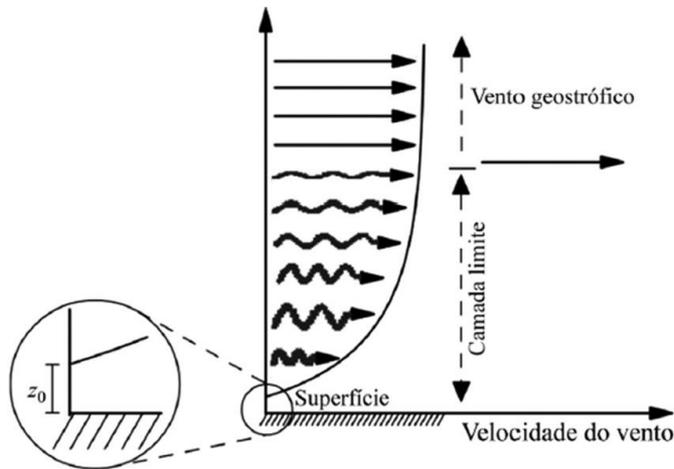


Recurso eólico

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.



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

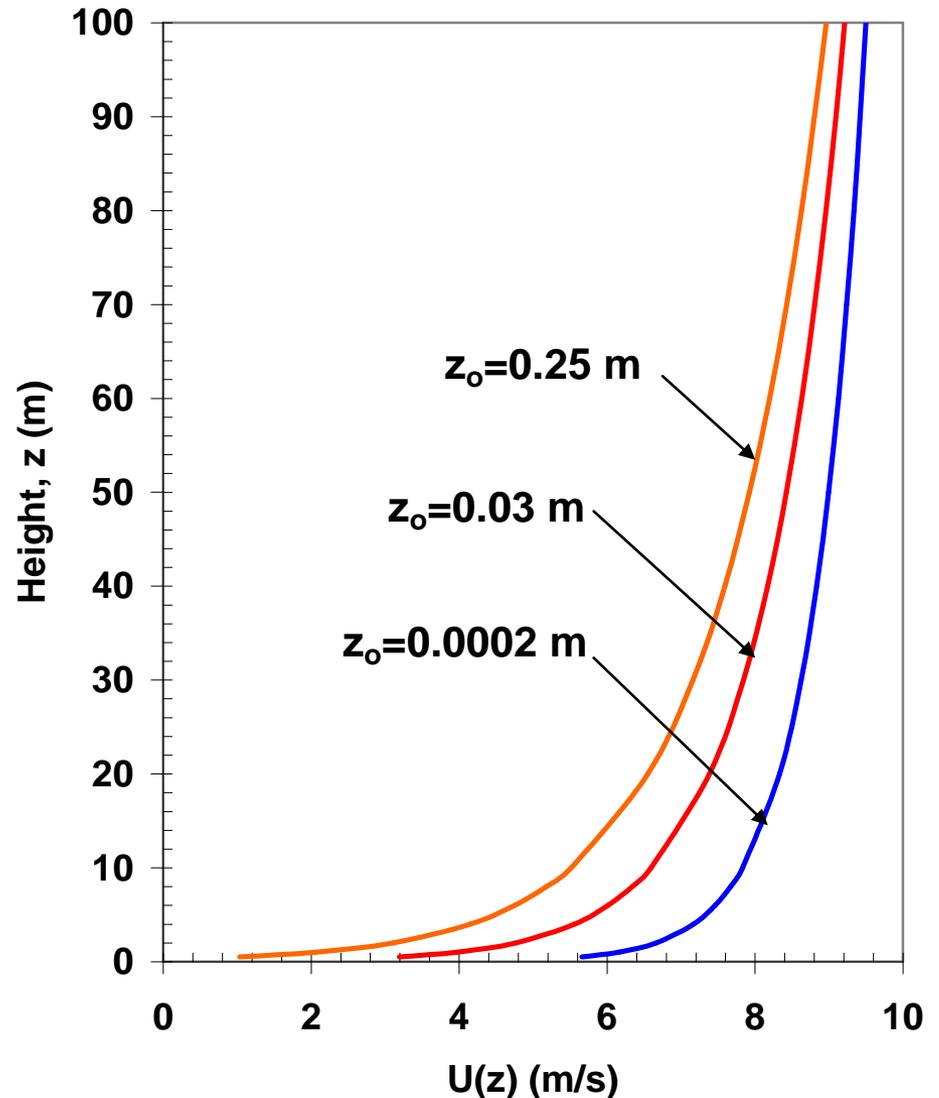
Variação do vento médio com a altura

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

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.



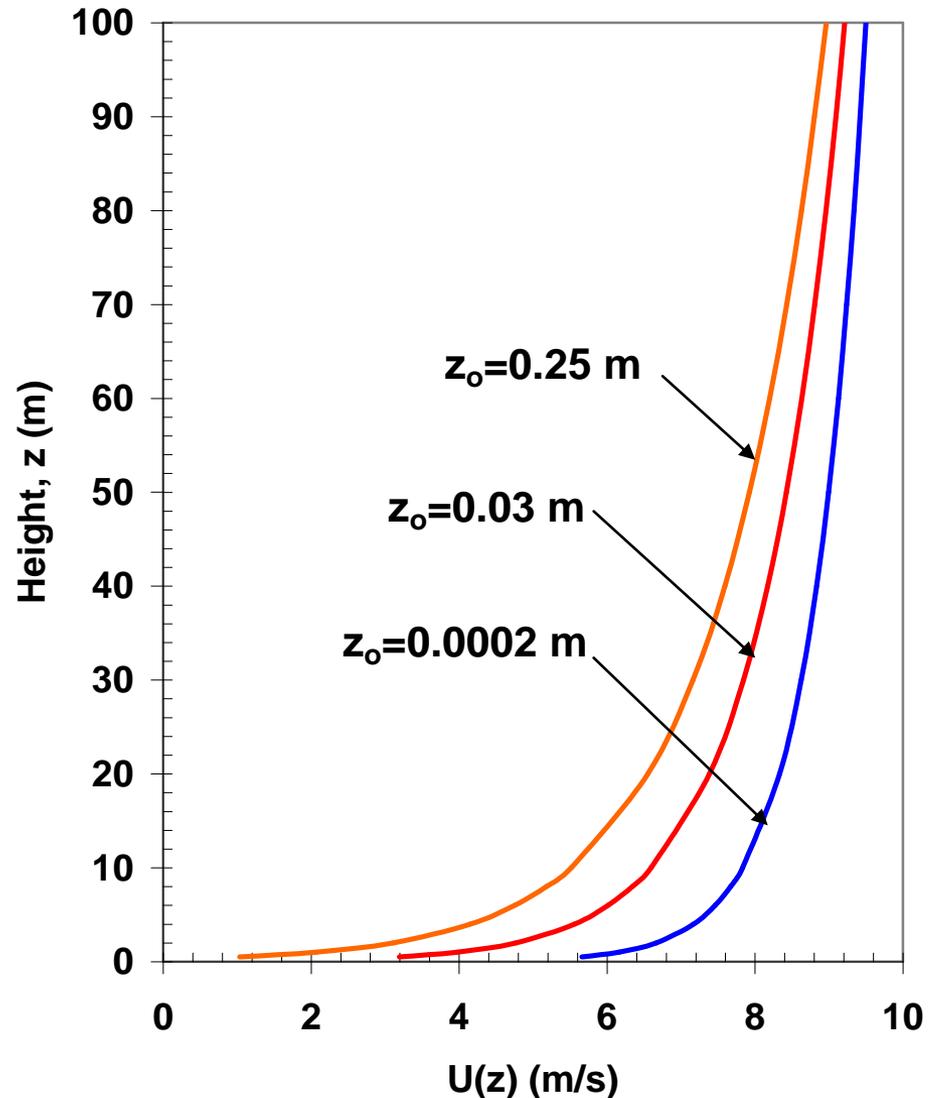
Variação do vento médio com a altura

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

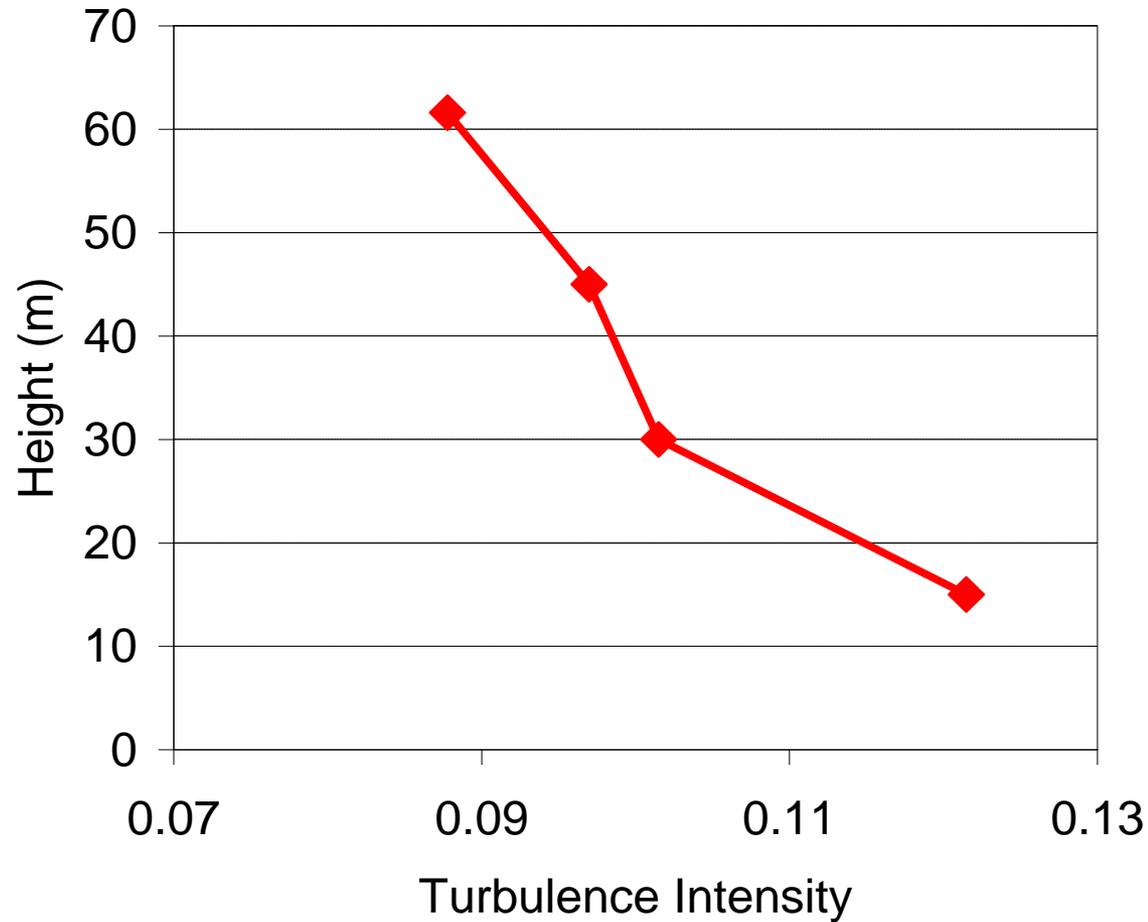
Solução empírica:

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

com $n = 0.15 - 0.16$



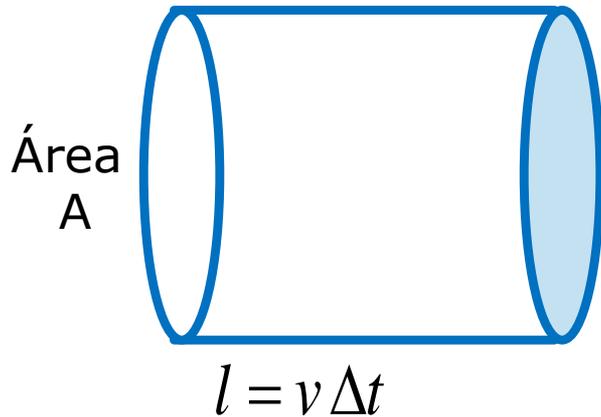
Variação do vento médio com a altura



intensidade de turbulência =

= desvio padrão da velocidade do vento / velocidade média

Quanta é a energia do vento



Energia cinética

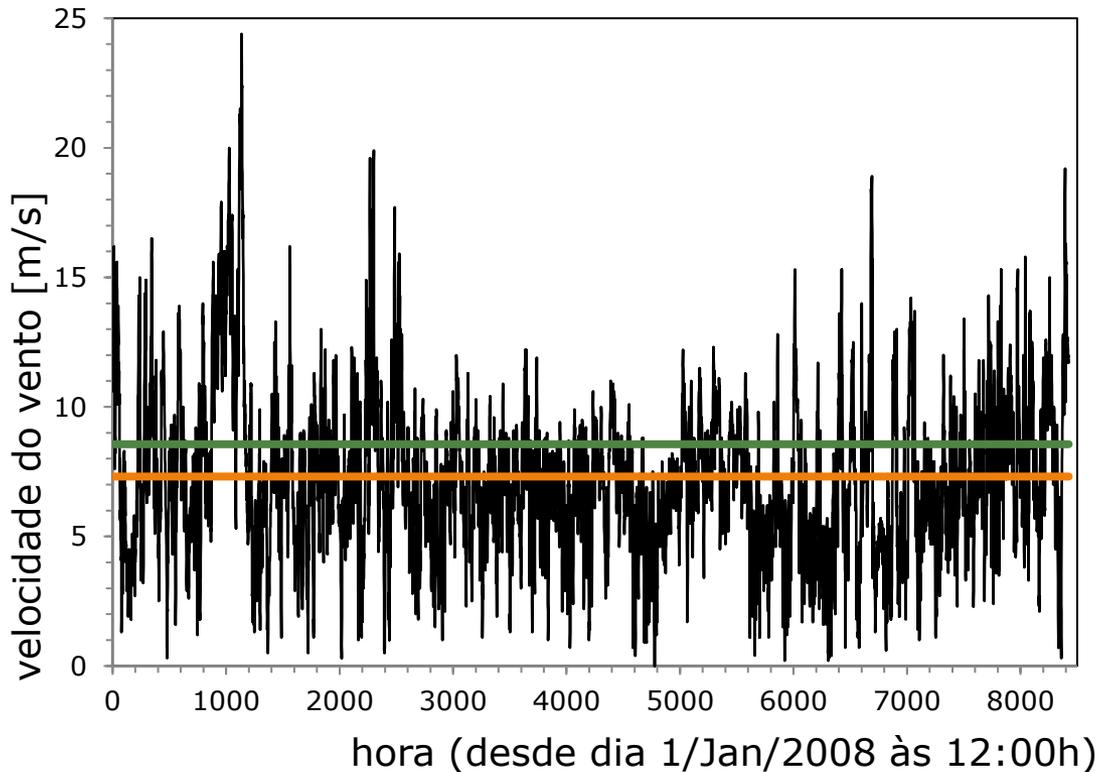
$$E = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} (\rho A v \Delta t) v^2 = \frac{1}{2} \rho A \Delta t v^3$$

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

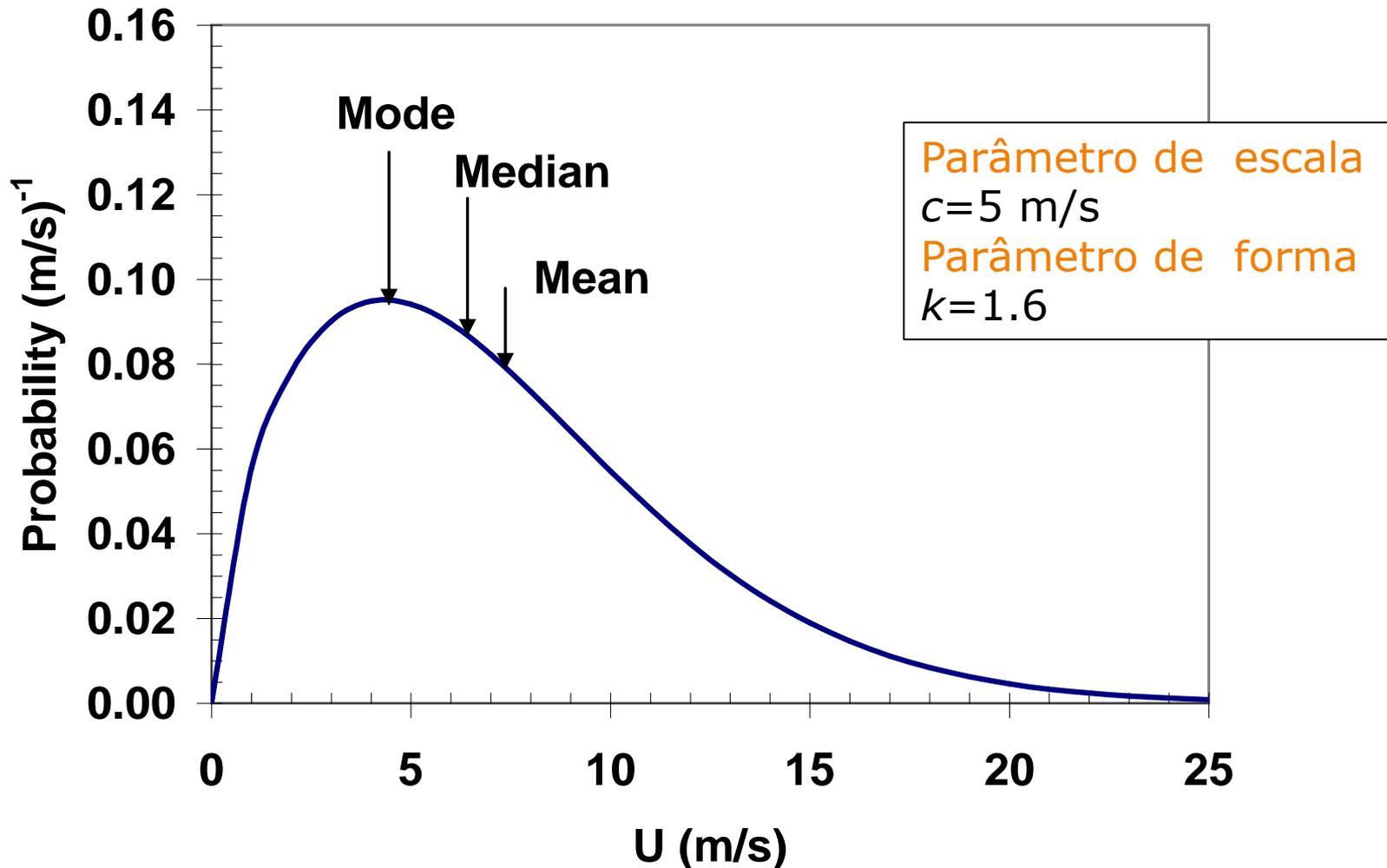
$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

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

Distribuição da velocidade do vento

Distribuição de Weibull

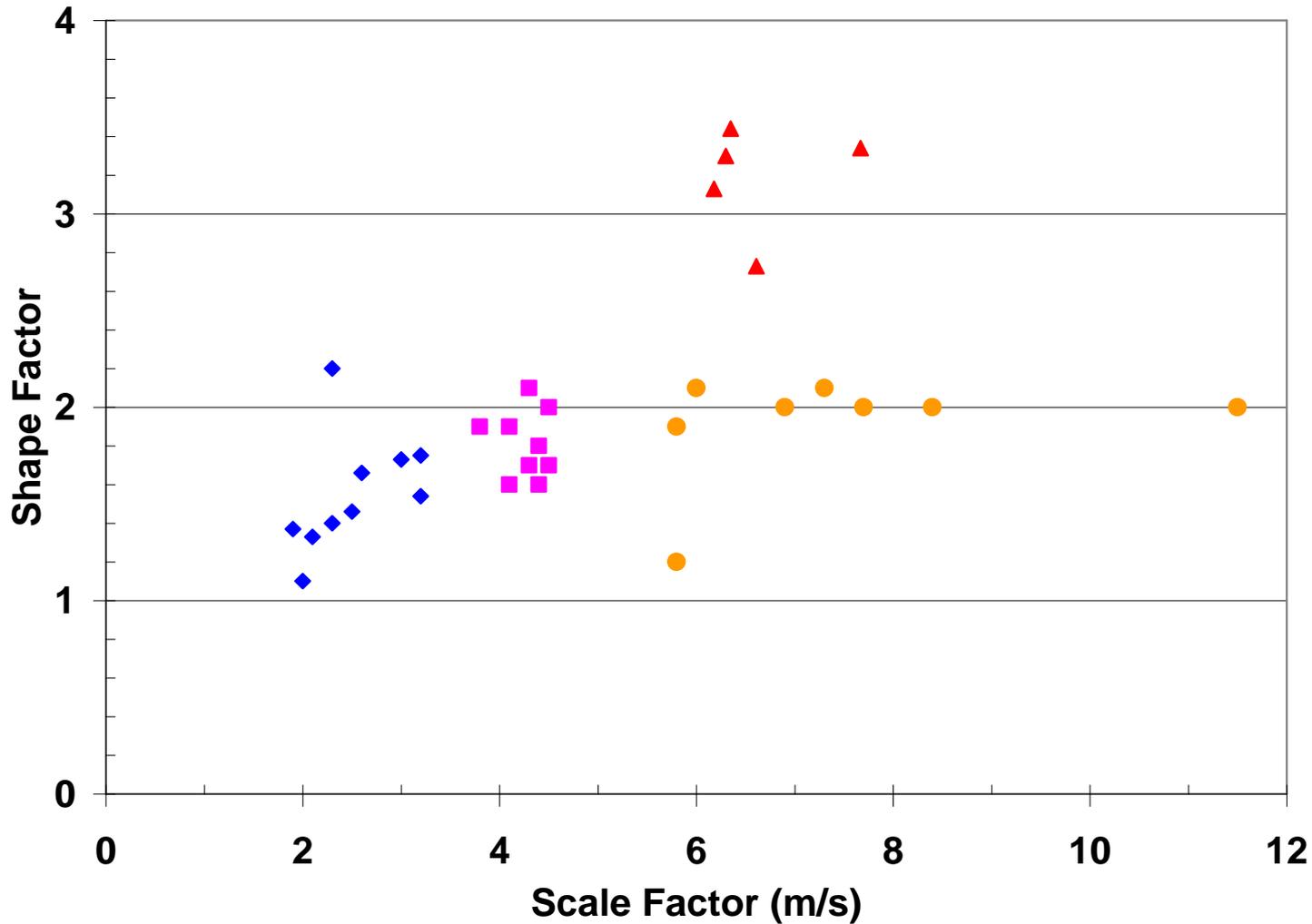
$$f(u) = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c} \right)^{k-1} e^{-(u/c)^k}$$



Distribuição da velocidade do vento

Distribuição de Weibull

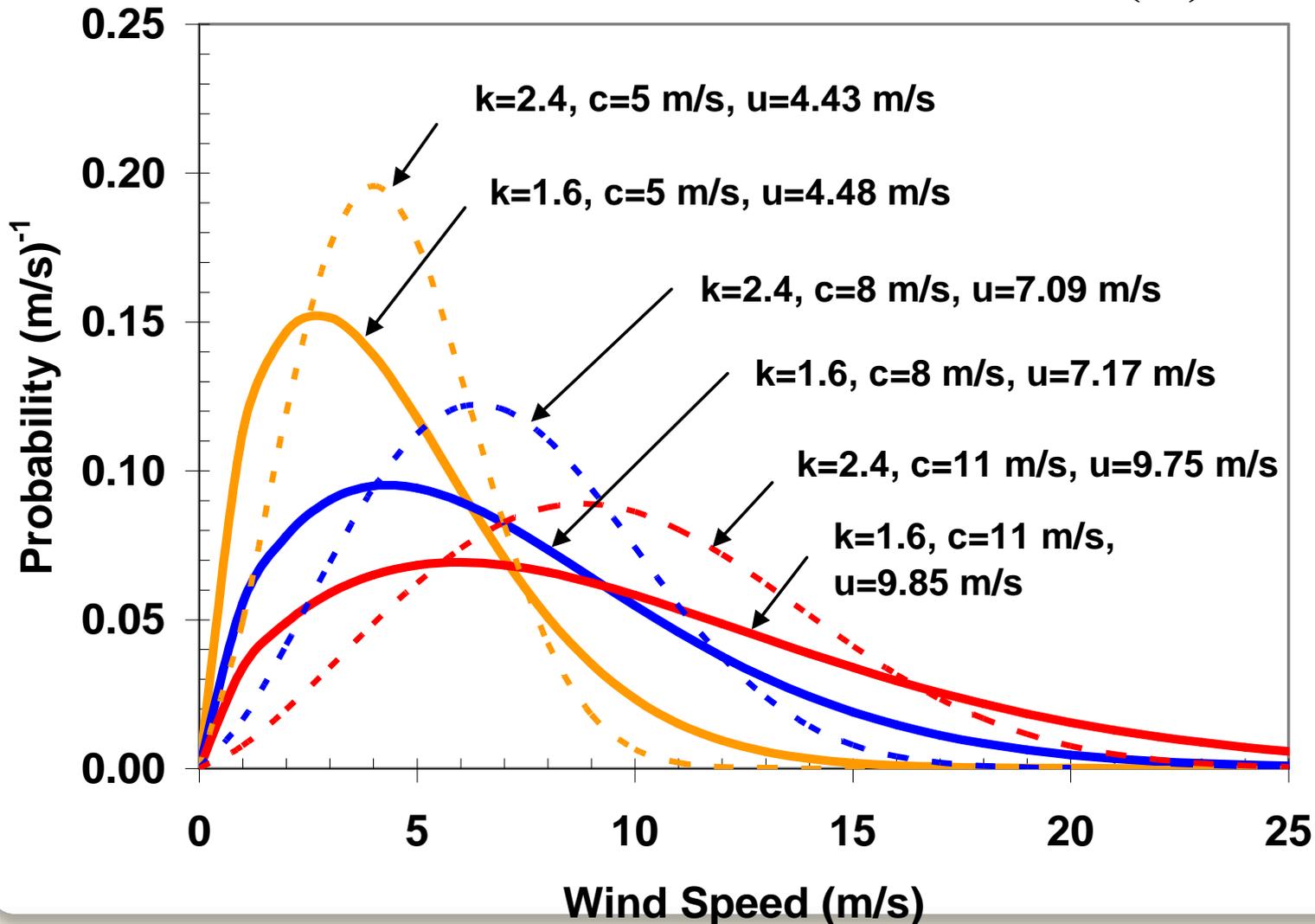
$$f(u) = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c} \right)^{k-1} e^{-(u/c)^k}$$



Distribuição da velocidade do vento

Distribuição de Weibull

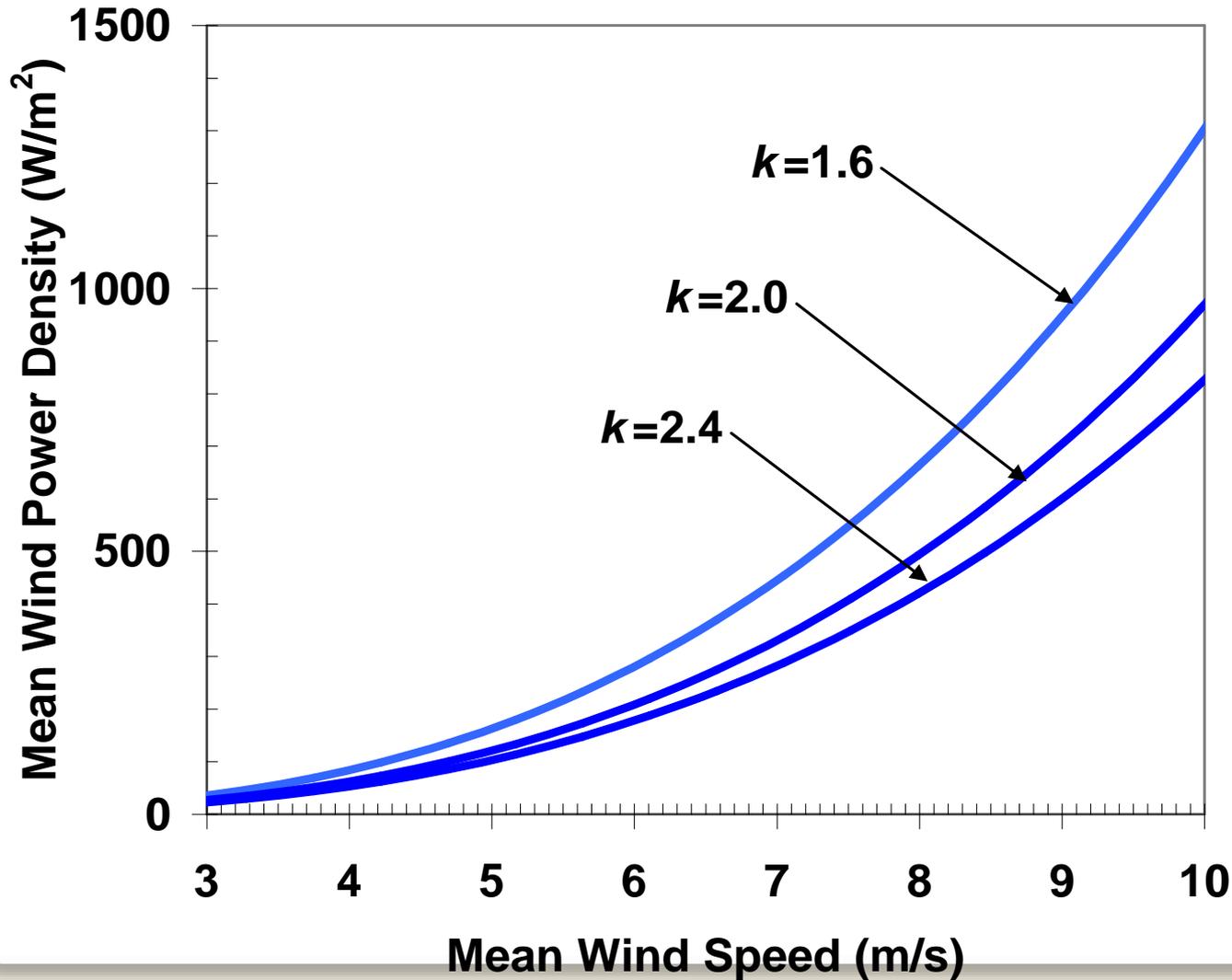
$$f(u) = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c} \right)^{k-1} e^{-(u/c)^k}$$



Distribuição da velocidade do vento

Distribuição de Weibull

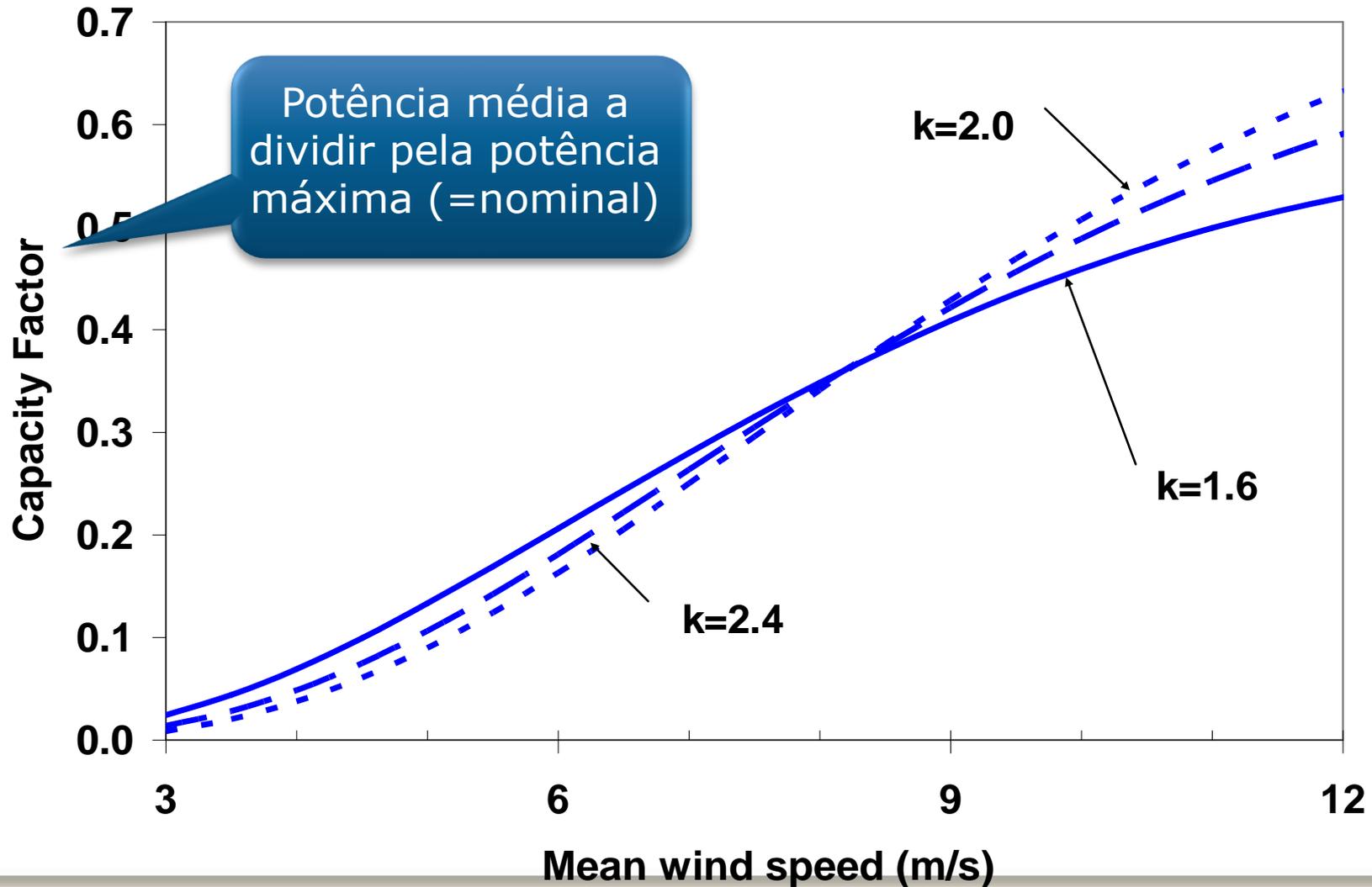
$$f(u) = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c} \right)^{k-1} e^{-(u/c)^k}$$



Distribuição da velocidade do vento

Distribuição de Weibull

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

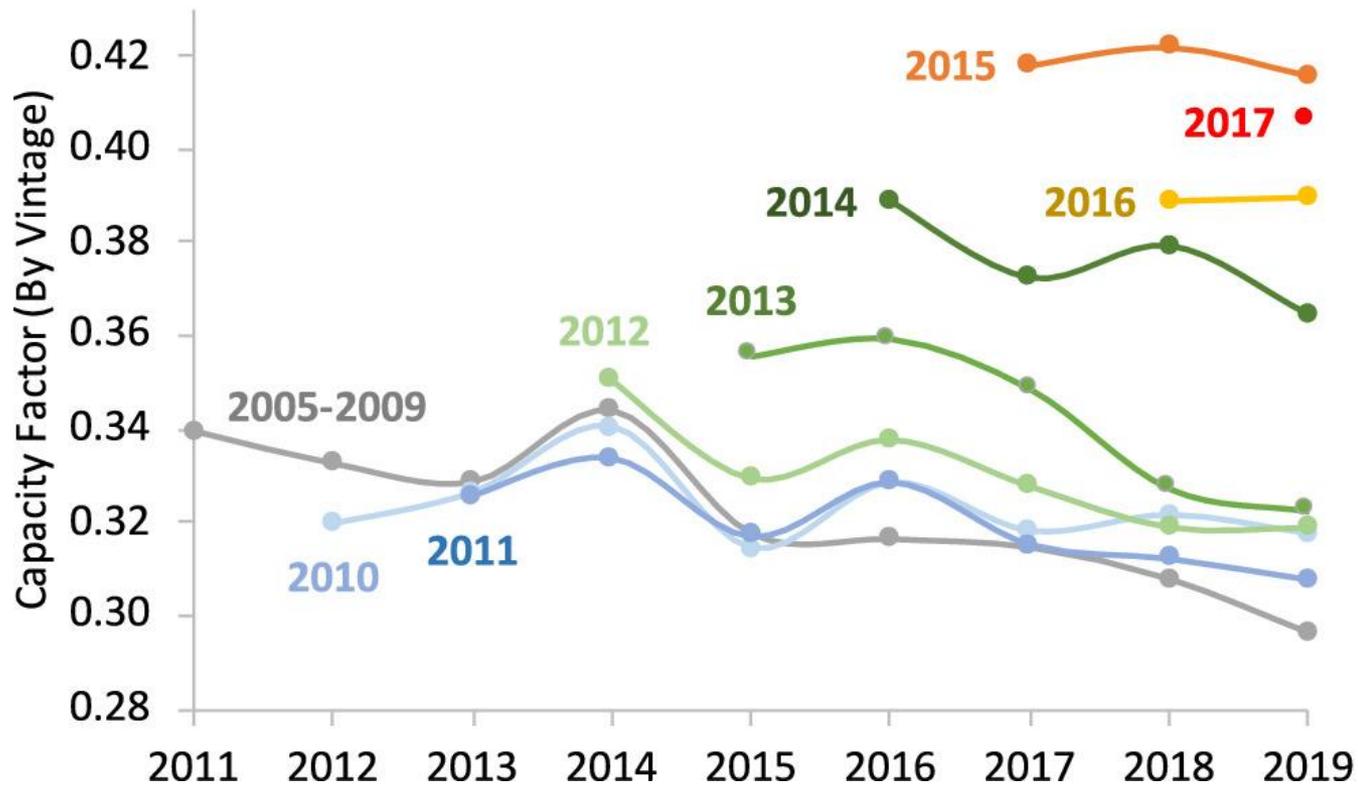


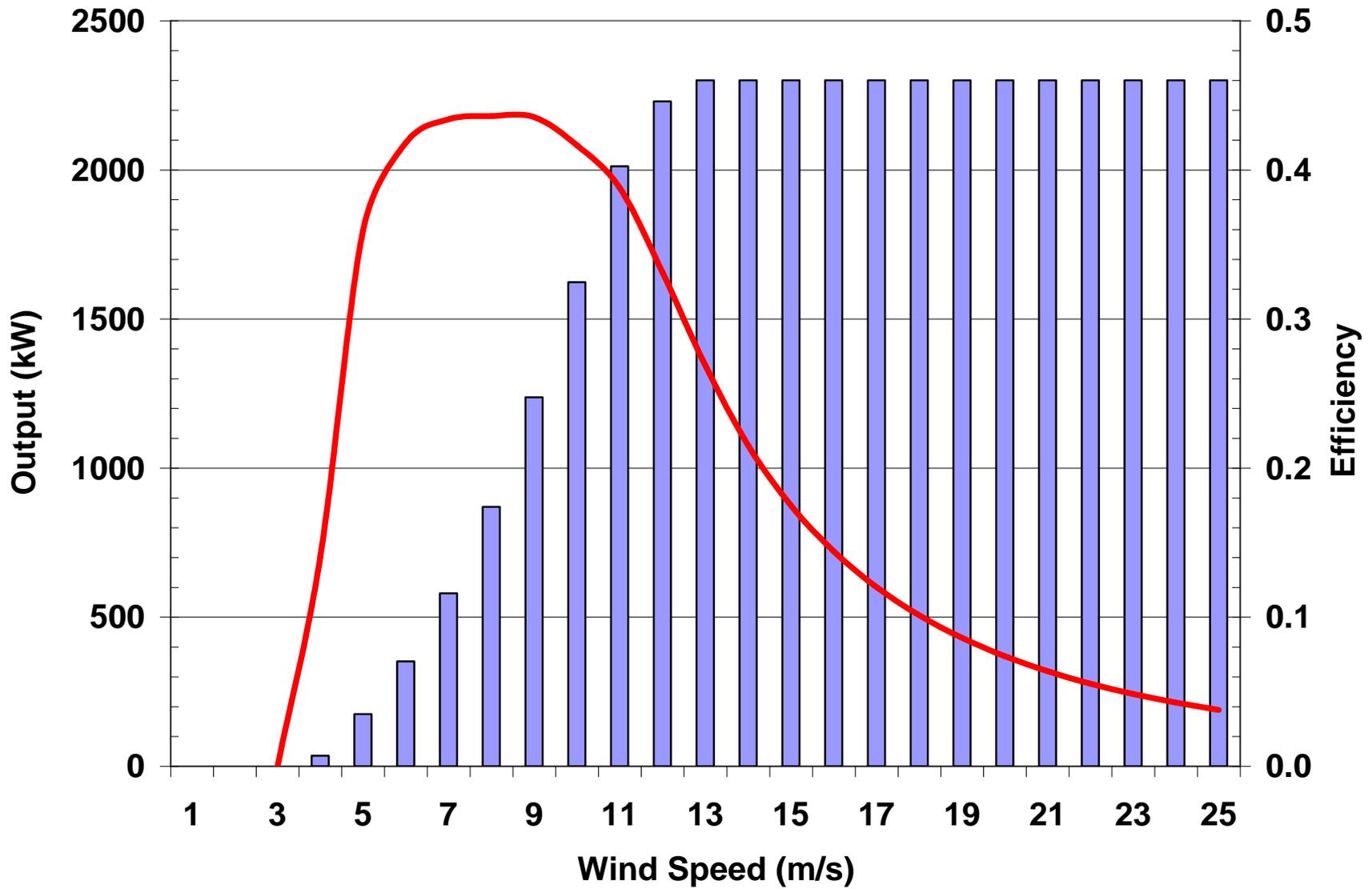
Factor de capacidade:

Potência média a dividir pela
potência máxima (=nominal)

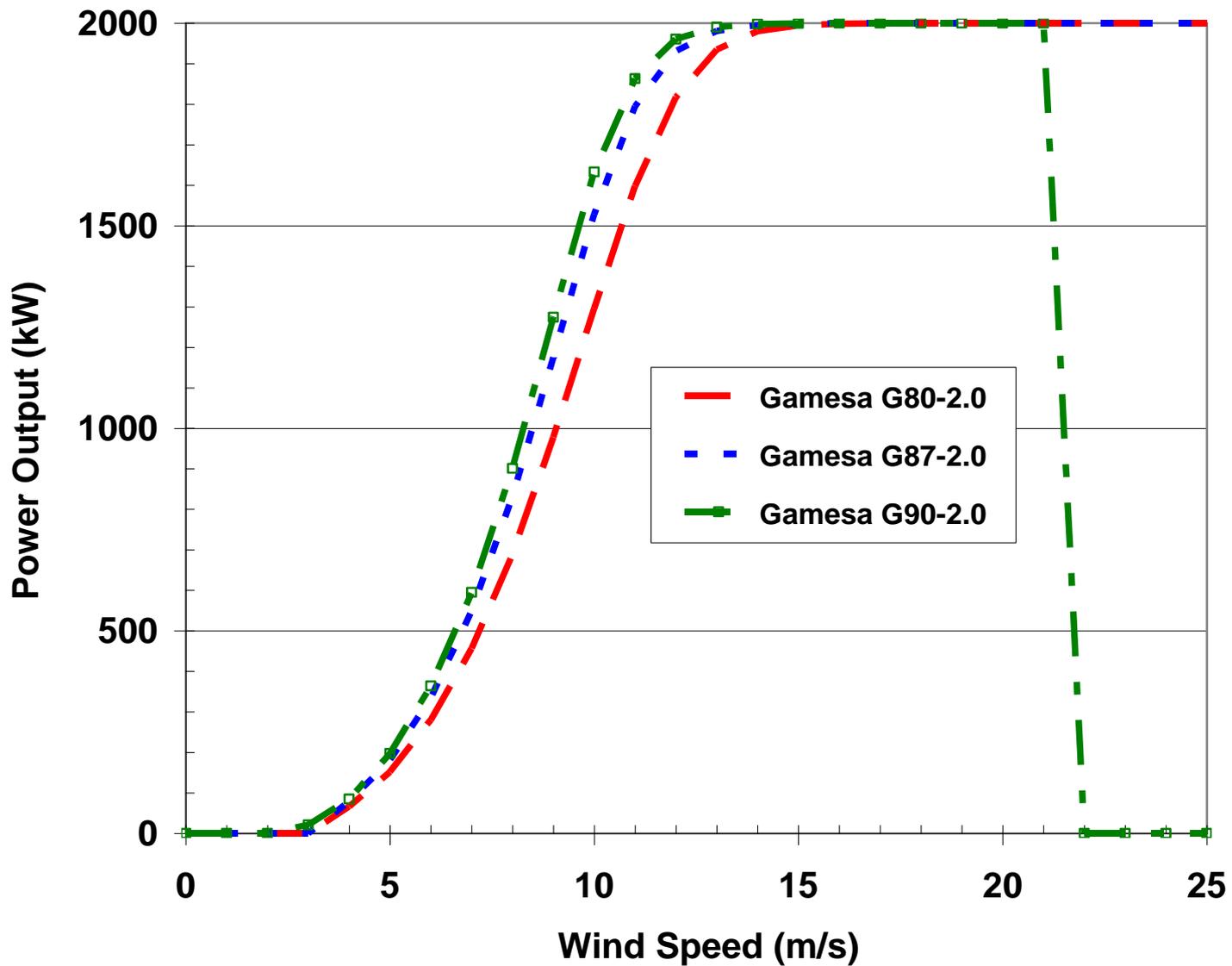
País	Factor de capacidade
Reino Unido	0.32
Grécia	0.29
Dinamarca	0.26
Espanha	0.24
Holanda	0.24
China	0.24
Suécia	0.24
Itália	0.23
Alemanha	0.21
India	0.20

Factor de capacidade:
Potência média a dividir pela
potência máxima (=nominal)

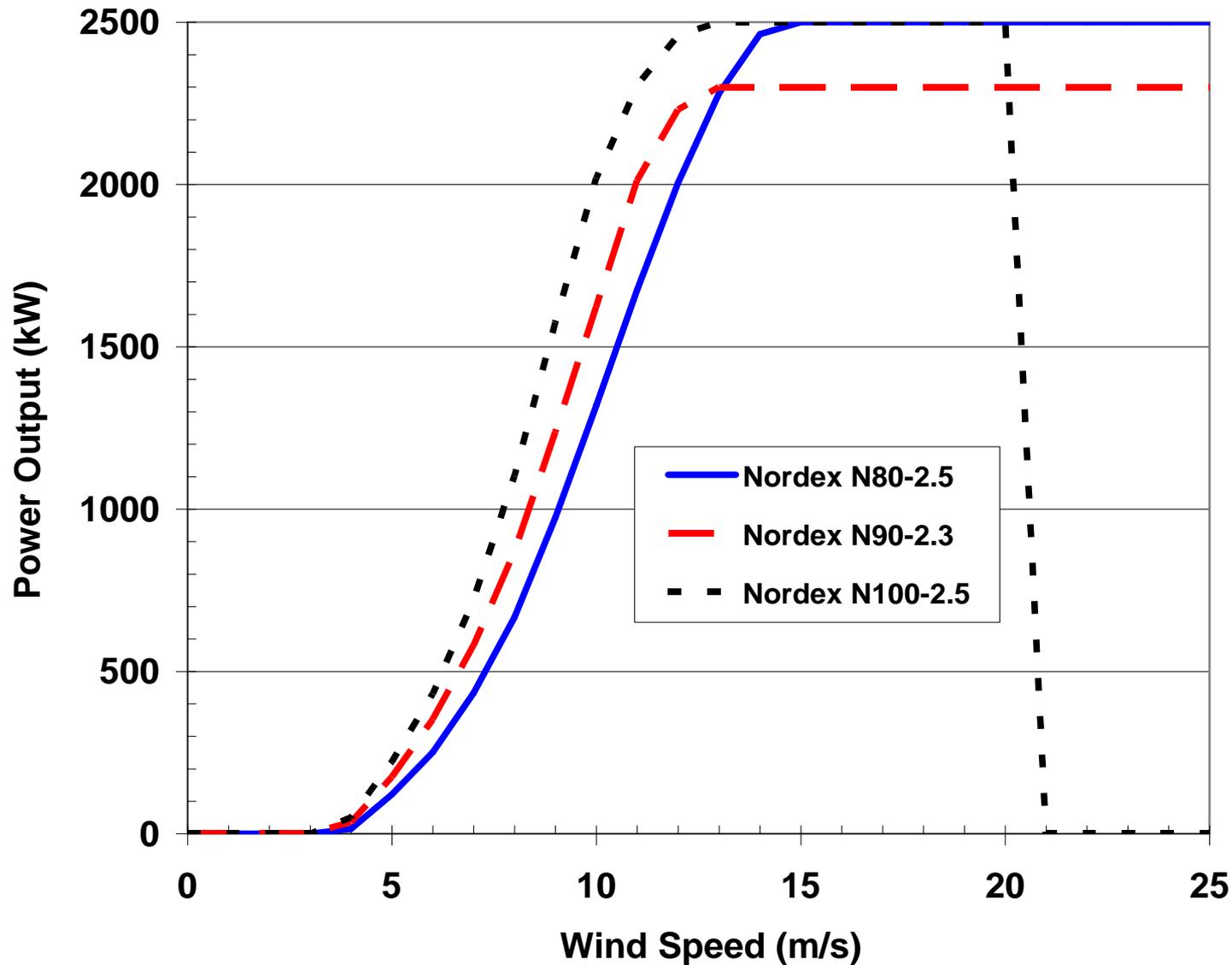




Eficiência diminui com velocidade de vento porque limitada à potência nominal



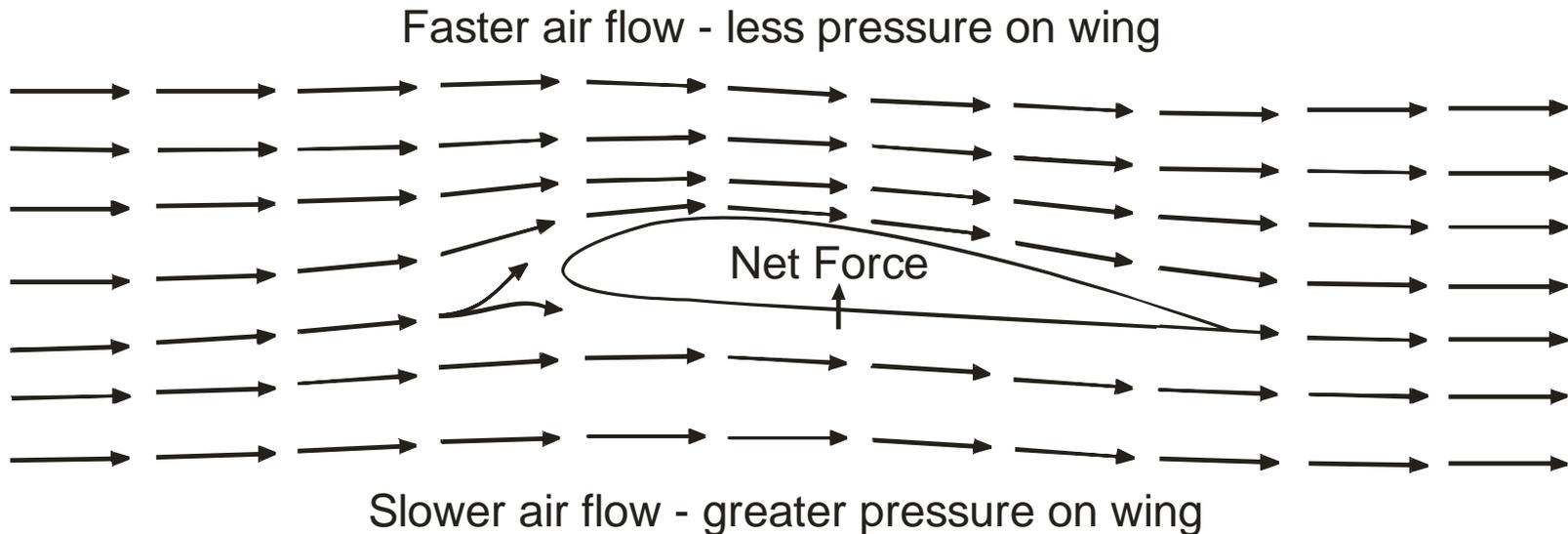
Curvas de potência para diferentes diâmetros de rotor



Curvas de potência para diferentes diâmetros de rotor e geradores

Qual a eficiência de uma turbina eólica

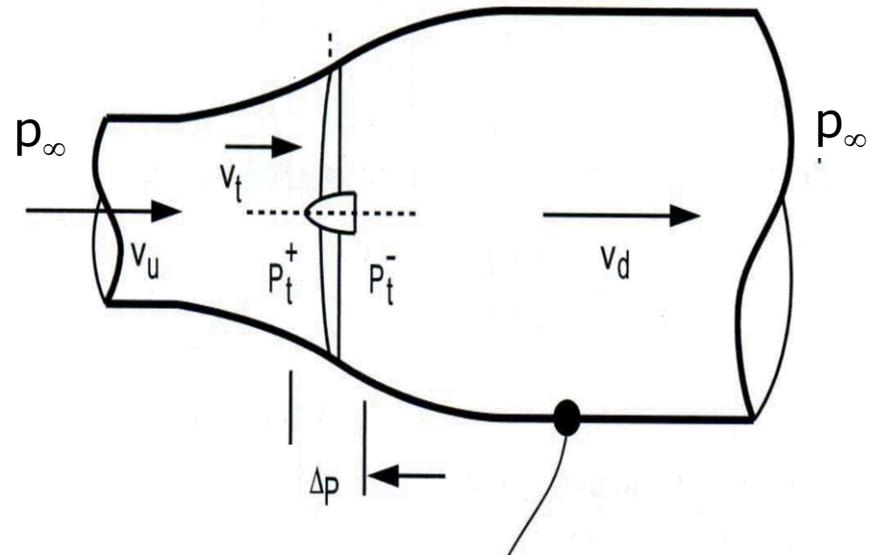
A pá de uma turbina funciona como uma asa de avião. O mecanismo é baseado na diferença de pressões nas duas faces da pá e não na força!



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

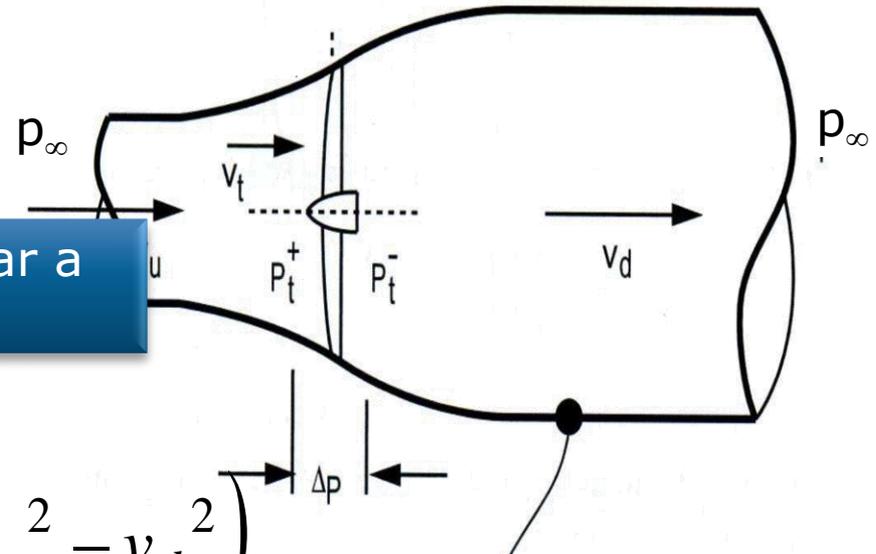
Trabalho realizado na turbina

$$W_t = (p_t^+ - p_t^-) \Phi = (p_t^+ - p_t^-) \frac{\text{volume}}{\Delta t}$$

$$= (p_t^+ - p_t^-) \frac{A v_t \Delta t}{\Delta t} = (p_t^+ - p_t^-) A v_t$$

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

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

$$V_u = V_t = V_d$$

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

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

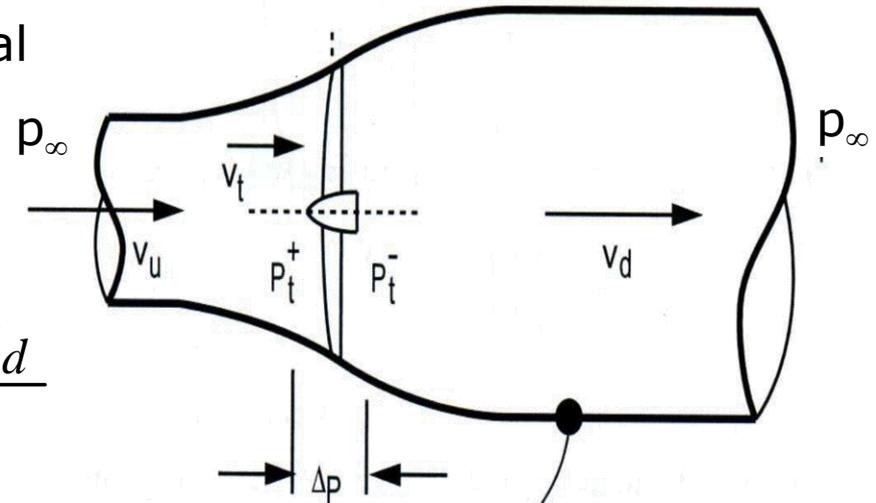
e portanto

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

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

$$V_u = V_t = V_d$$

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

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

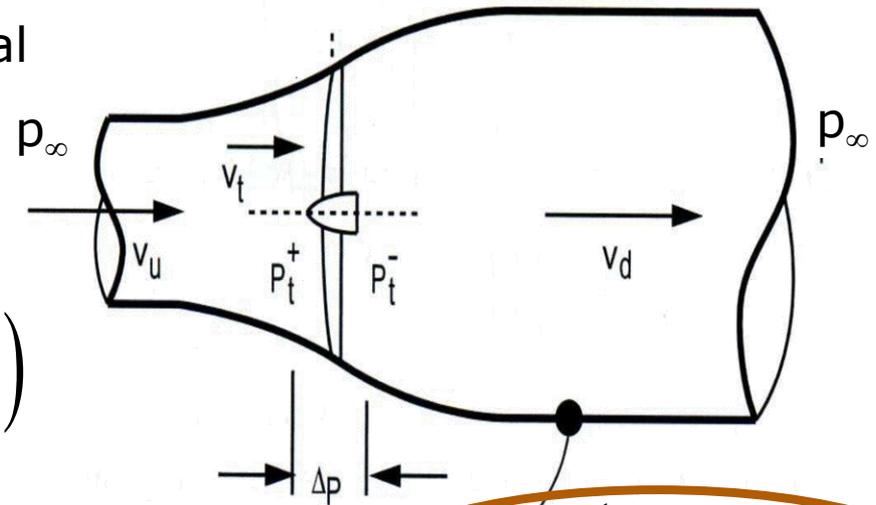
$$A_d = A_t \frac{v_t}{v_d}$$

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

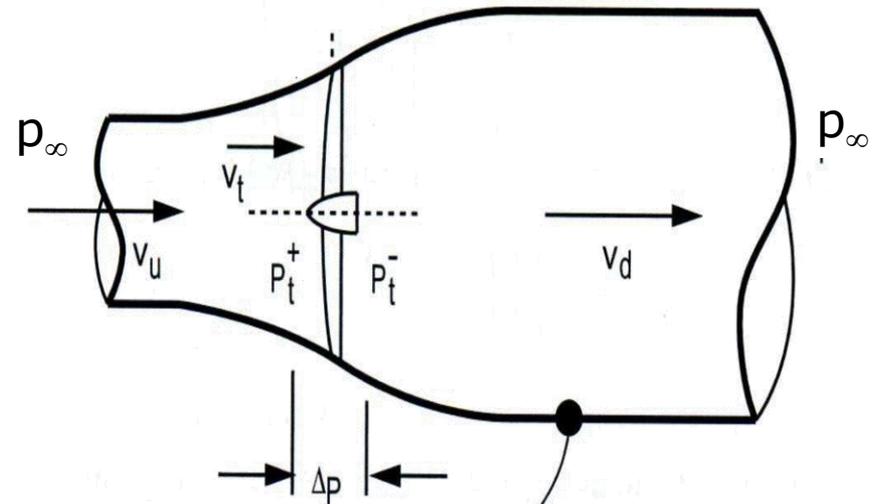
$$W_t = \frac{1}{2} A \rho (v_u^2 - v_d^2) v_t = \frac{1}{4} A \rho (v_u^2 - v_d^2) (v_u + v_d)$$
$$= \frac{1}{4} A \rho v_u^3 (1 - \alpha^2) (1 + \alpha) \quad \text{com} \quad \alpha \equiv \frac{v_d}{v_u}$$

Eficiência máxima possível

$$\frac{\partial W_t}{\partial \alpha} = 0$$

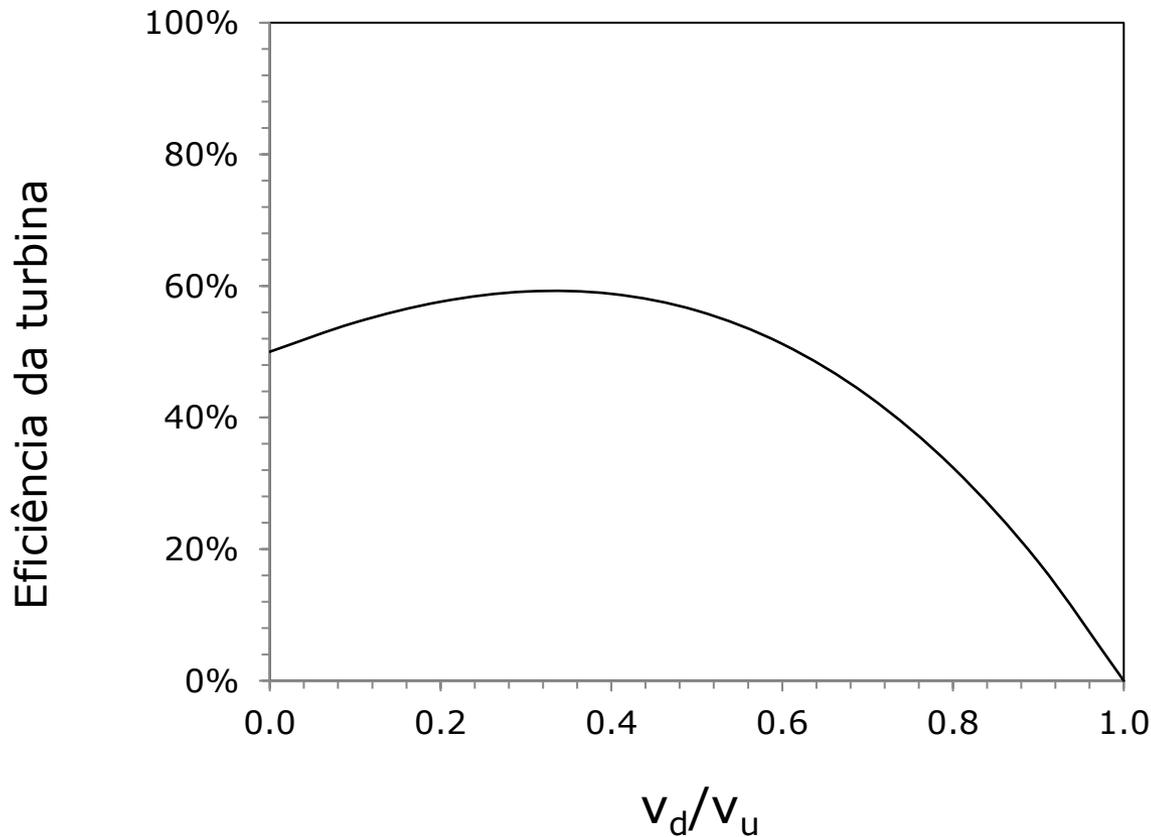
$$-2\alpha(1 + \alpha) + (1 - \alpha^2) = 0$$

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



Limite de Betz

Qual a eficiência de uma turbina eólica



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

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%

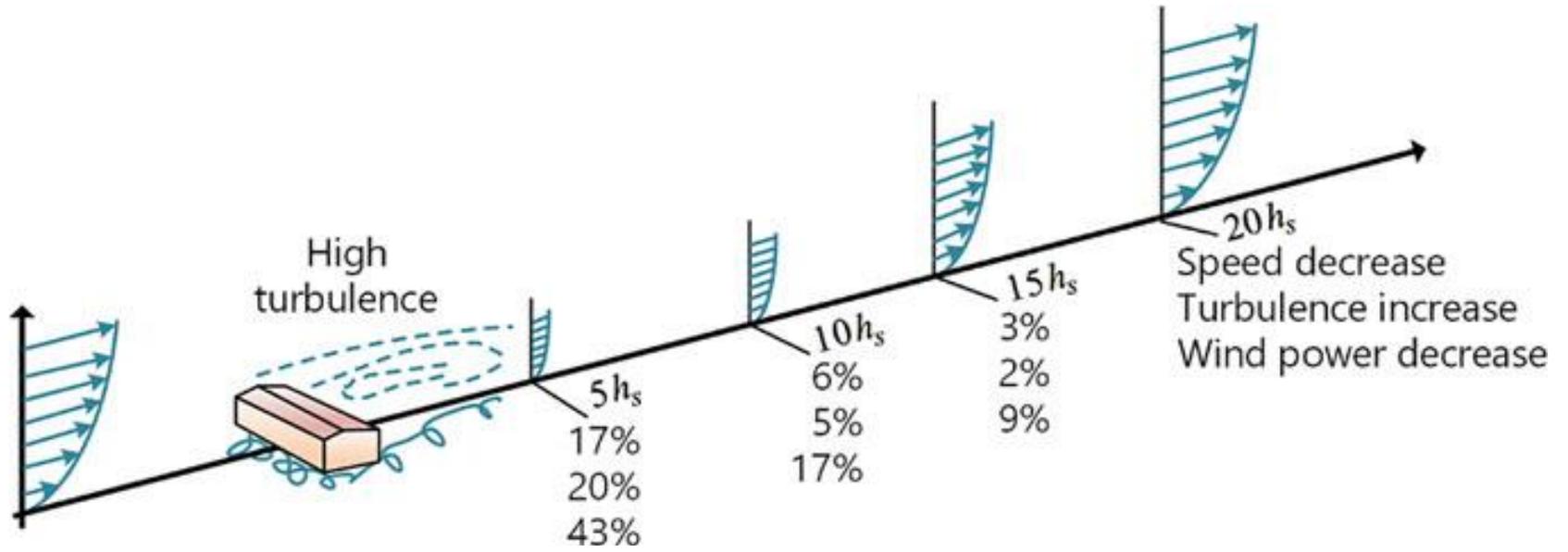
= 25% (valor médio) x 96-99% x 96-99%

Fiquei aqui

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

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

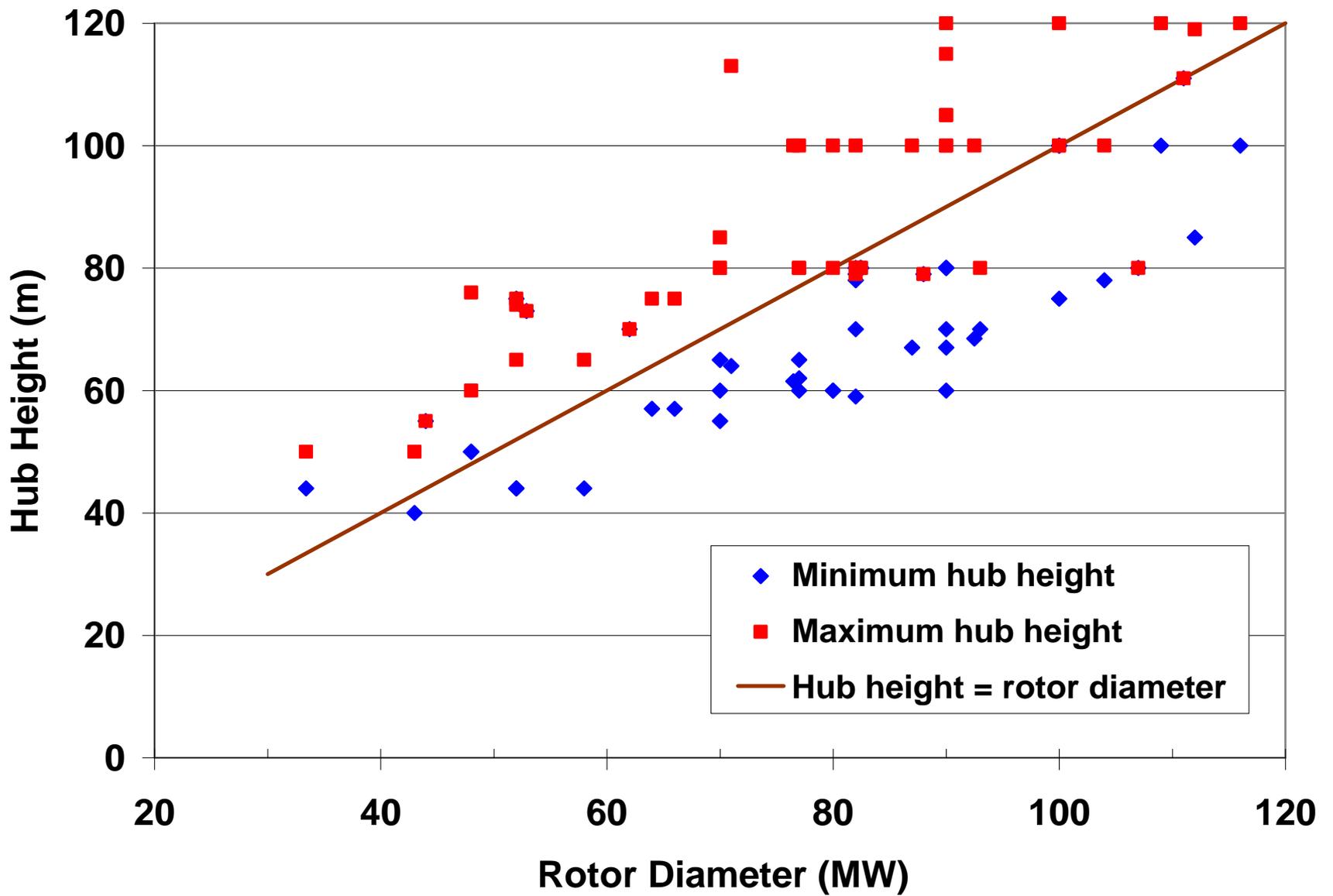
Qual a densidade de energia de uma parque eólico



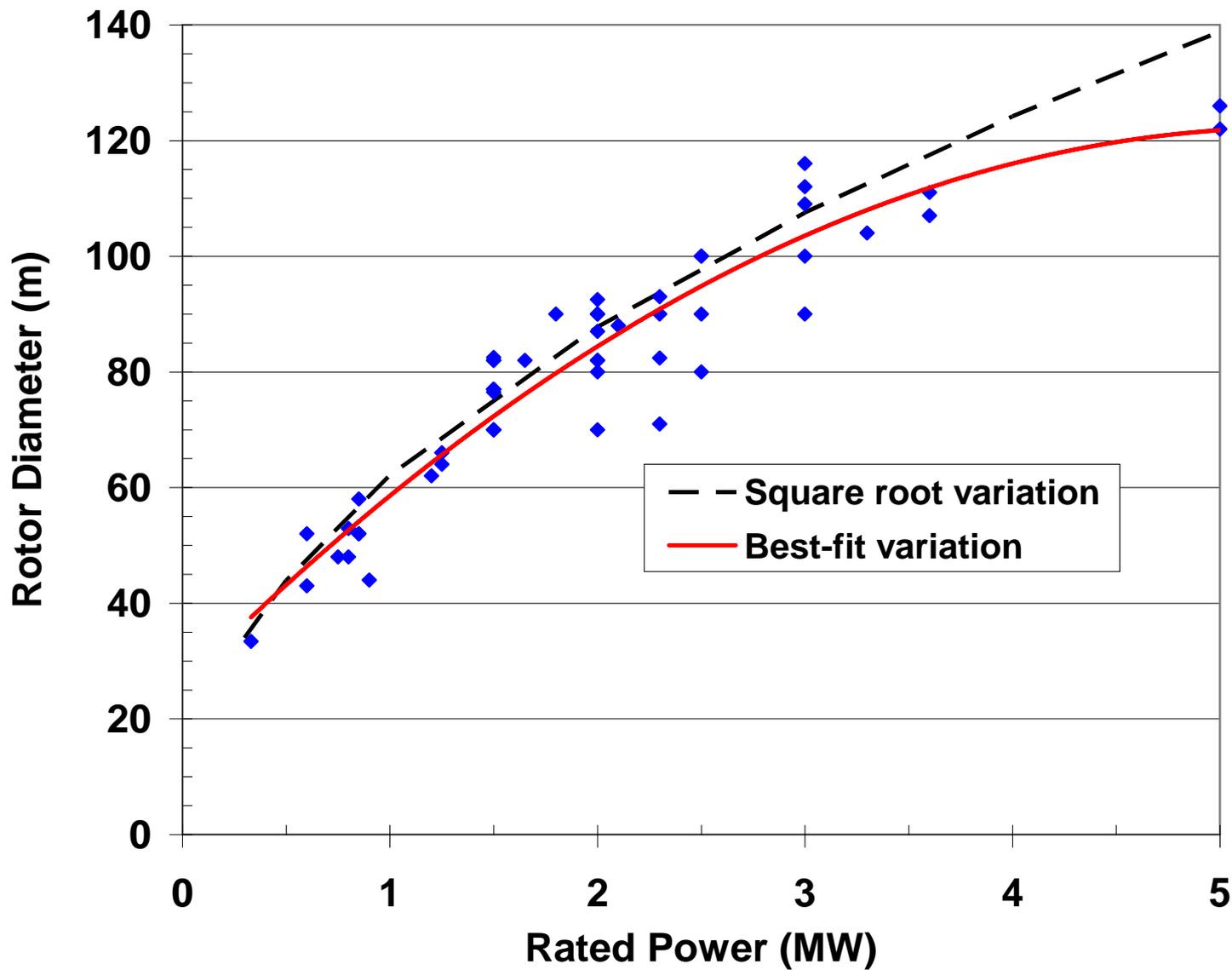
Assumindo

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

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?

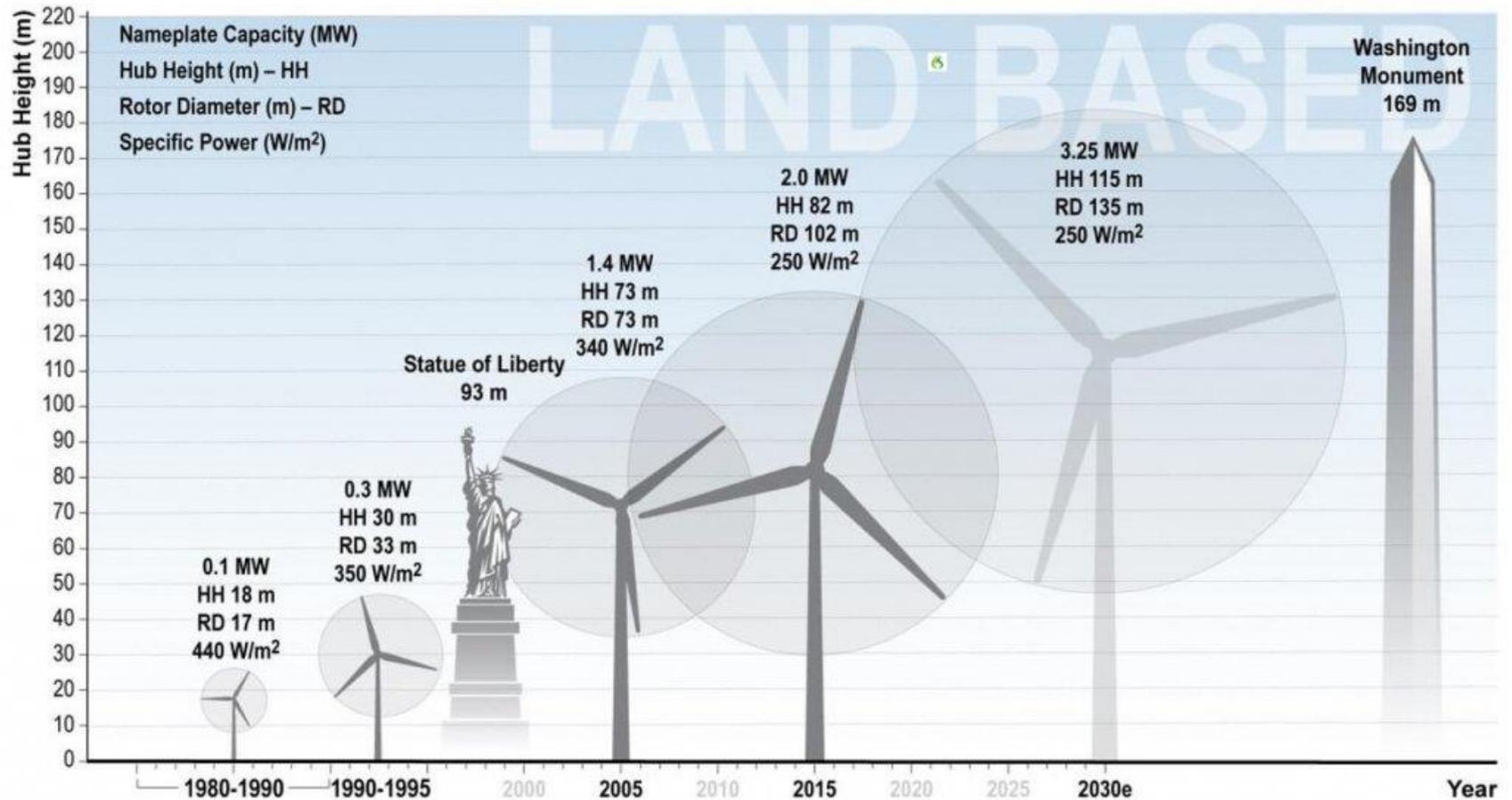


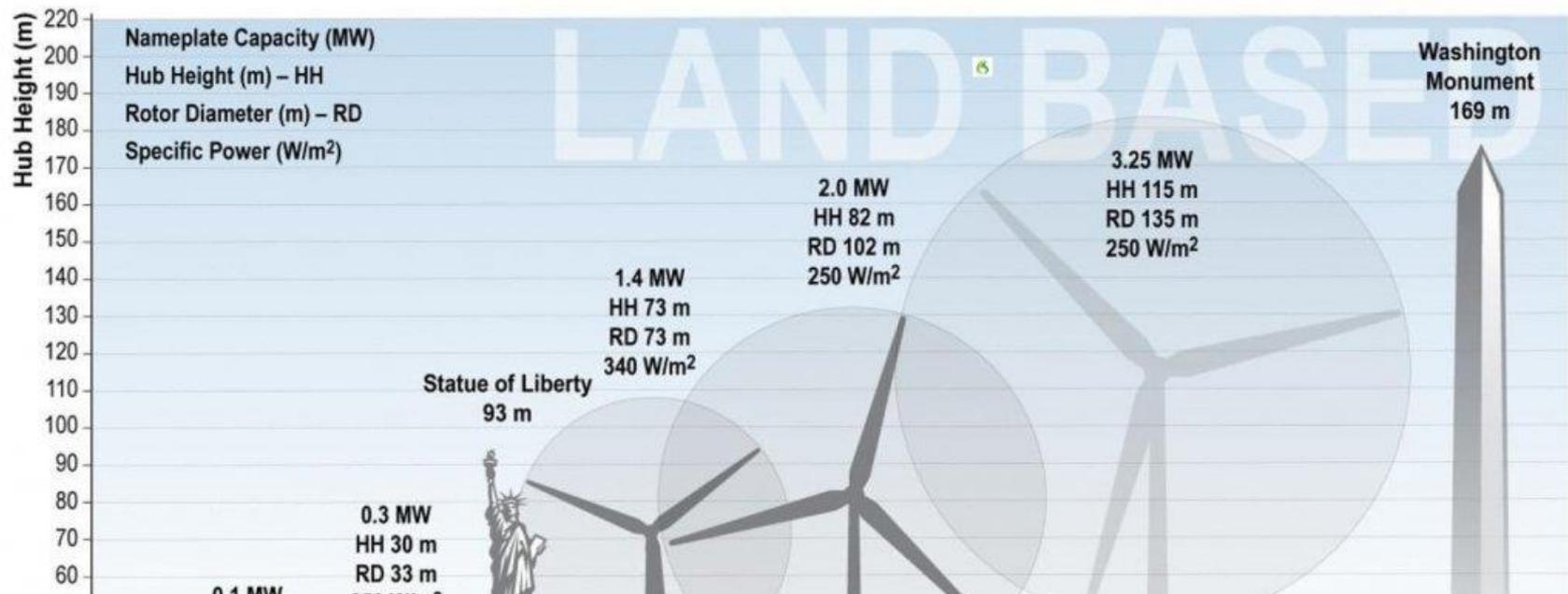
Figure 1. Expected Growth in Land-Based Turbine Size in North America

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



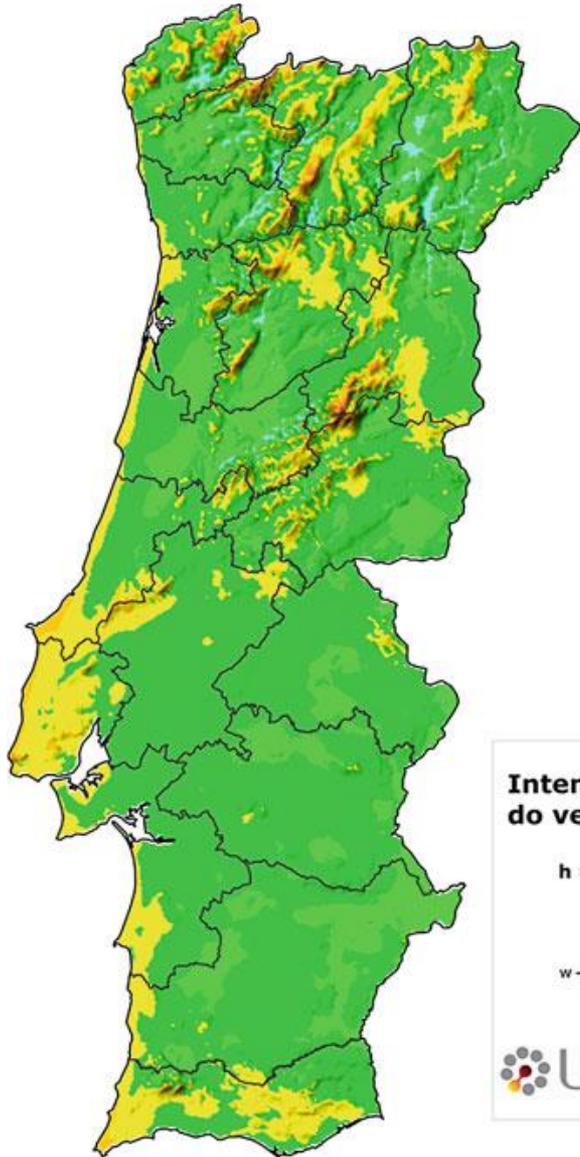
- Como a potência aumenta com v^3 e a velocidade média da vento aumenta com a altura, turbinas mais altas produzem mais do que turbinas menores
- A diferença entre vento no topo e fundo das pás é menor quanto mais alta a turbina
- A turbulência diminui com altura, e portanto distribuição de vento também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

Se a densidade de energia (kWh/m^2) não depende da potência, porquê fazer cada vez maiores turbinas?



- 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

80 m altura



Intensidade do vento

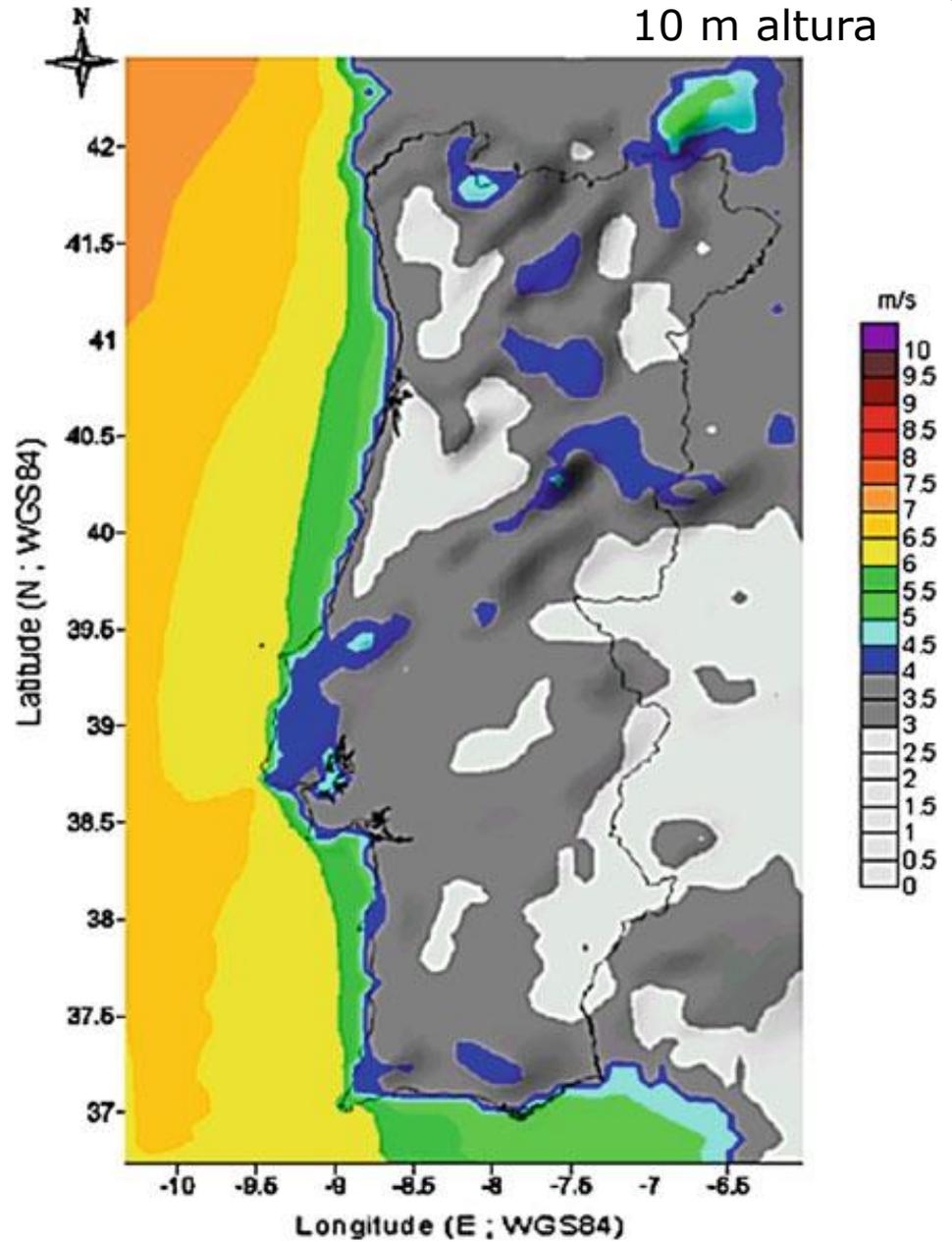
h = 80m



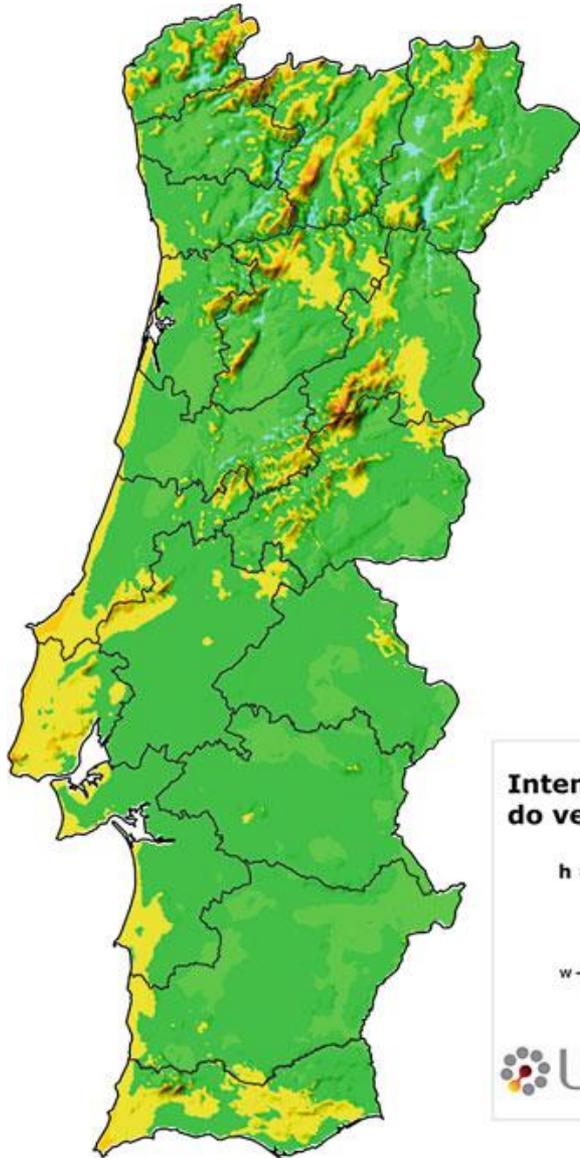
LNEG



10 m altura



80 m altura



Intensidade do vento

h = 80m

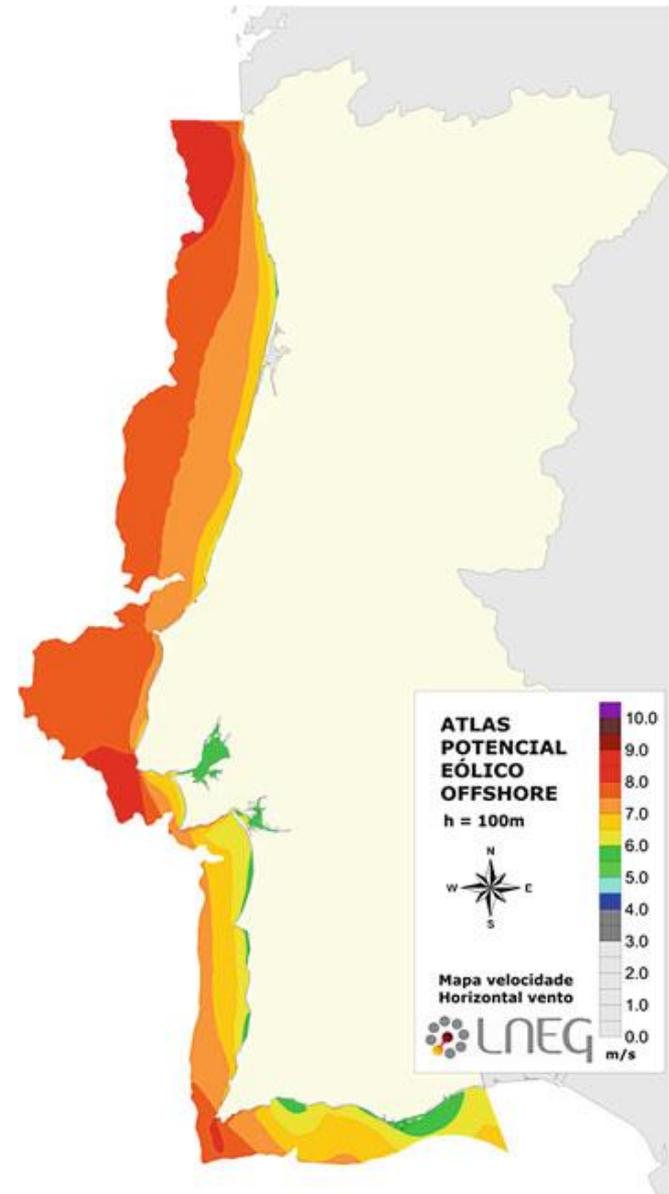


LNEG

m/s



100 m altura



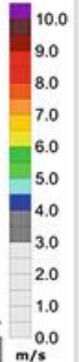
ATLAS POTENCIAL EÓLICO OFFSHORE
h = 100m



Mapa velocidade Horizontal vento

LNEG

m/s



Parques eólicos *offshore*

Menos restrições de espaço

menor impacto visual

maior fator de capacidade (40-50% em vez de 20-25%)

maior produção de eletricidade (2x)

Condições adversas para instalação e manutenção

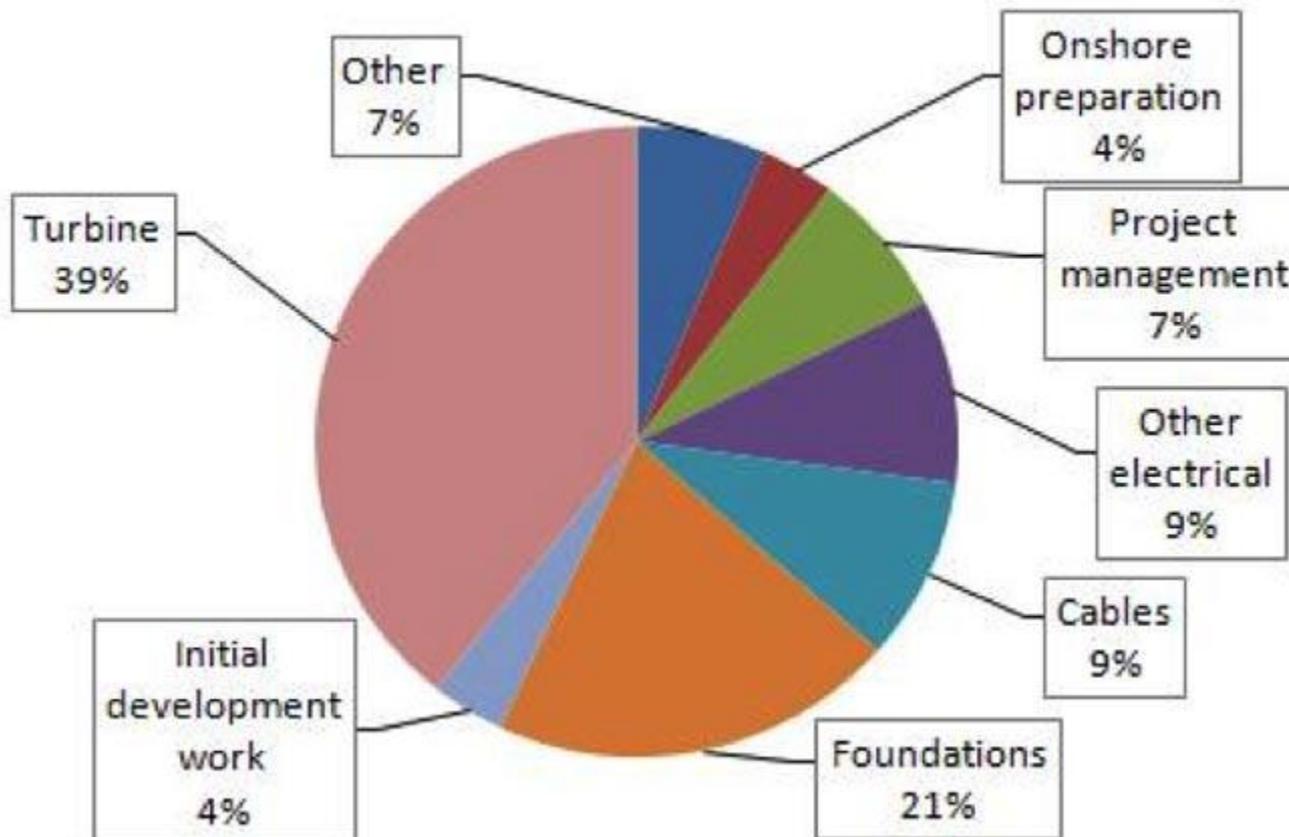
Tecnologia pouco madura, especialmente para turbinas flutuantes.

custos mais elevados (2-3x)

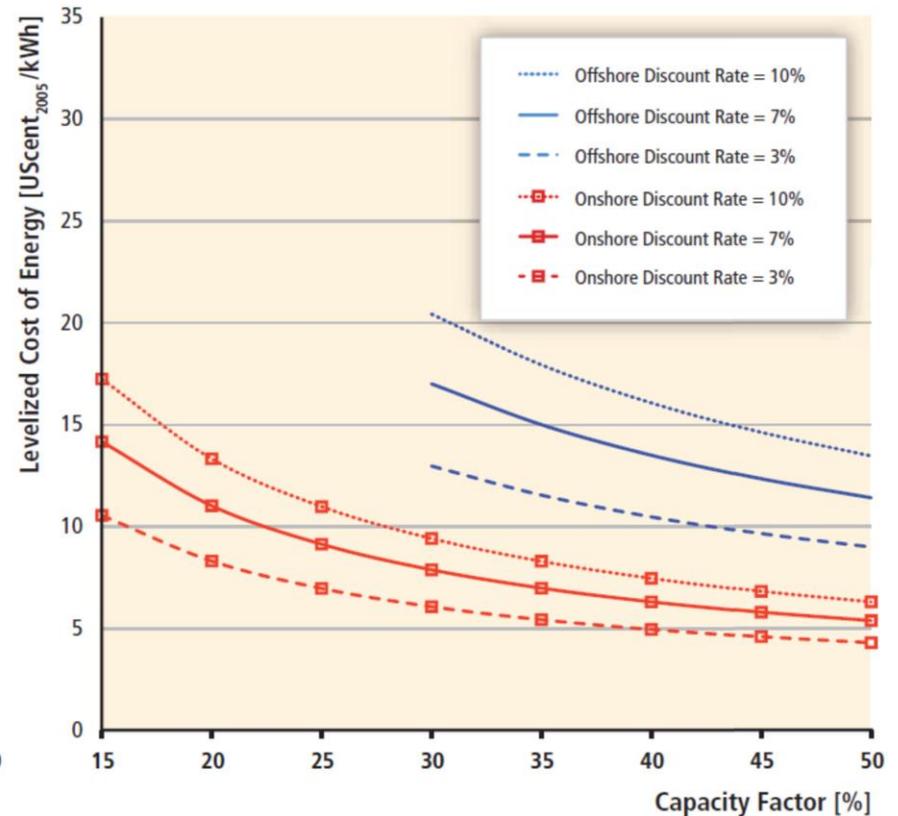
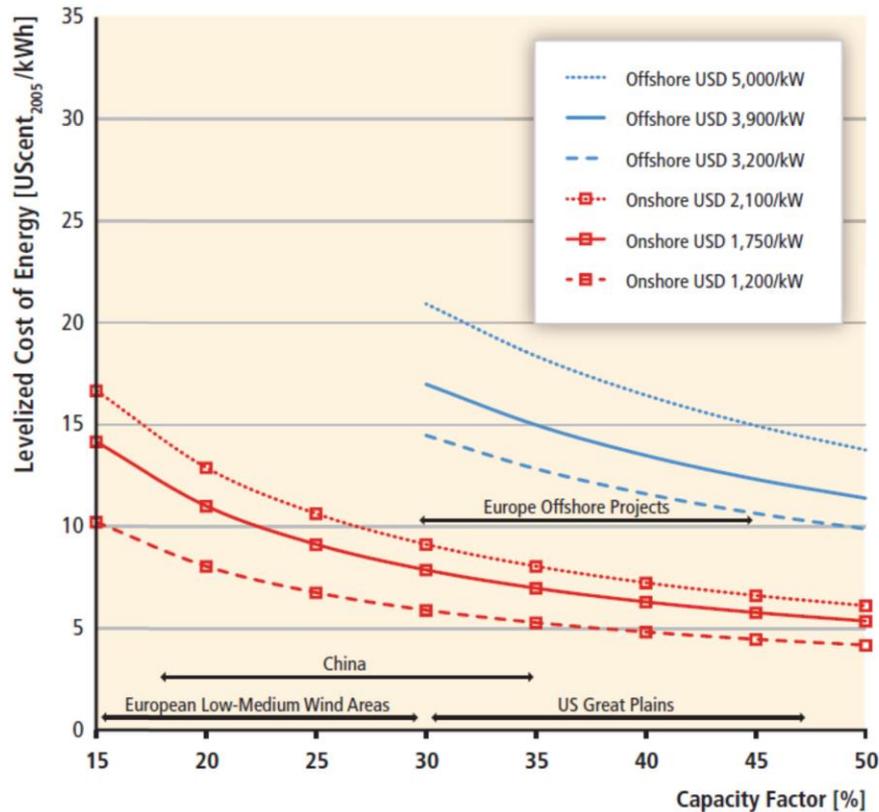


Parques eólicos offshore

Typical offshore wind energy project costs



Parques eólicos offshore



Apesar de mais caro, o aumento do fator de capacidade pode levar a menos custos de produção de eletricidade

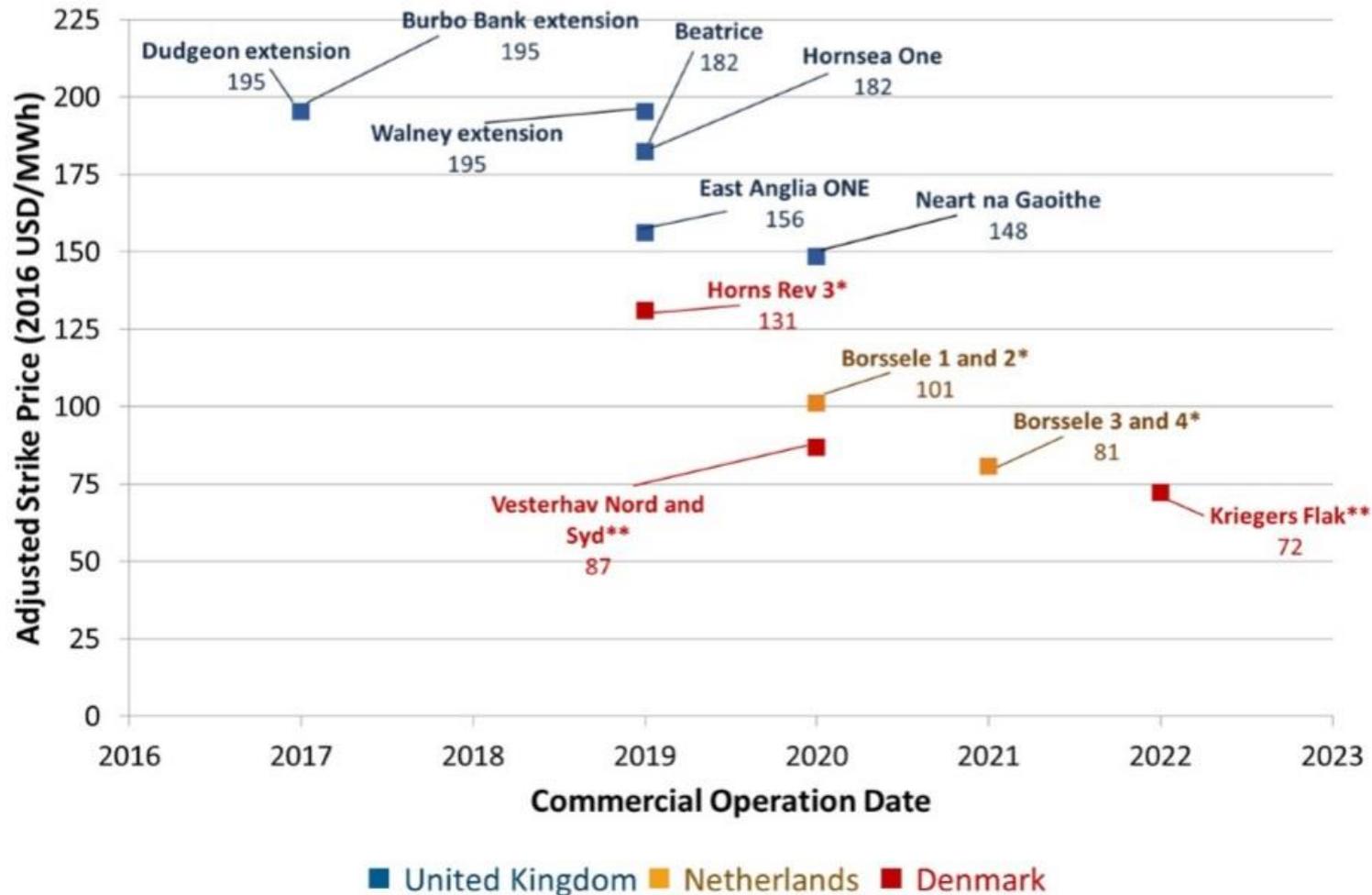
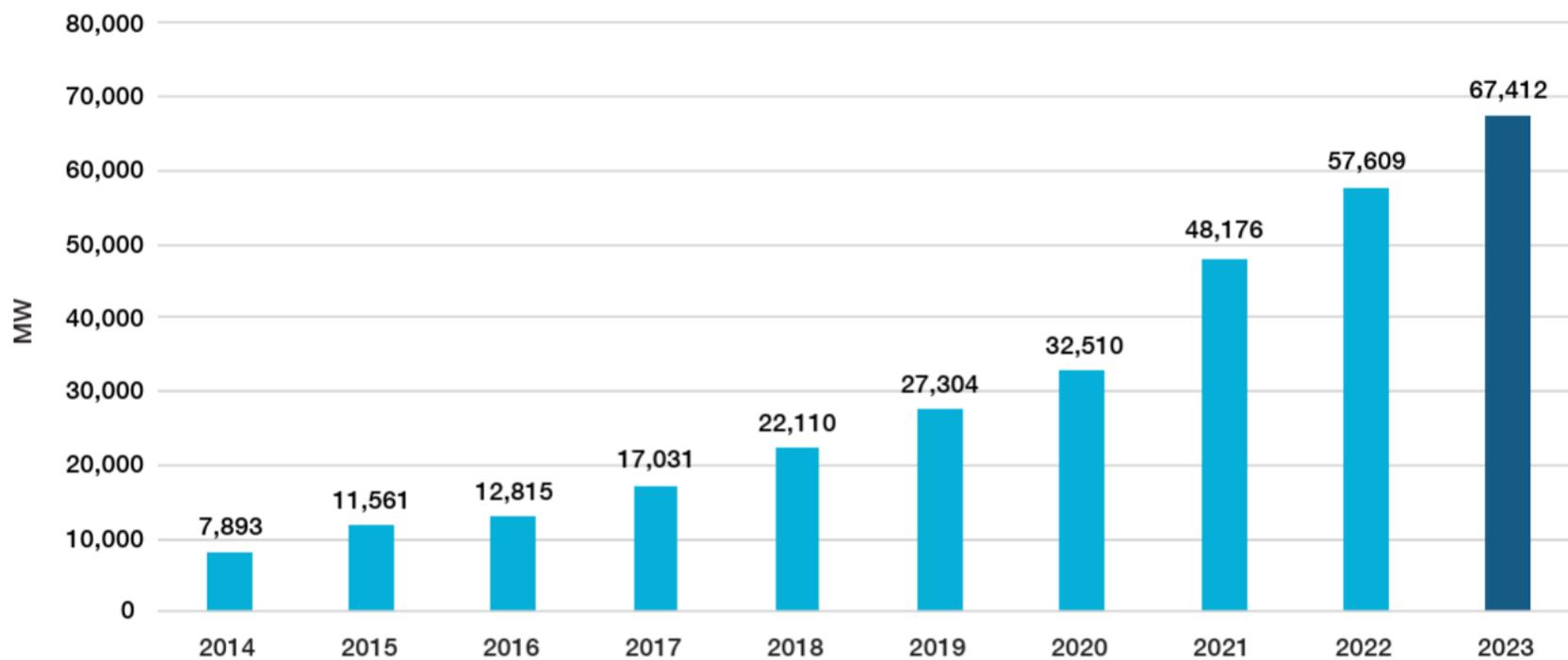
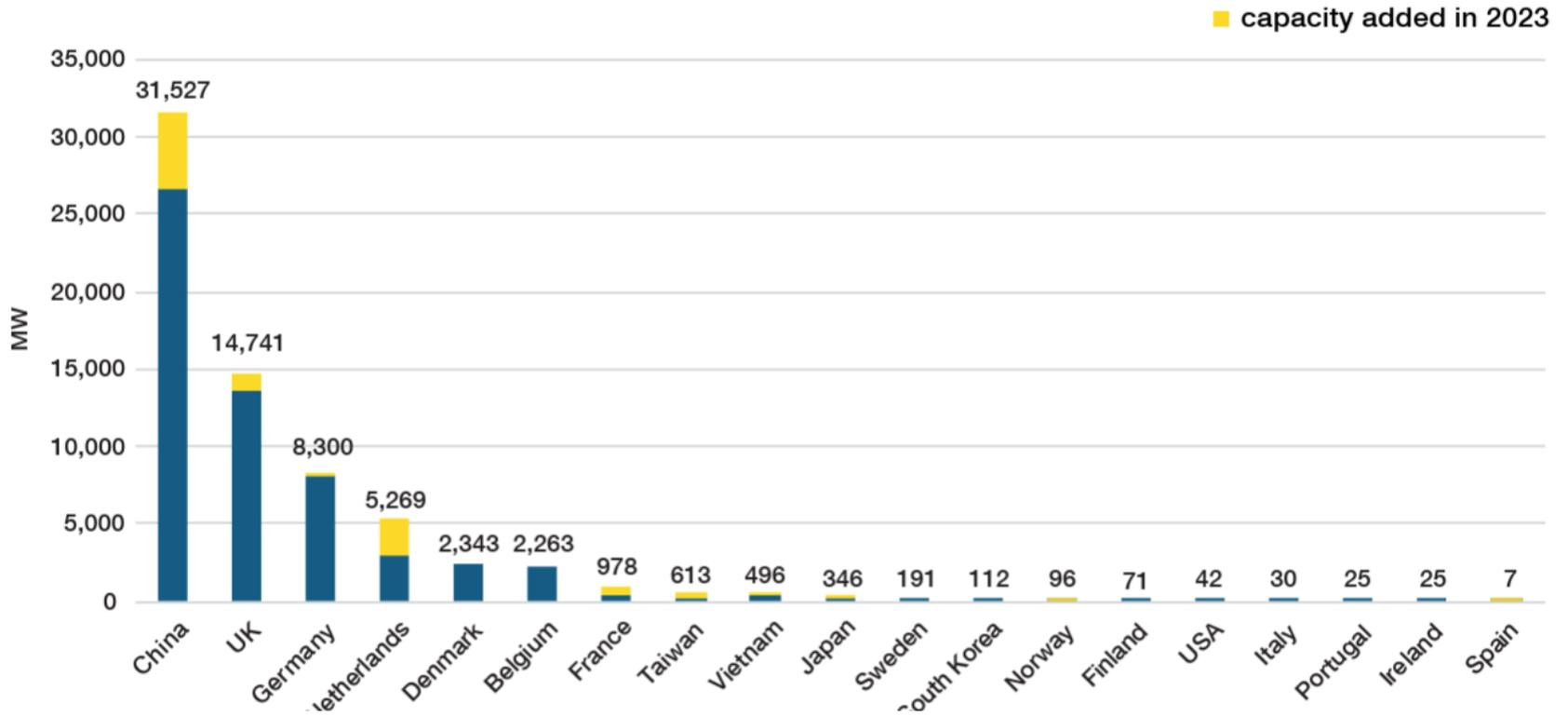


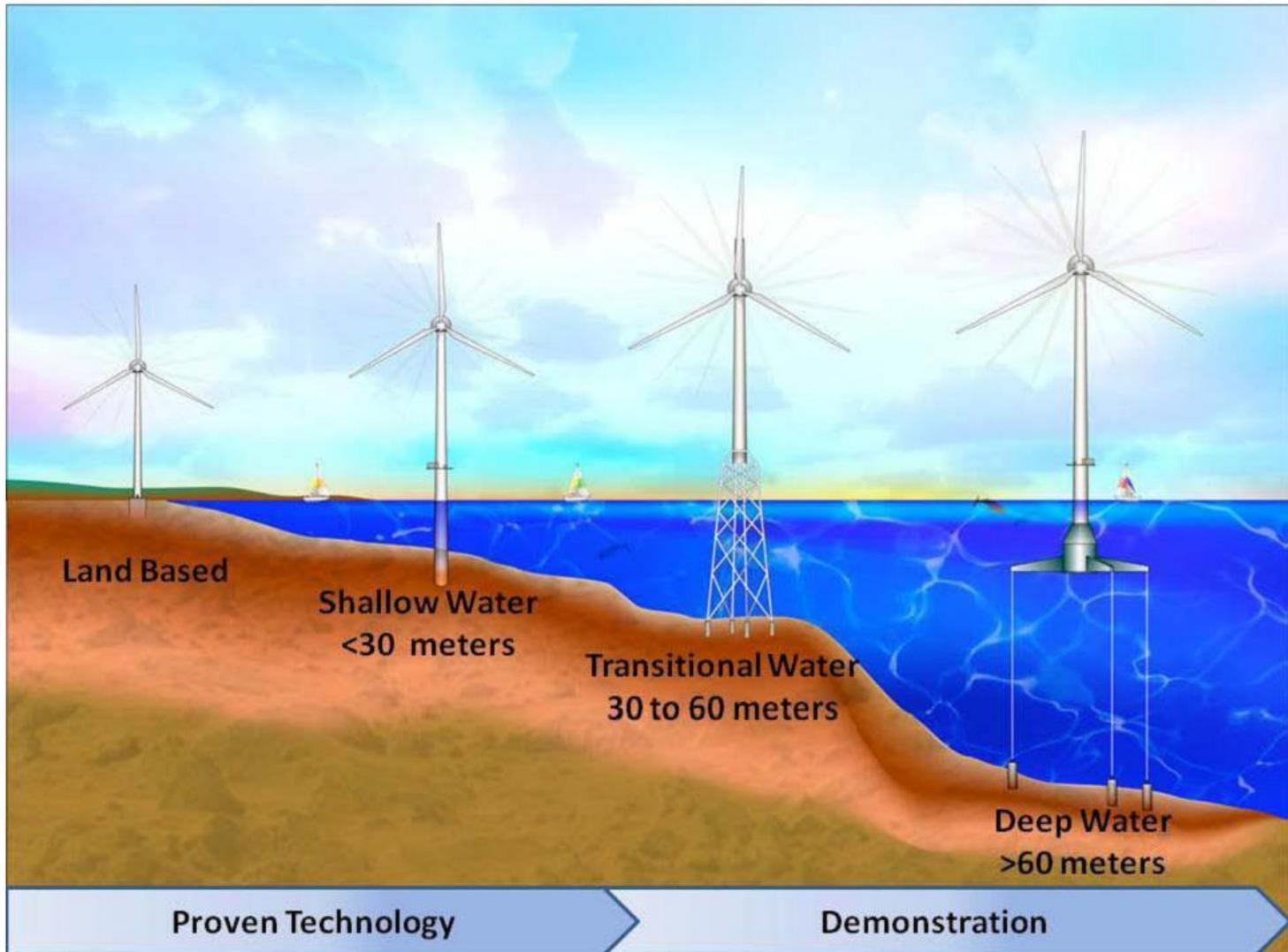
Figure 1. Recent strike prices of European offshore wind winning tenders adjusted to U.S. dollars, with grid cost, development cost, and contract length adders

Global offshore wind capacity in operation¹ - Cumulative

IN OPERATION









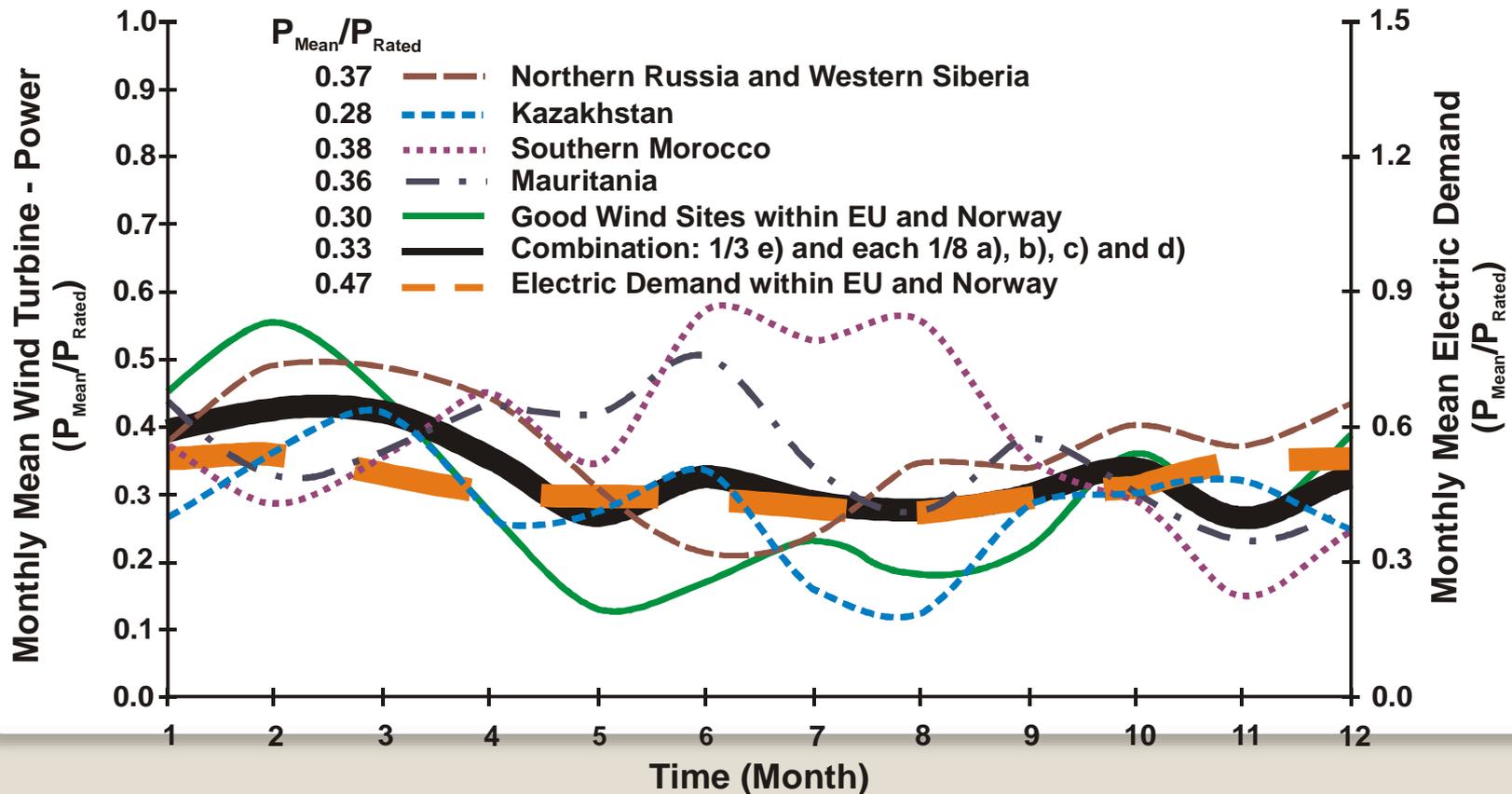
IMPACTOS

kahoot

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

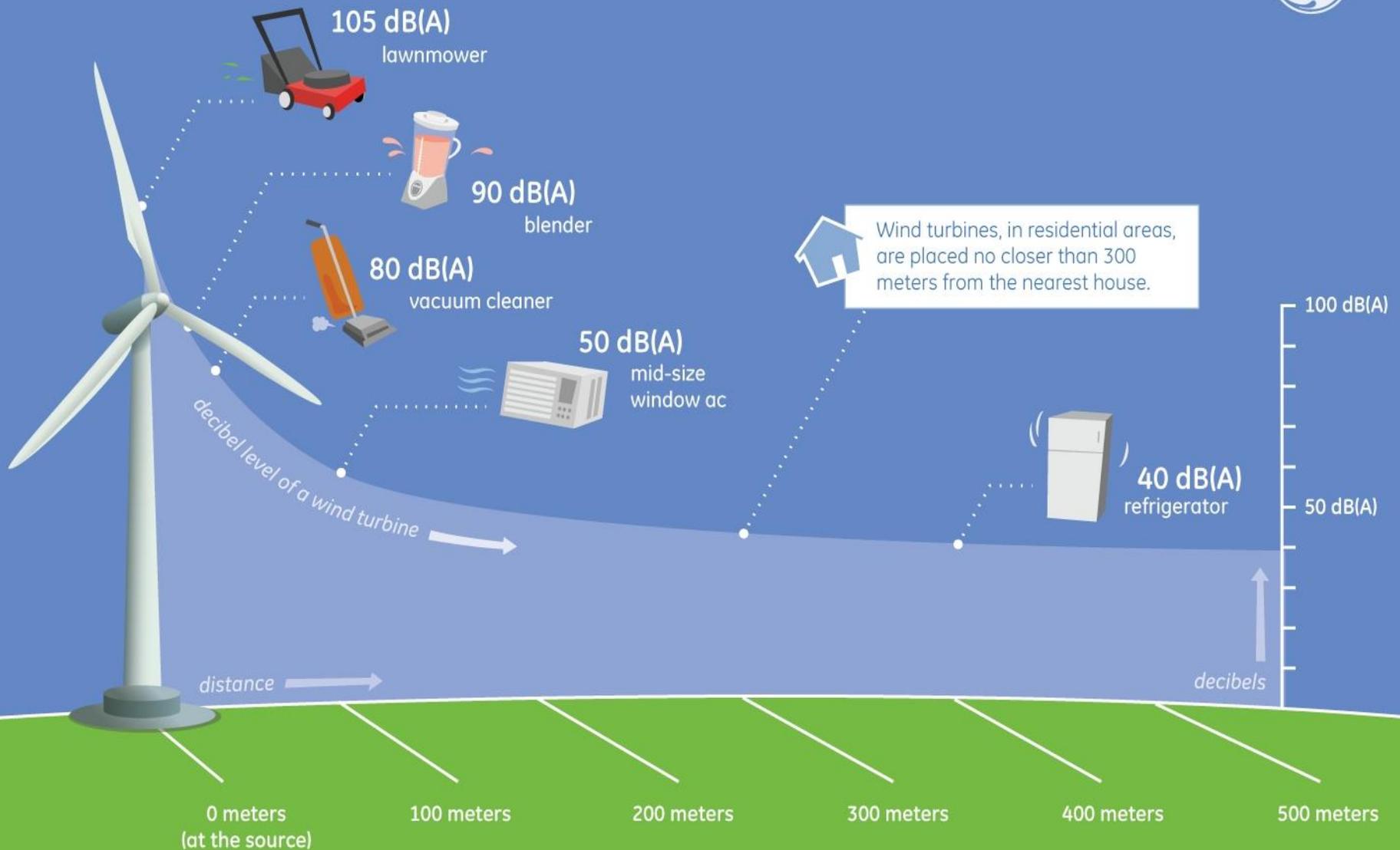
Soluções/remédios

- **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?)

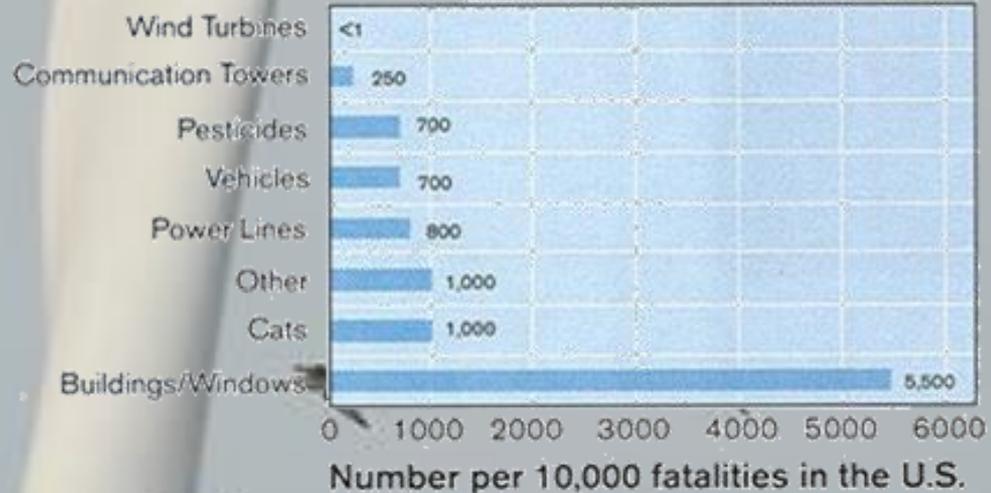
Impactos relevantes do desenvolvimento de parques eólicos

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

How Loud Is A Wind Turbine?



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





ECONOMIA

Proposta do Governo para eólicas no mar coloca em risco a ave marinha mais ameaçada da Europa

Das cinco áreas propostas para aumentar a capacidade eólica portuguesa em alto mar uma delas entra dentro de uma área protegida.

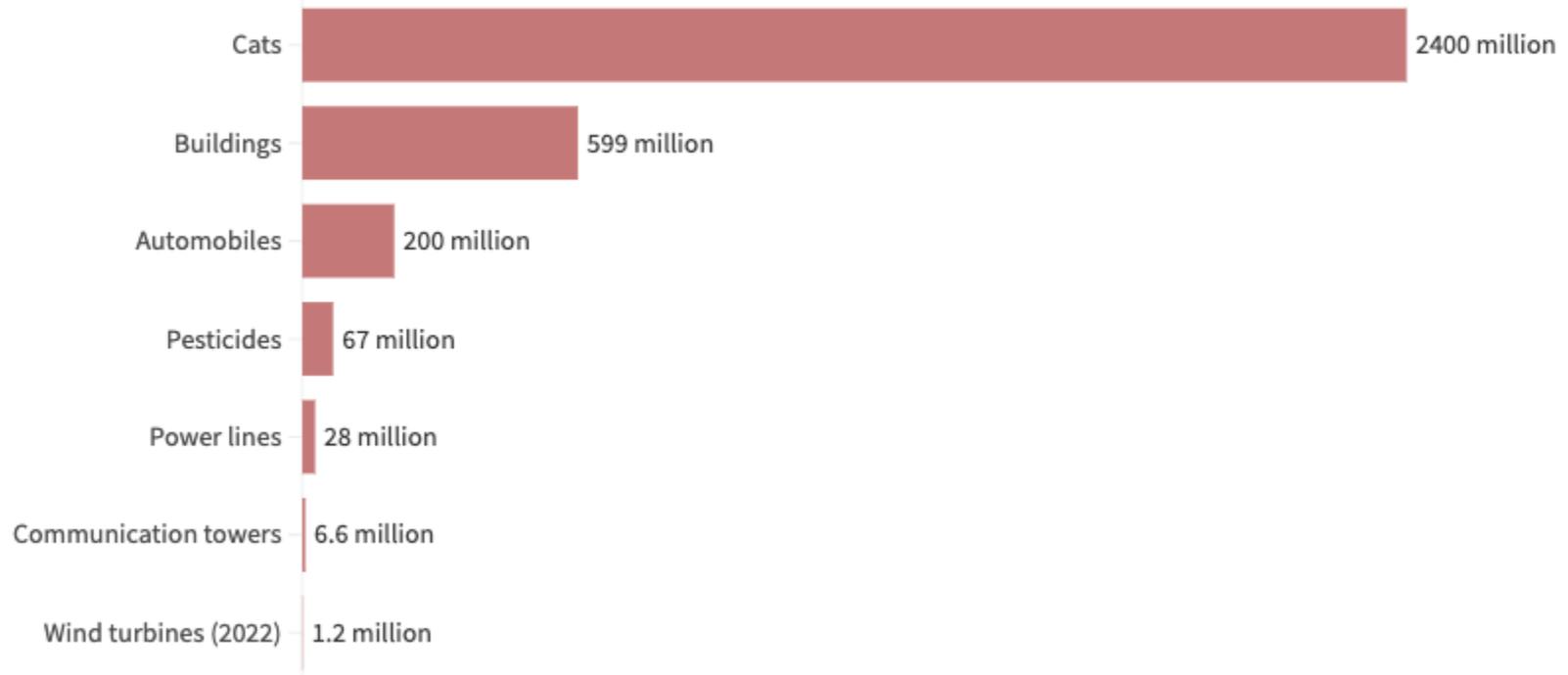
Por [José Milheiro](#)

30 Janeiro, 2023 • 14:06

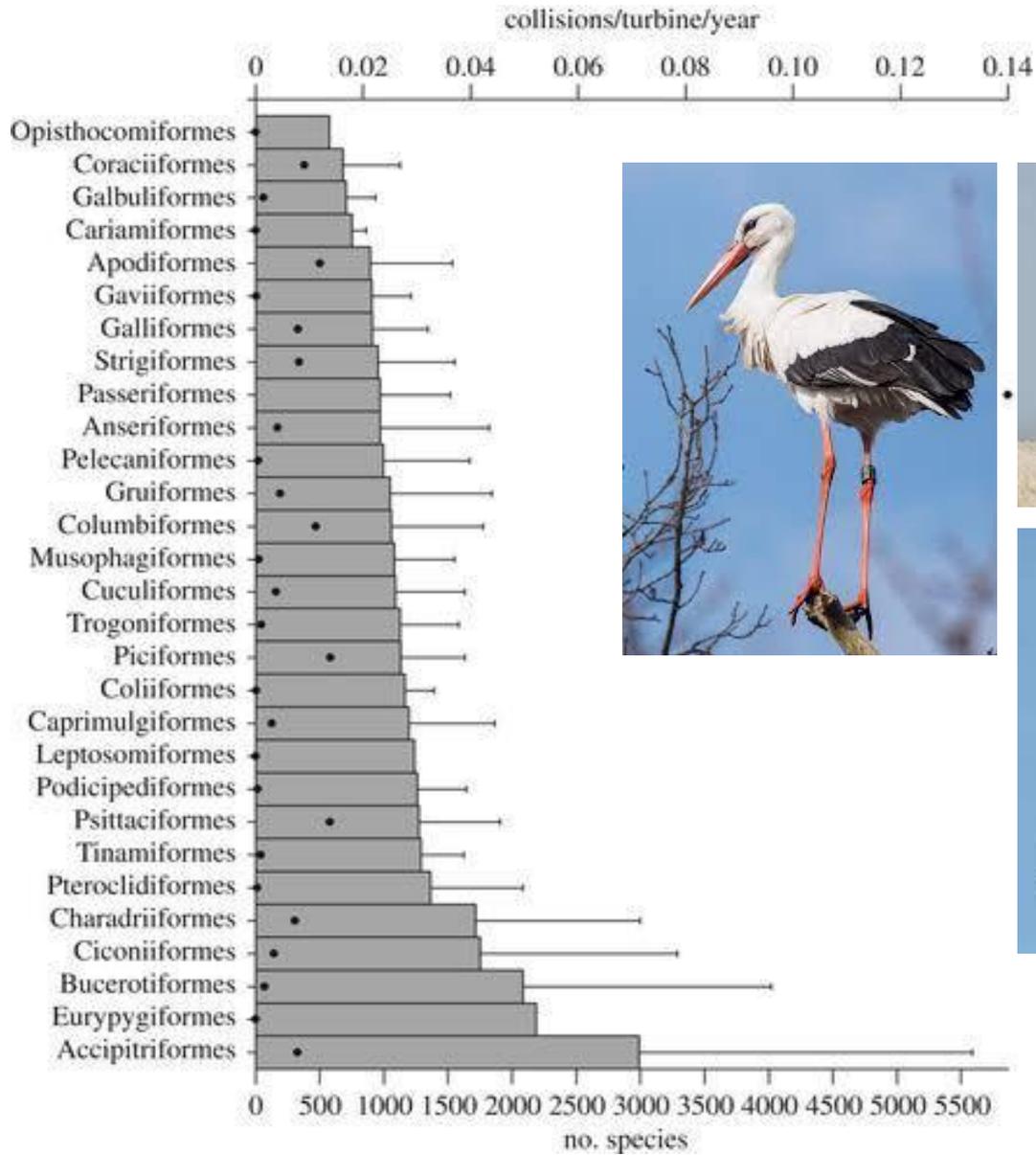
Esta ZPE foi justificada pela "utilização do meio marinho adjacente à costa continental portuguesa por diversas espécies de aves, algumas das quais com estatuto de ameaça desfavorável, entre as quais se destaca a pardela-baleiar", pode ler-se no decreto regulamentar que criou este estatuto de proteção para a ave marinha mais ameaçada da Europa.

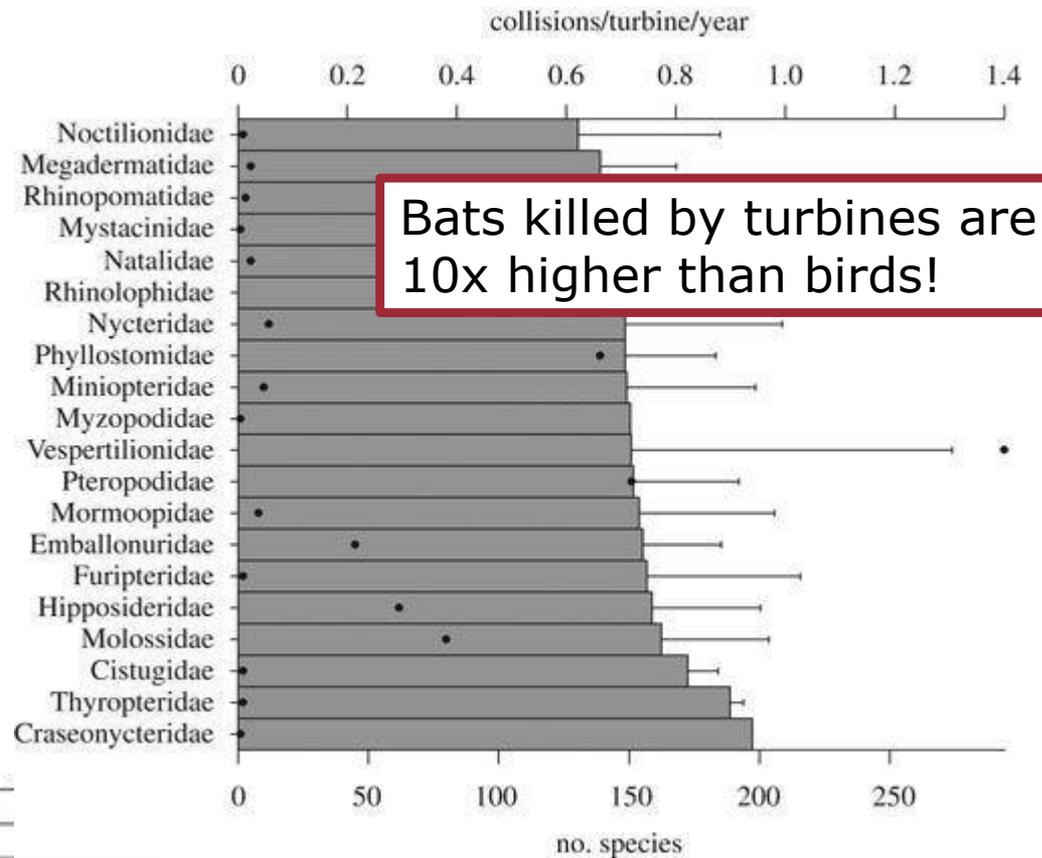
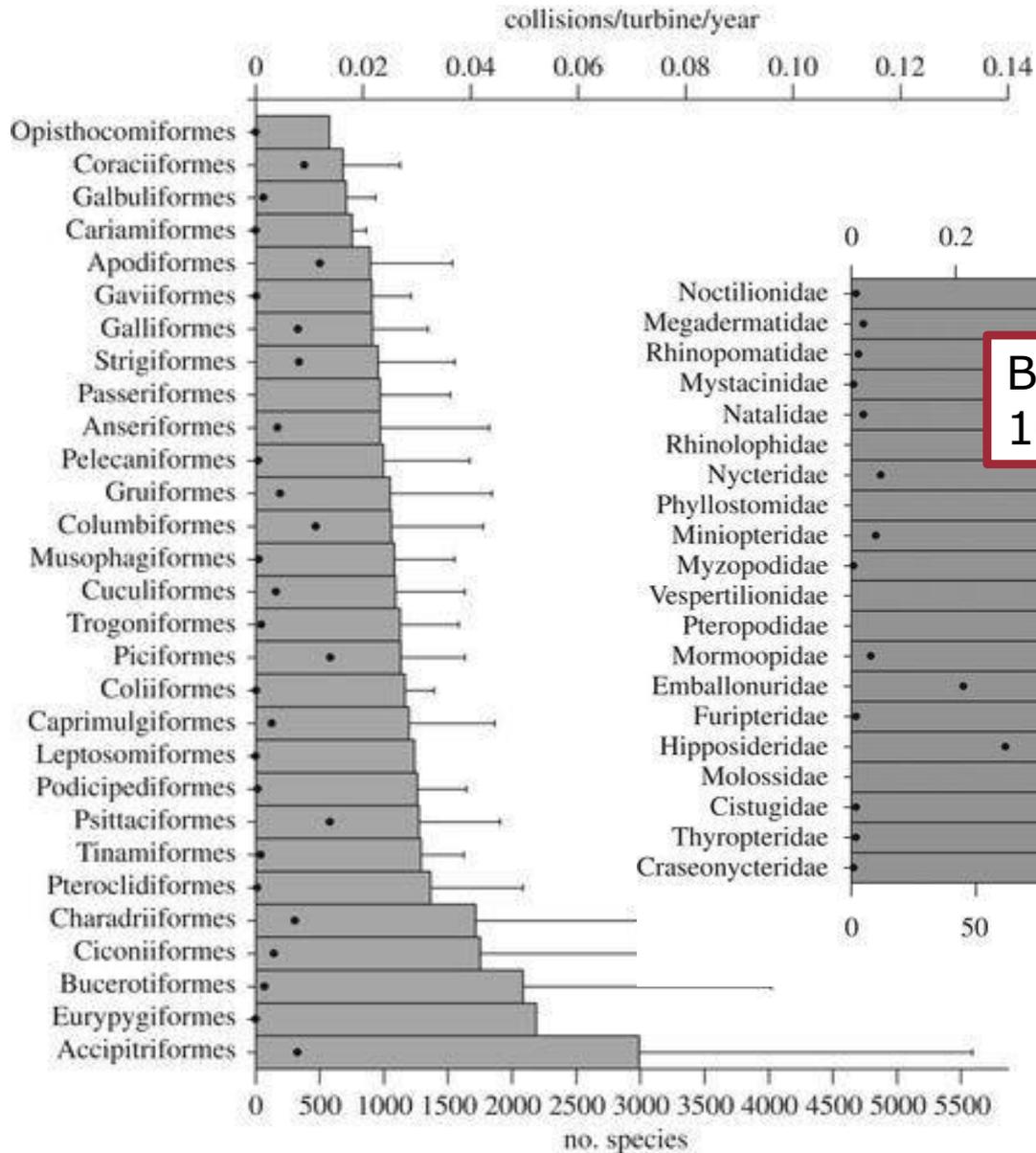
"As áreas de Leixões e da Figueira da Foz são adjacentes ao limite exterior do Sítio de Importância Comunitária Maceda/Praia da Vieira" aprovado em 2019 e destinado à proteção dos golfinhos.

Birds killed by different hazards in the US per year



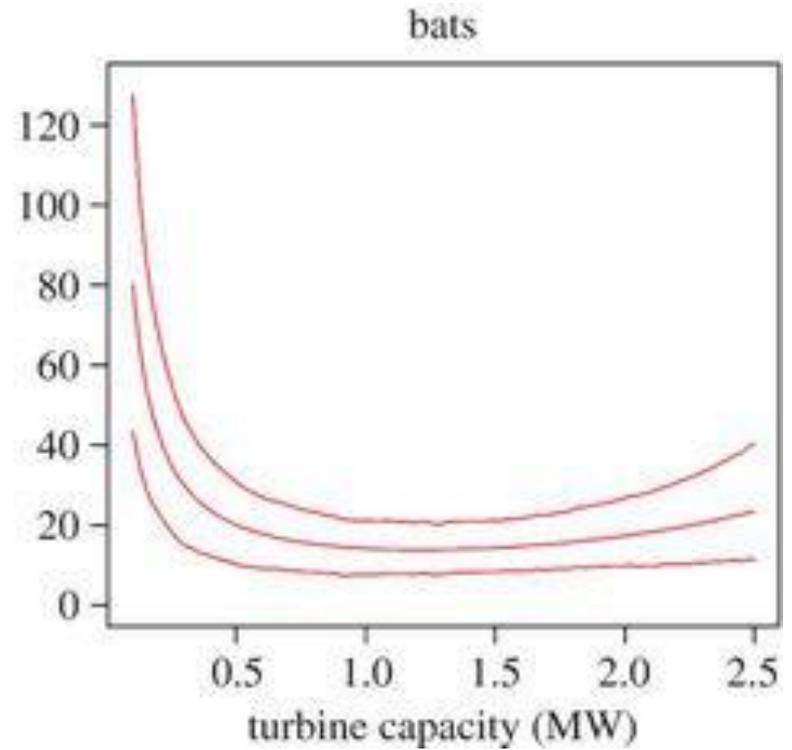
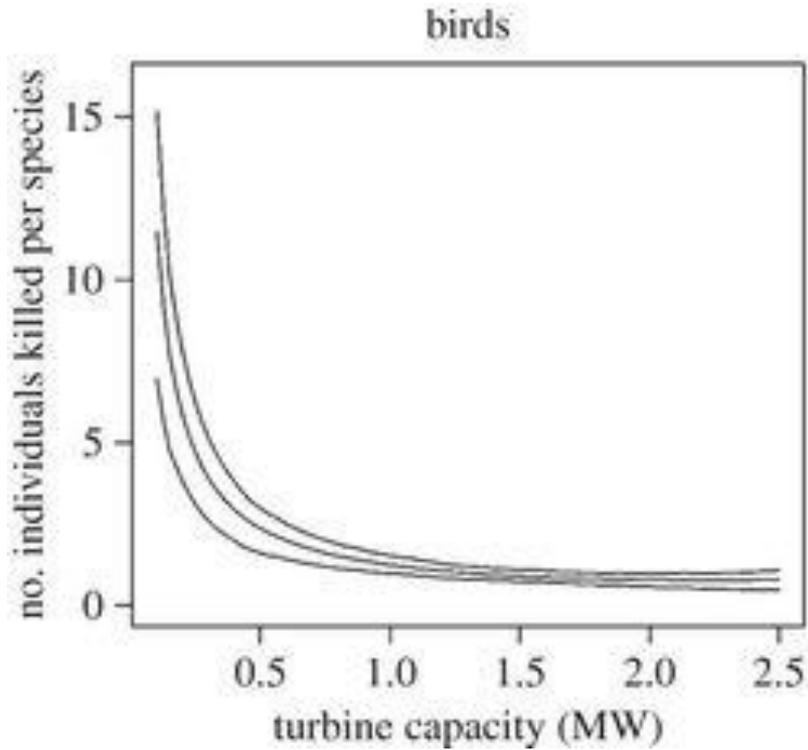
Sources: Loss et al. (2015); (2013). US Fish and Wildlife Service; Subramanian et al. (2012); American Bird Conservancy (2021).





Bats killed by turbines are 10x higher than birds!

Fewer larger turbines are less harmful than many small ones.



ORIGINAL RESEARCH |  Open Access |  

Paint it black: Efficacy of increased wind turbine rotor blade visibility to reduce avian fatalities

Roel May , Torgeir Nygård, Ulla Falkdalen, Jens Åström, Øyvind Hamre, Bård G. Stokke

First published: 26 July 2020 | <https://doi.org/10.1002/ece3.6592> | Citations: 46



ELSEVIER

Global Ecology and Conservation

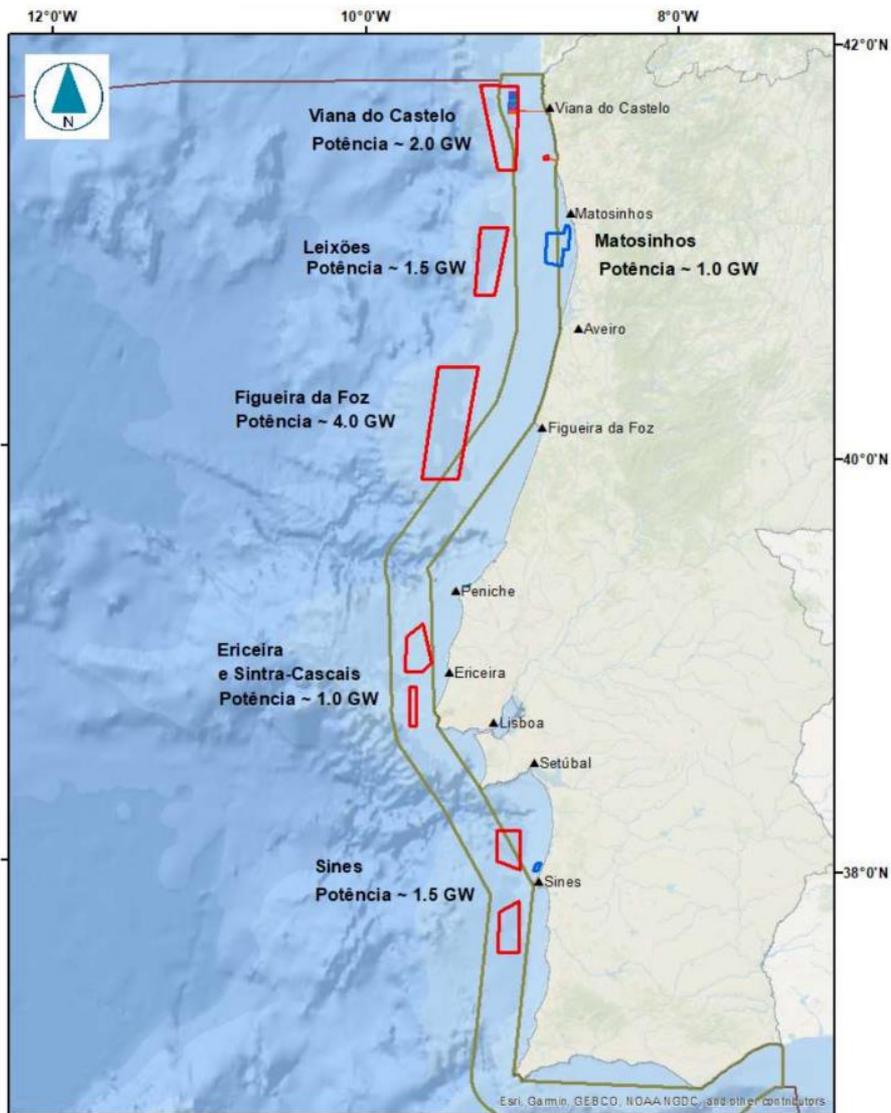
Volume 24, December 2020, e01099



Original Research Article

Ultrasonic acoustic deterrents significantly reduce bat fatalities at wind turbines

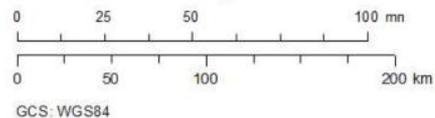
Sara P. Weaver^{a b}  , Cris D. Hein^c , Thomas R. Simpson^b , Jonah W. Evans^d ,
Ivan Castro-Arellano^b 



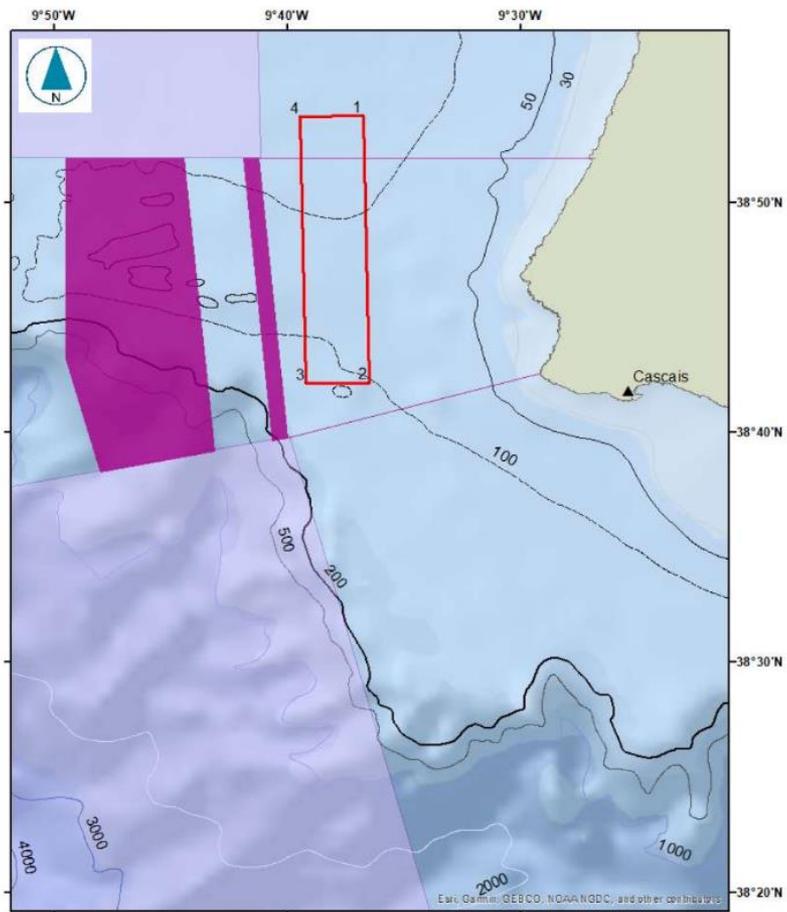
Áreas Propostas	Área (km2)	Potência passível de ser instalada (GW)
Viana do Castelo	663,00	2,0
Leixões	463,36	1,5
Figueira da Foz	1237,29	4,0
Ericeira	256,84	1,0
Sintra/Cascais	83,75	1,5
Sines	498,66	1,5
Total	3202,9	10,0

Legenda

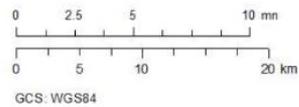
- ▭ Energias renováveis (Profundidade >= 75m e <= 200 m)
- ▭ Energias renováveis (Profundidade <= 50m)
- ▭ Mar territorial
- ▭ ZEE subárea do Continente



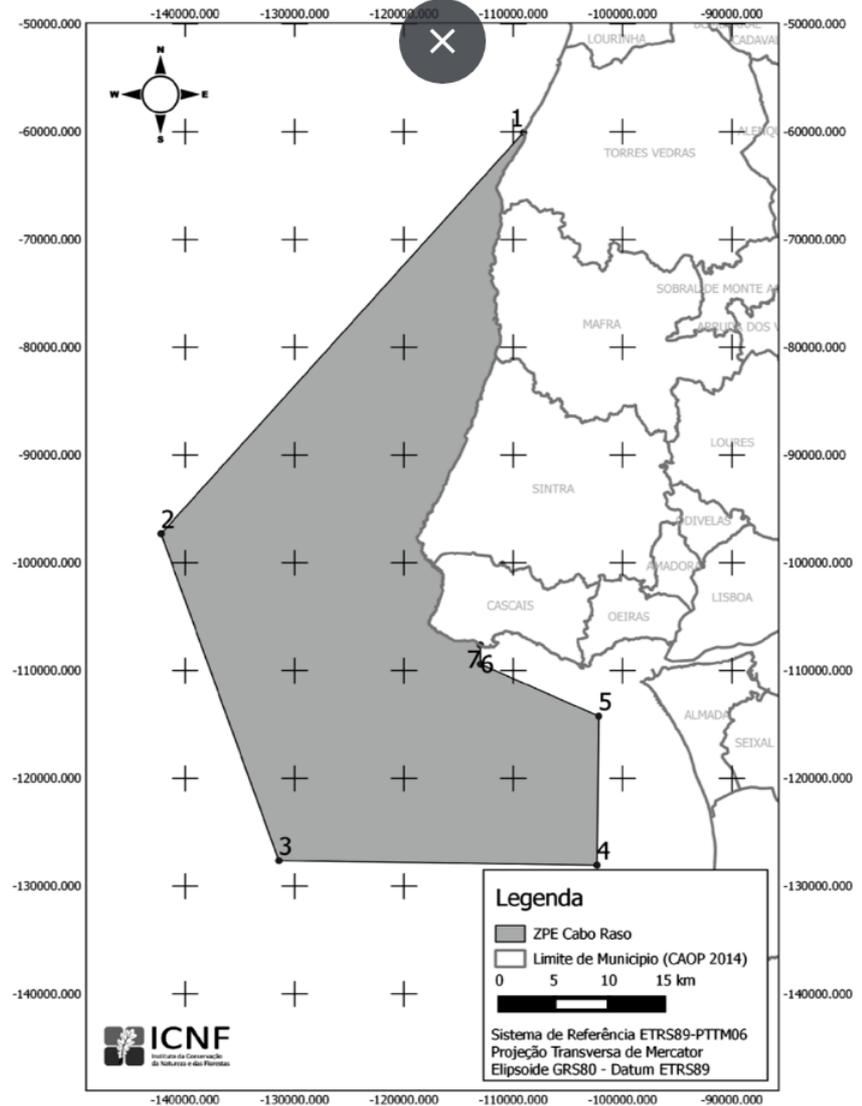
Sintra/Cascais



- Legenda**
- Renovável Cascais
 - Direcção de tráfego
 - EST do Cabo da Roca
 - Corredor habitual de tráfego marítimo



Carta da zona de proteção especial (ZPE) do Cabo Raso



Legenda

- ZPE Cabo Raso
 - Limite de Município (CAOP 2014)
- 0 5 10 15 km

Sistema de Referência ETRS89-PTTM06
Projeção Transversa de Mercator
Elipsoide GRS80 - Datum ETRS89



Guess which one produces more noise...



DAVE GRANLUND © www.davegranlund.com

ARGUMENTS AGAINST-



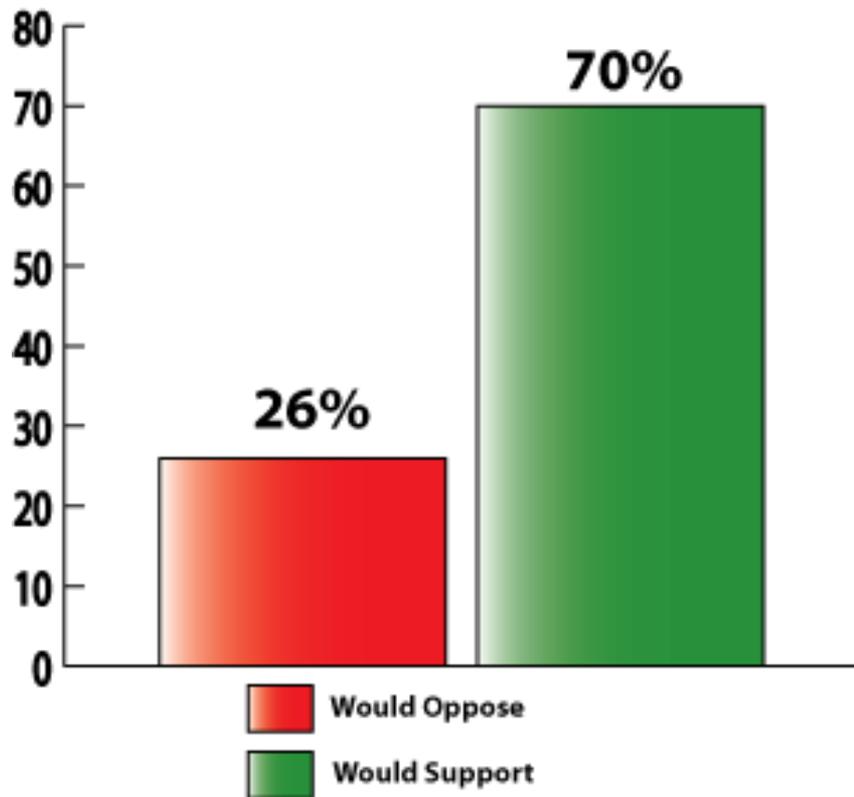
Joehller ©2011 GREENBAY PRESS GAZETTE

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

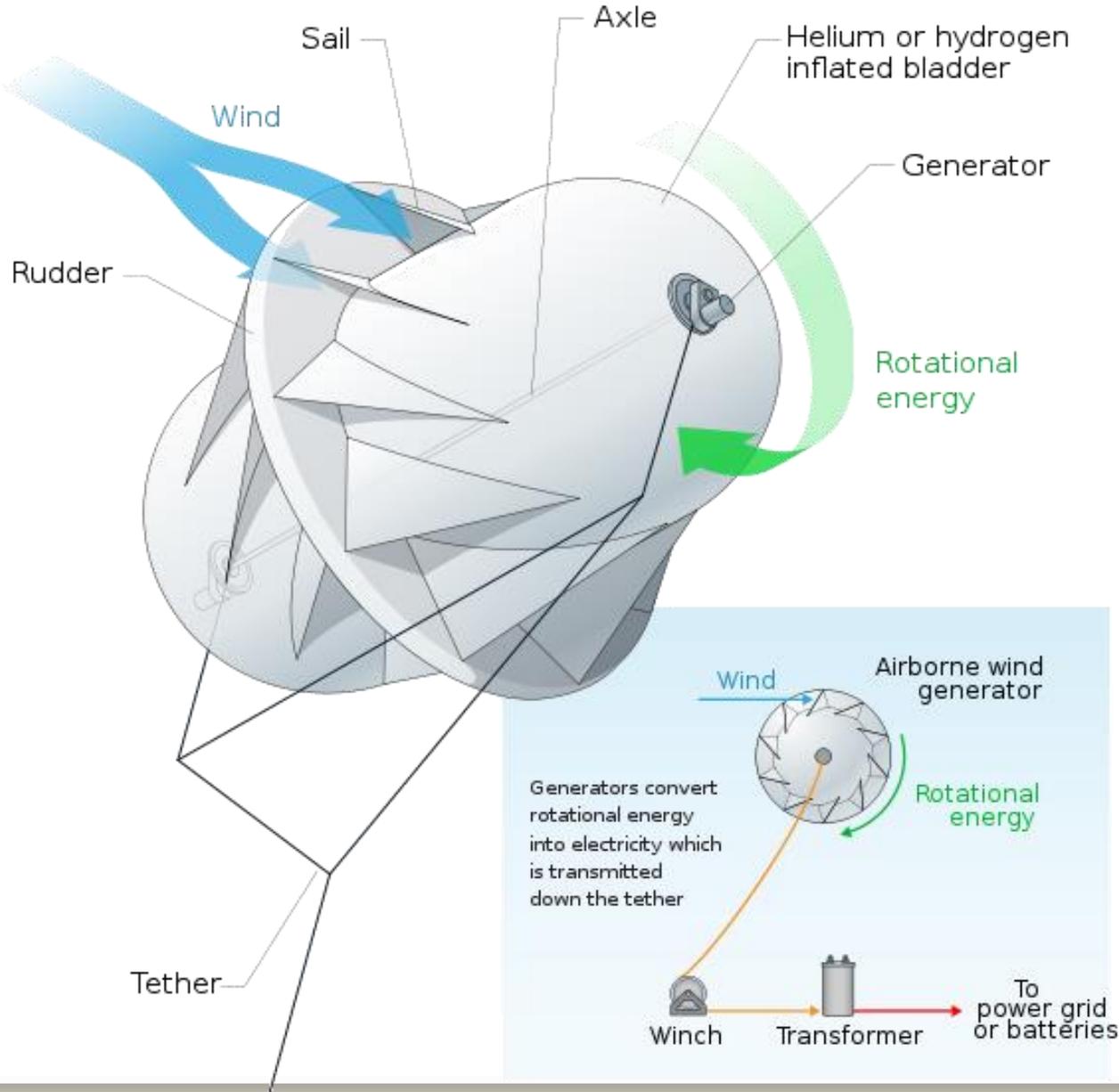








Grande altitude



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.

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

Distanza minima tra gli impianti:
100 metri

