

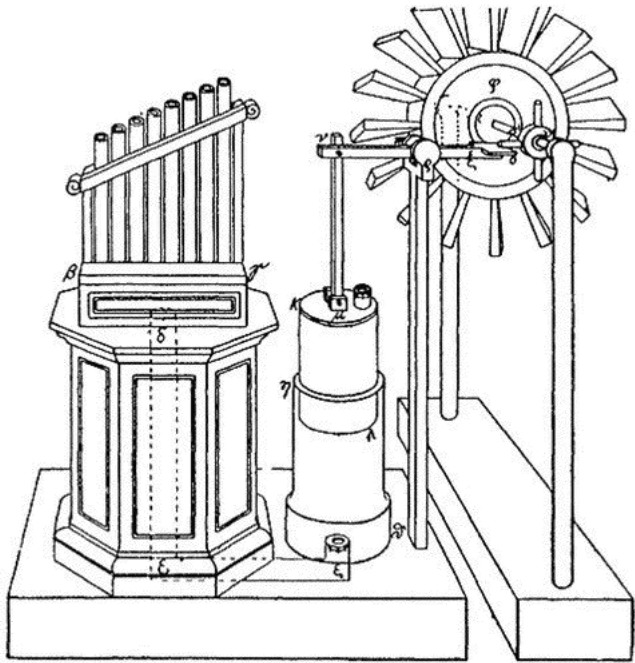
# **ENERGIA EÓLICA**

## **Energias Renováveis**

Miguel Centeno Brito

## Utilização da energia do vento

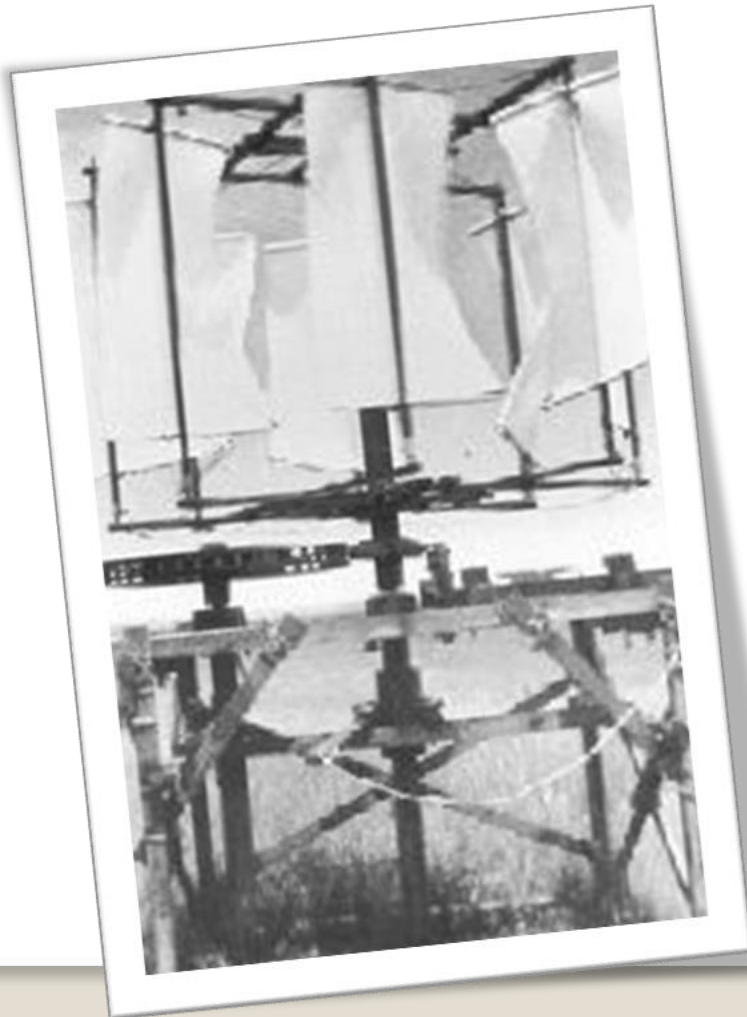
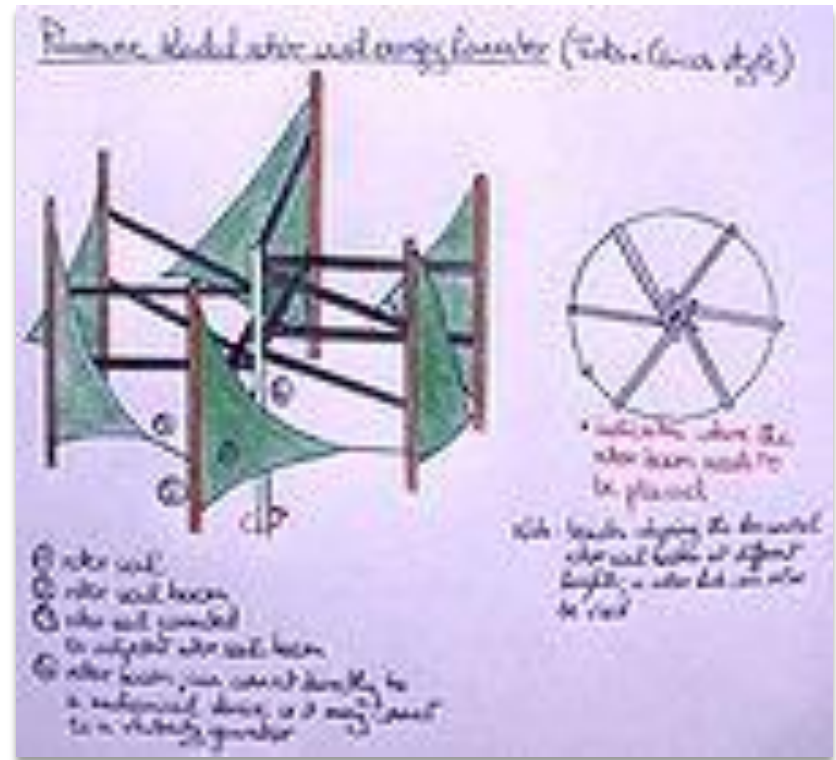
Egipto antigo e barcos fenícios navegaram à vela no Nilo, e no mediterraneo.



Heron (Alexandria)  
Orgão musical com  
energia do vento

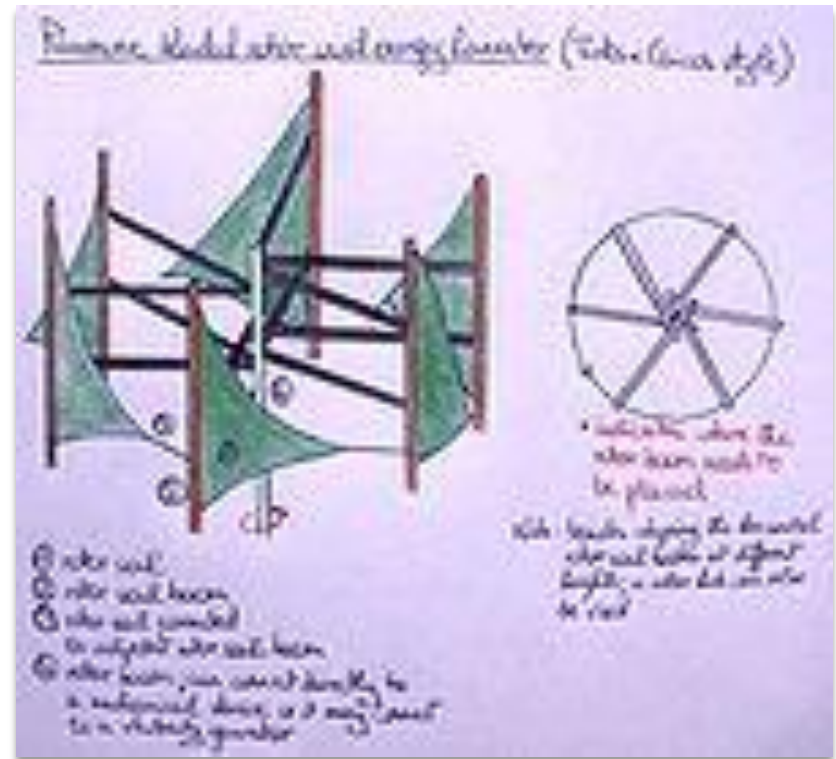
## Utilização da energia do vento

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



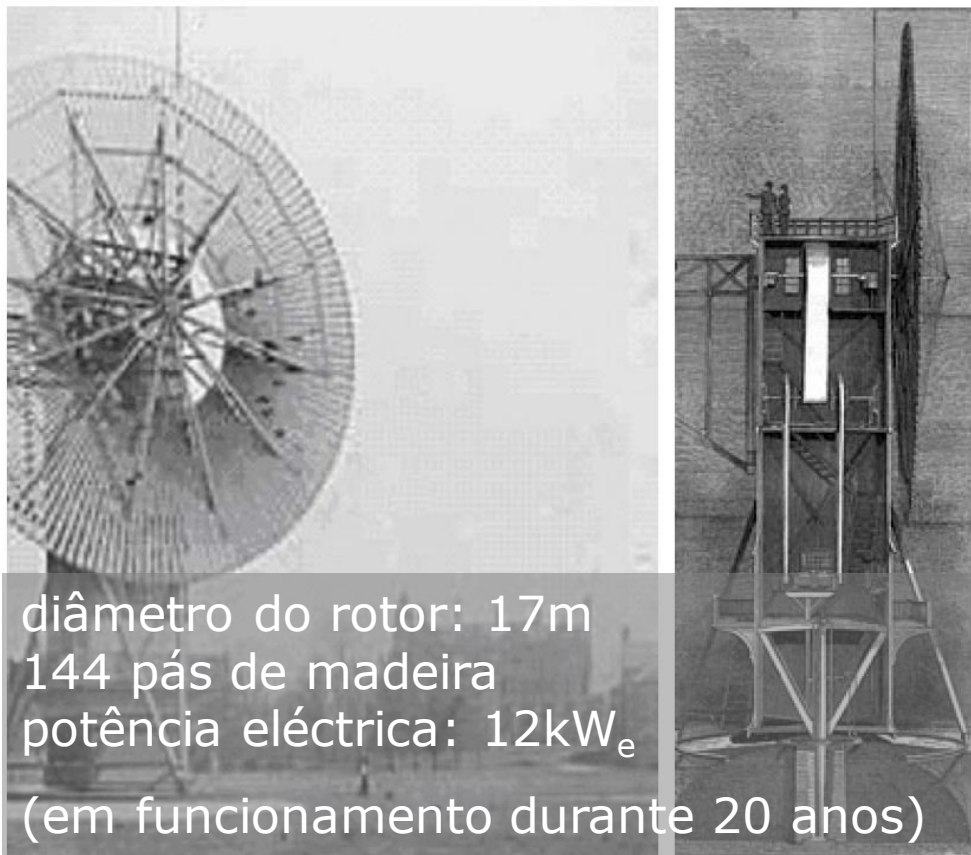
Caravela  
portuguesa  
Sec XV-XVI

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)





NORDEX

0110

## 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



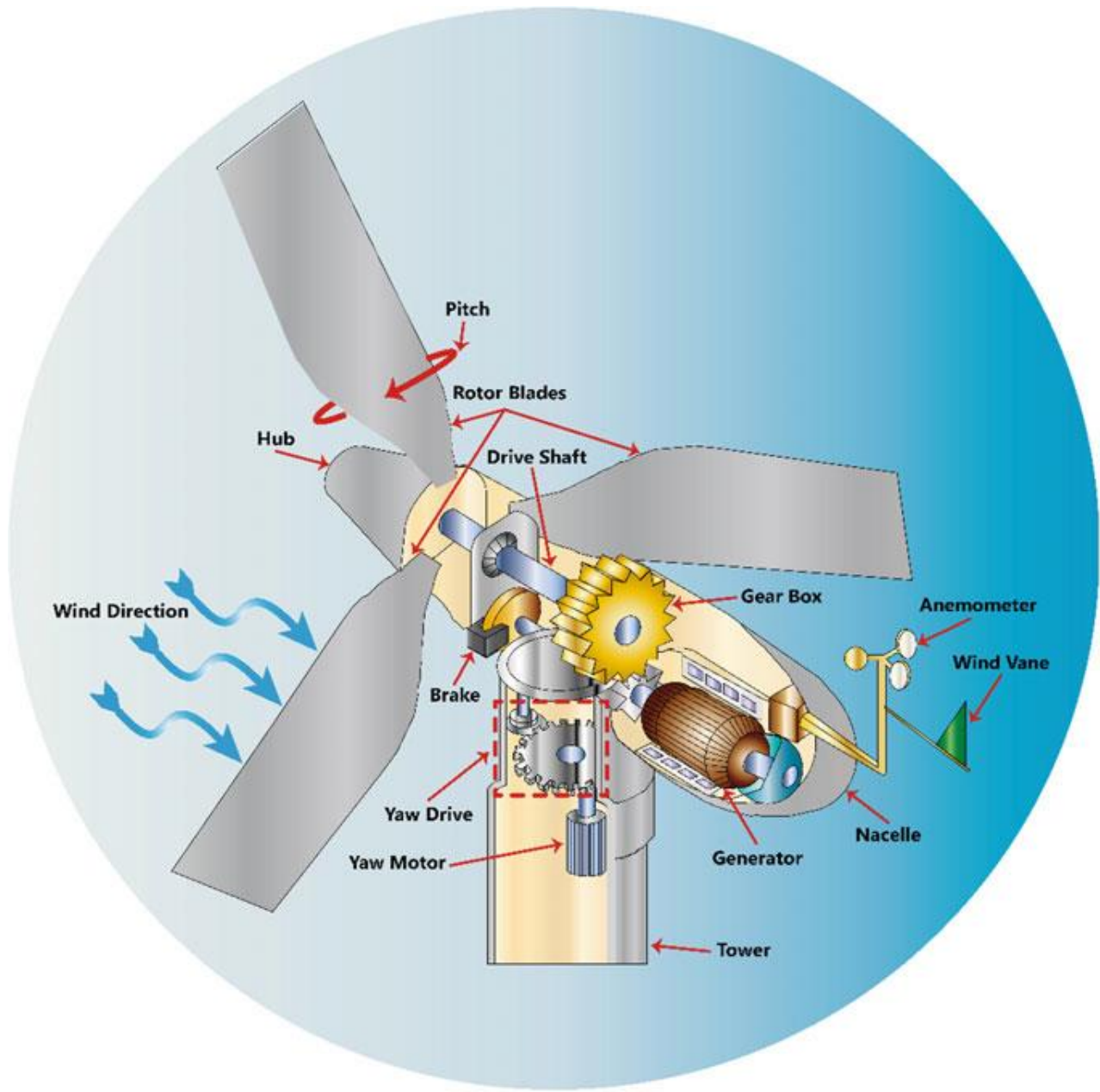
## Using wind energy

Goldwind GWH252-16MW

Blade: 123 m

Rotor diameter: 252 m





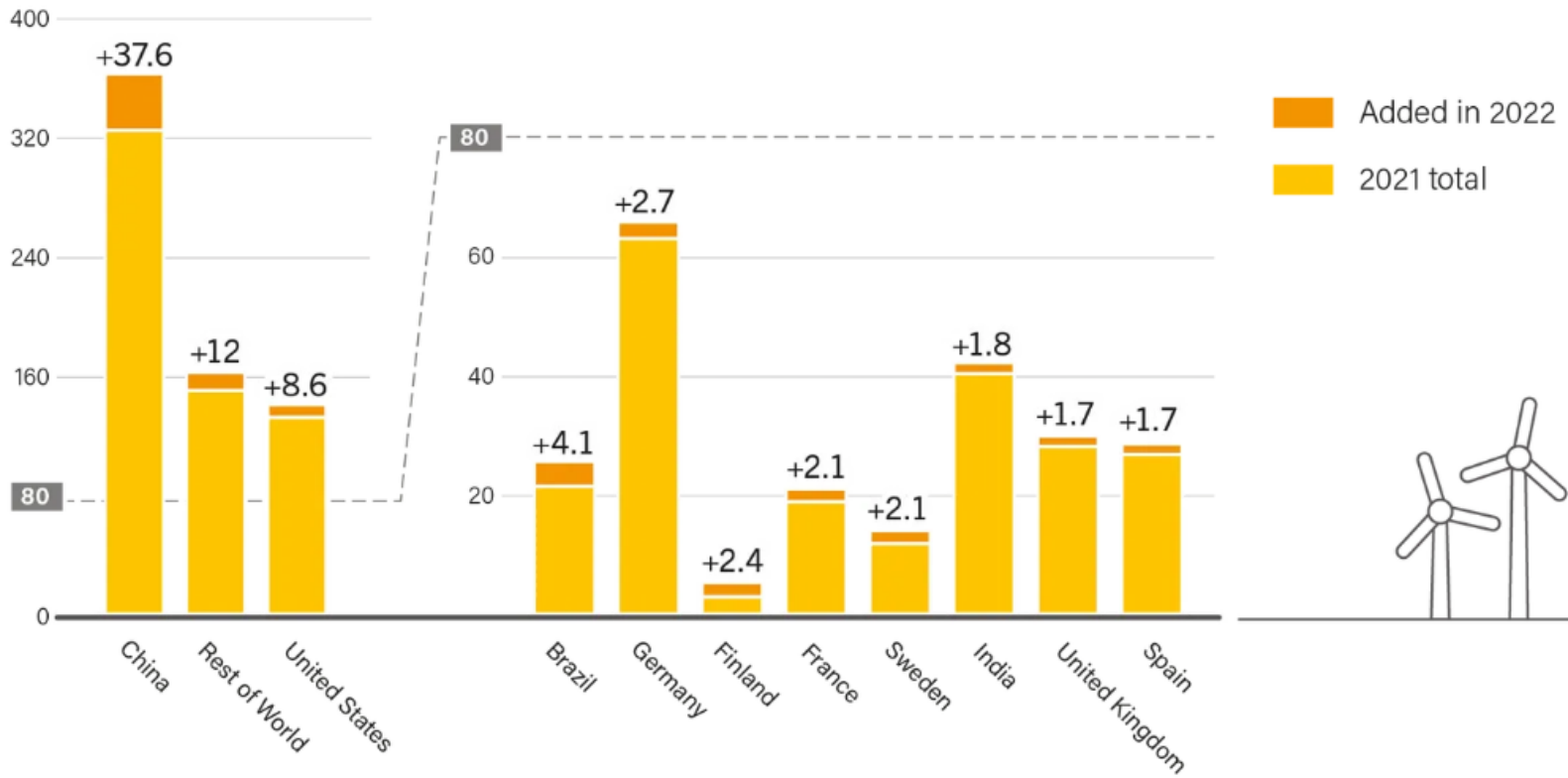
# Utilização da energia do vento



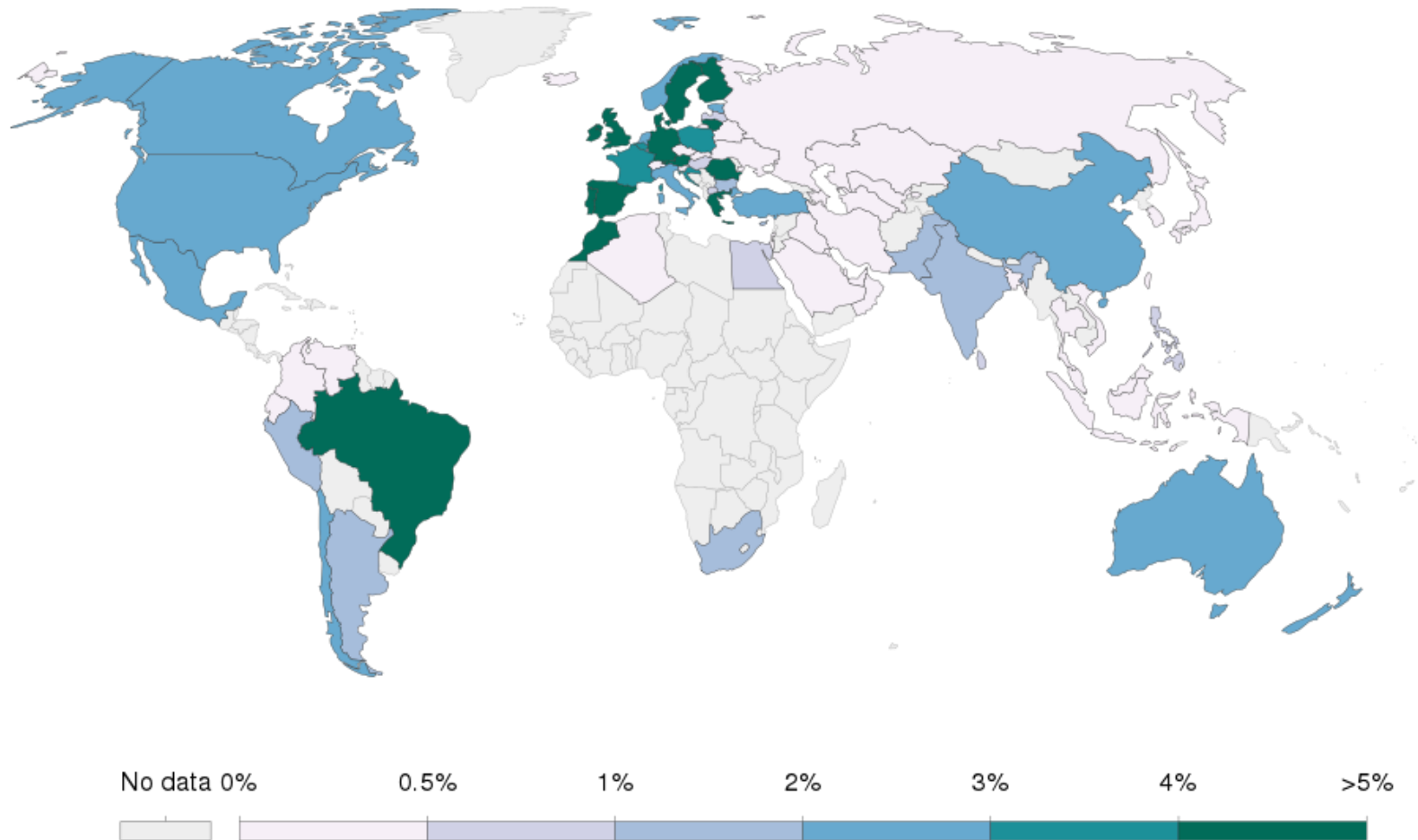
# Utilização da energia do vento

## Wind Power Capacity and Additions, Top 10 Countries, 2022

Gigawatts



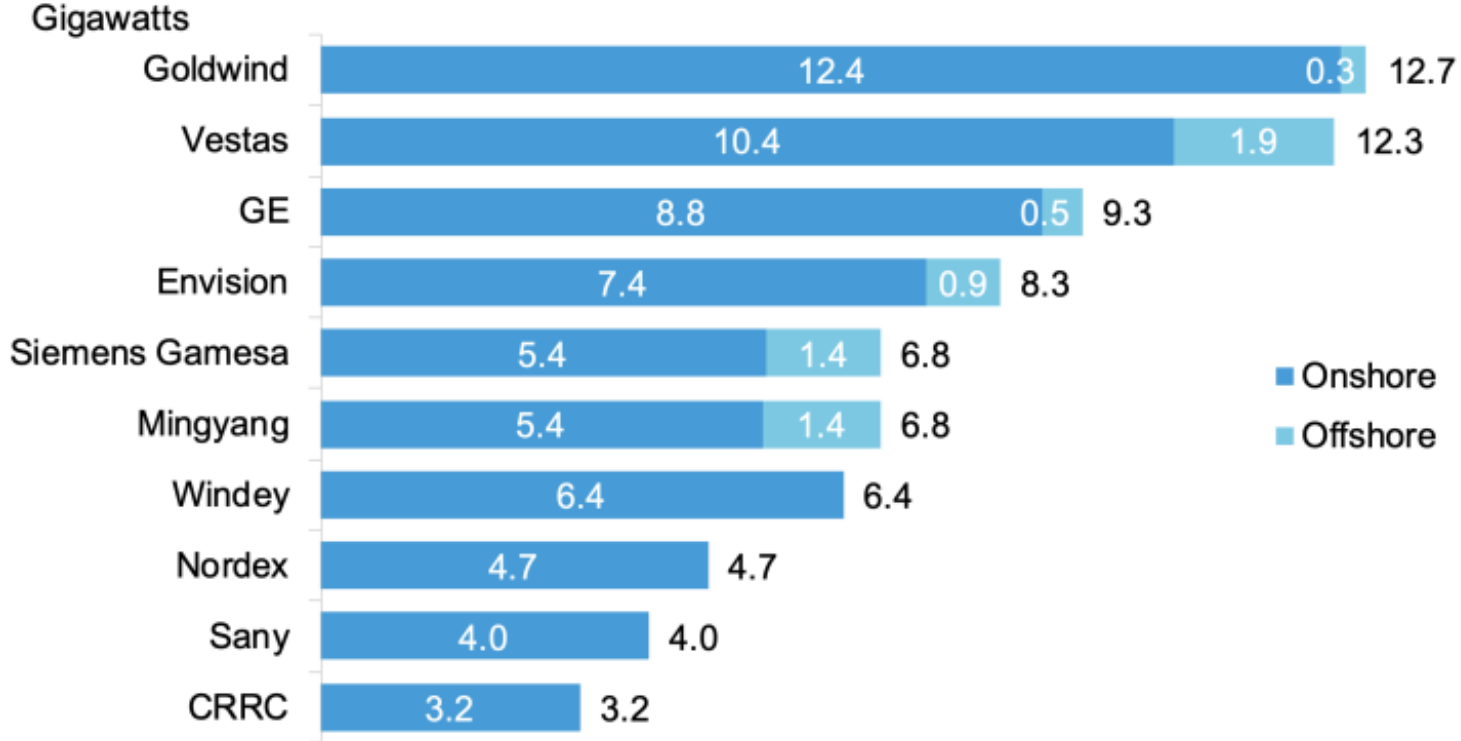
# Share of primary energy from wind, 2019



Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy (2020)

Note: Primary energy is calculated using the 'substitution method' which takes account of the inefficiencies energy production from fossil fuels.

**Figure 1: Top 10 global wind turbine makers, 2022**

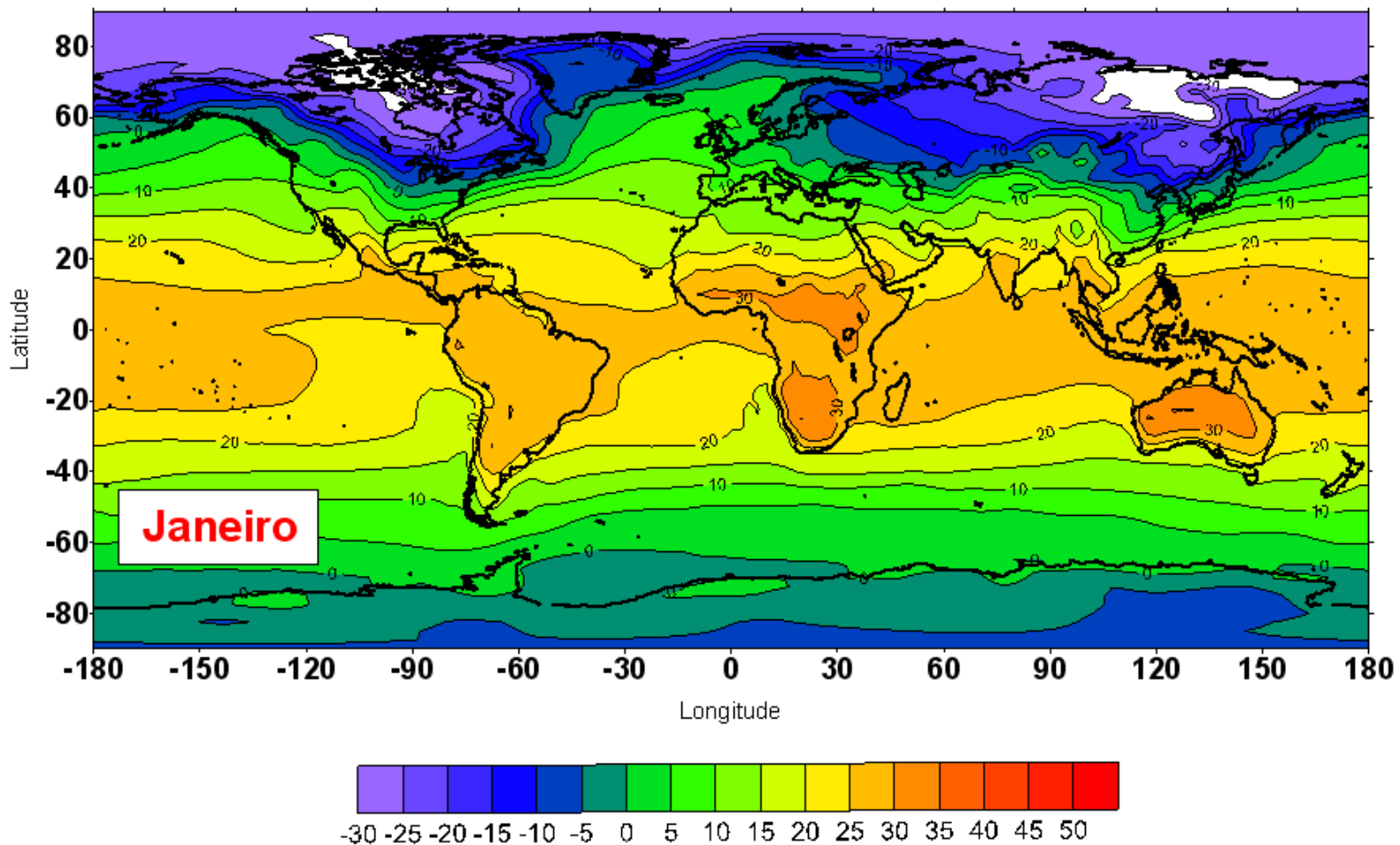


Source: BloombergNEF. Notes: Total commissioned wind capacity in 2022 was 86GW.



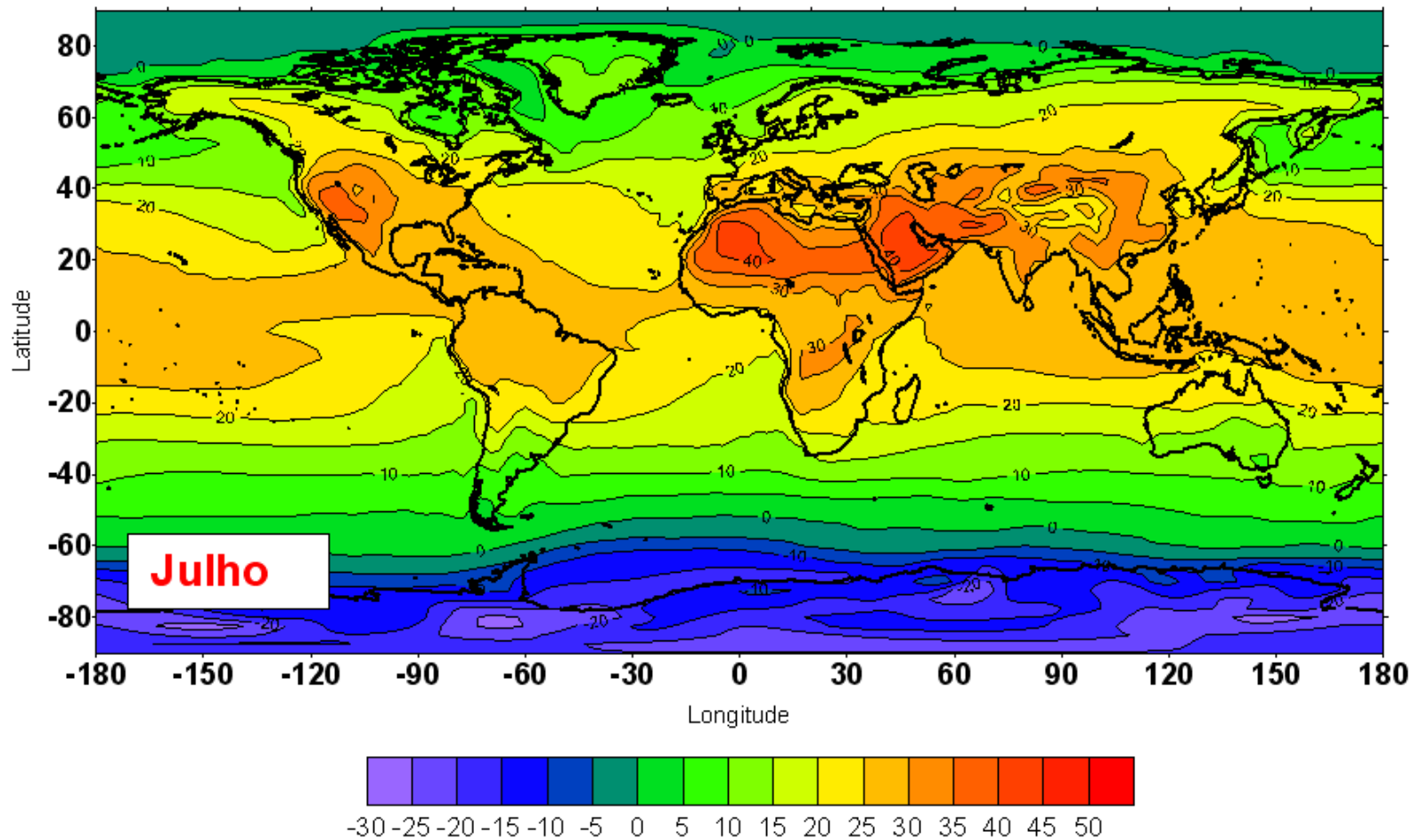
# Recurso eólico

## Temperatura



# Recurso eólico

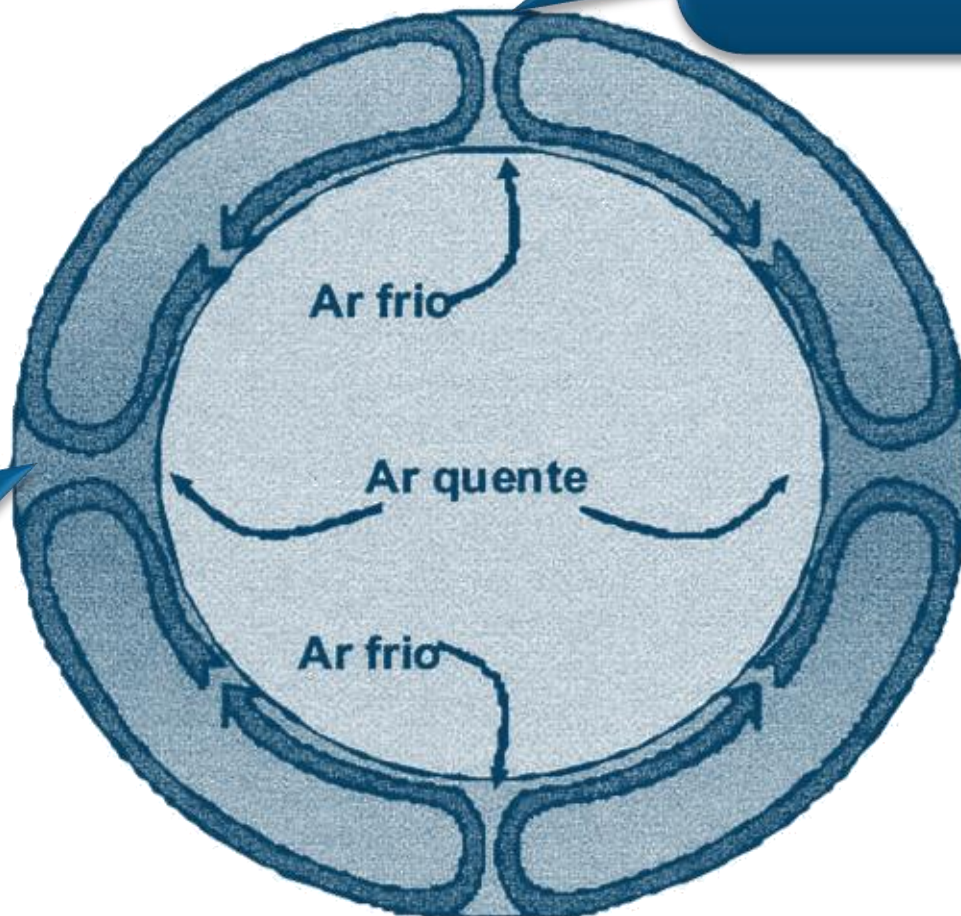
## Temperatura



## Recurso eólico

Sem rotação da Terra

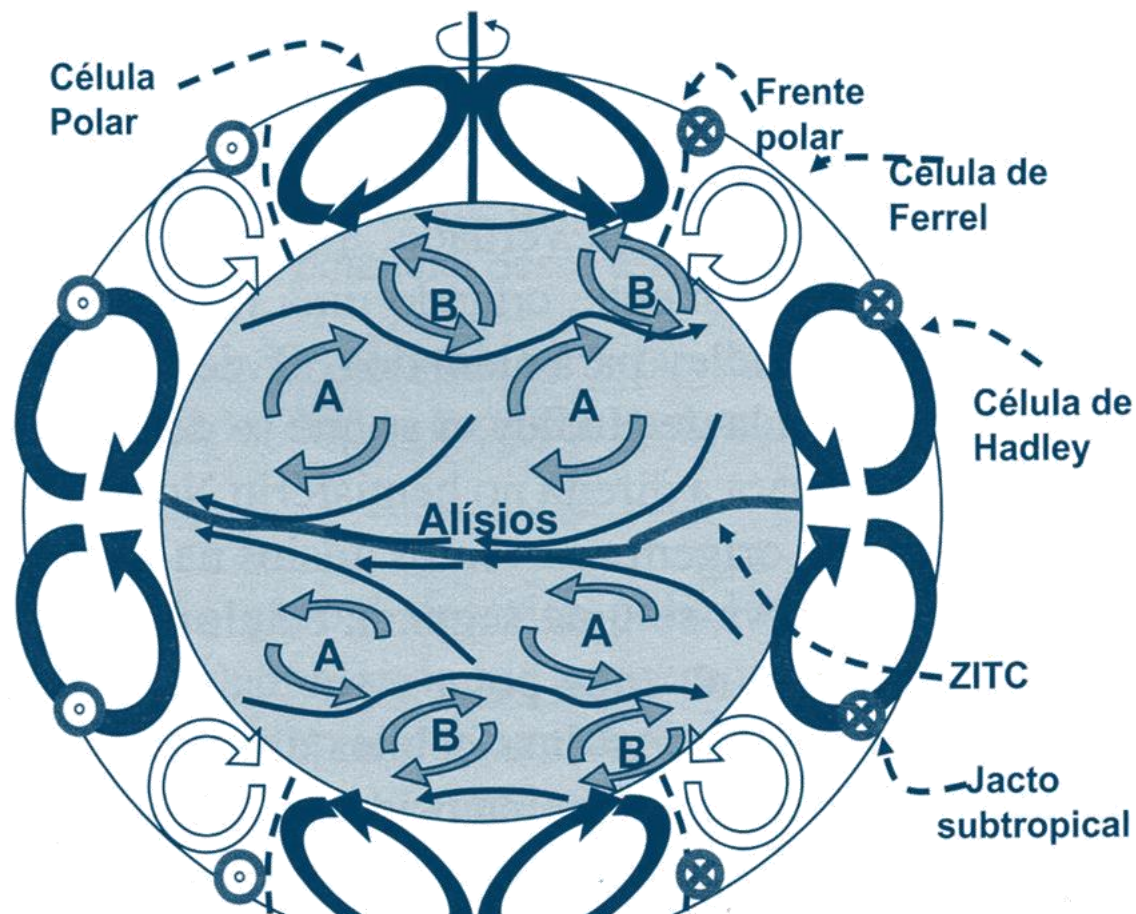
Zona de divergência em altitude e convergência à superfície na zona mais quente



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

## Recurso eólico

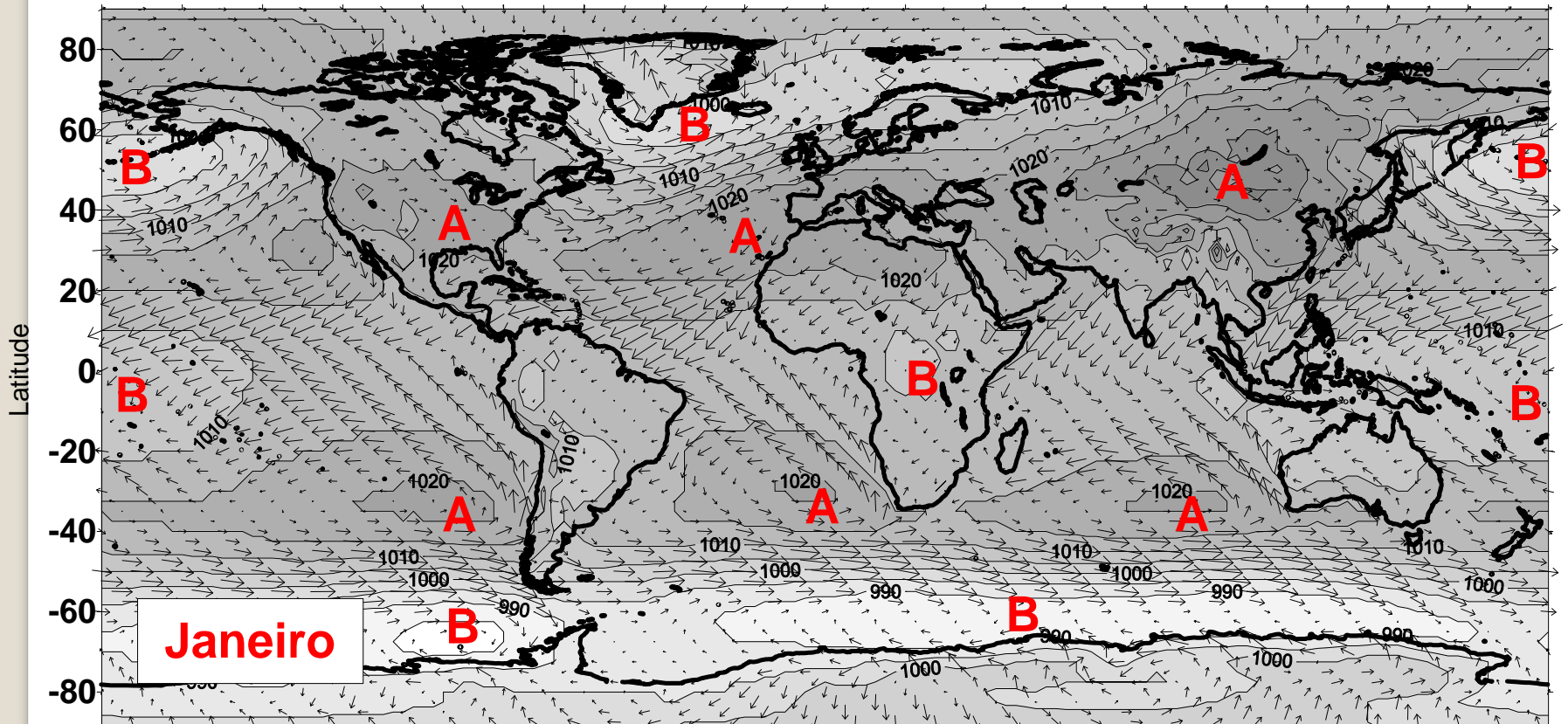
Com rotação da Terra – efeito da força de Coriolis



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

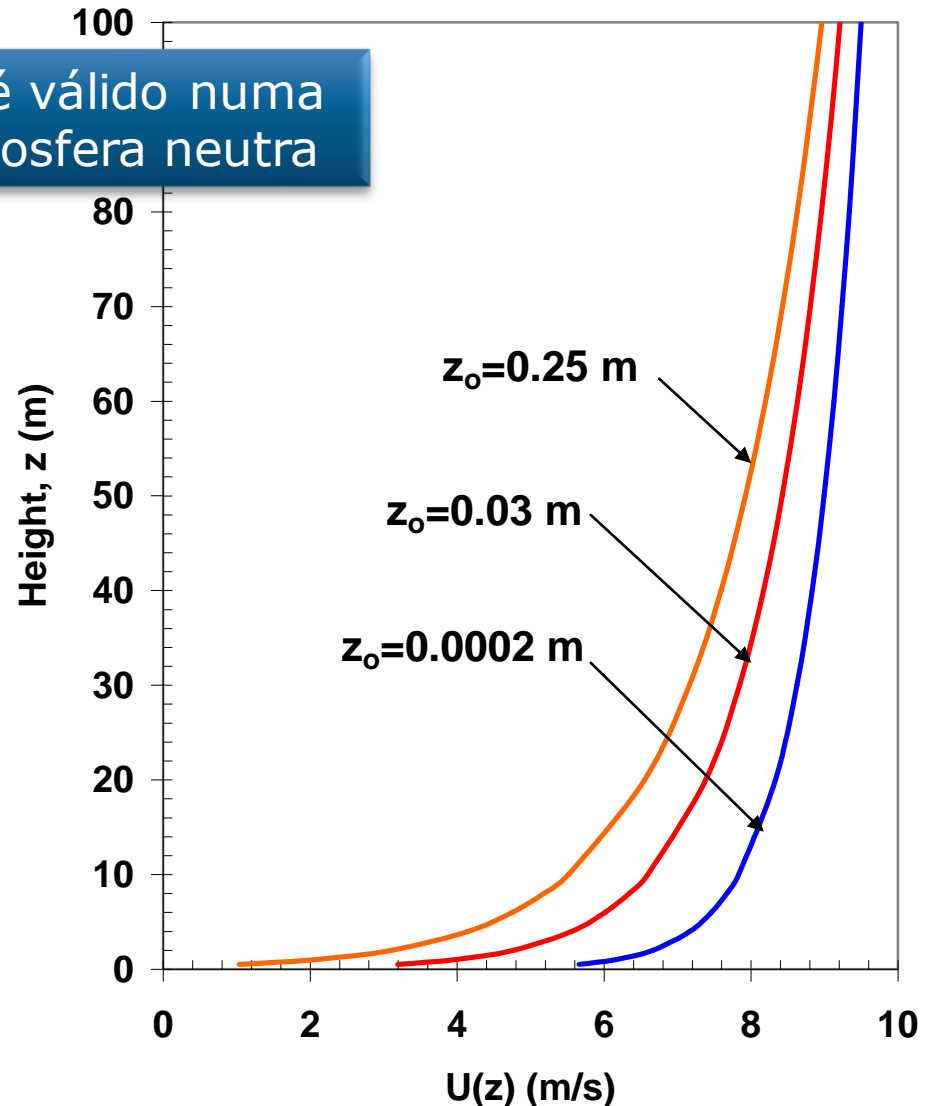
$$U(z) = \frac{U^*}{K} \log\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

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

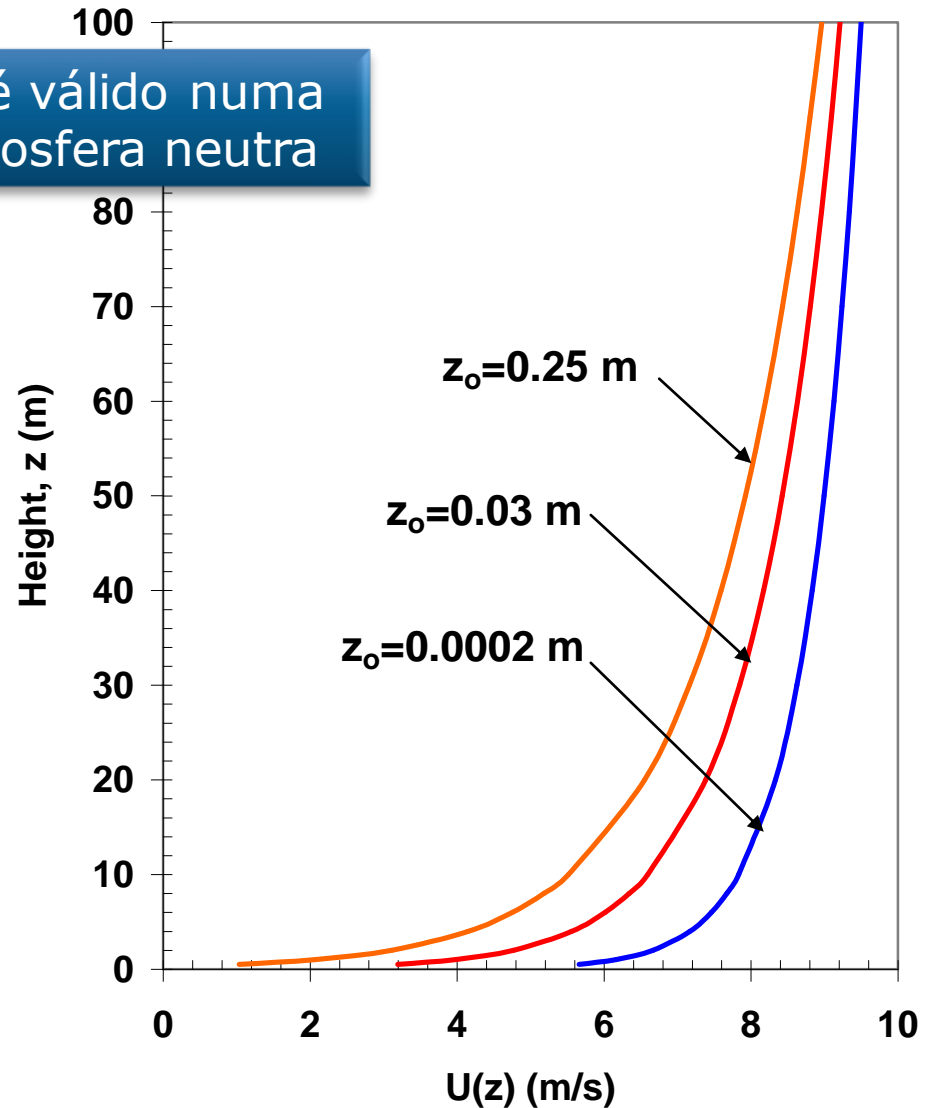
$$U(z) = \frac{U^*}{K} \log\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

Só é válido numa atmosfera neutra

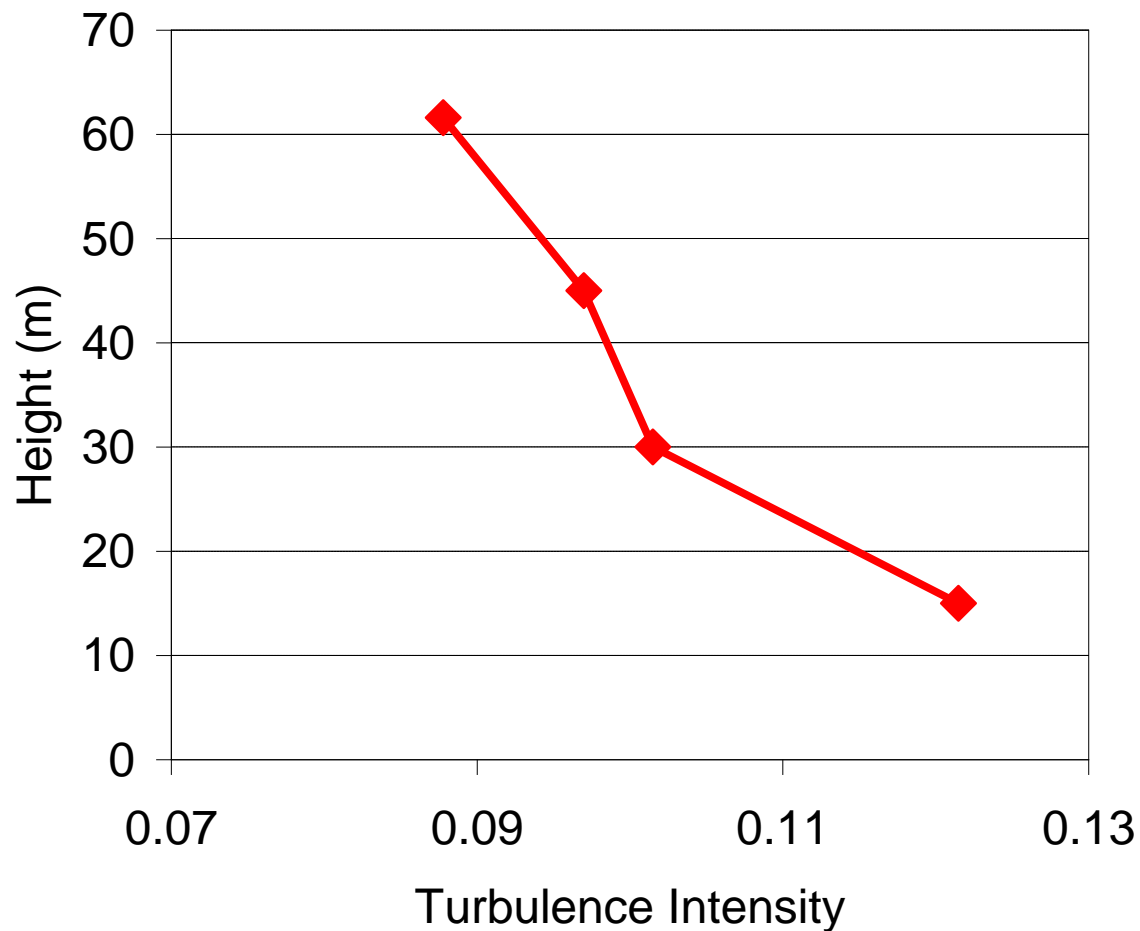
Solução empírica:

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

com  $n = 0.15 - 0.16$



## Variação do vento médio com a altura

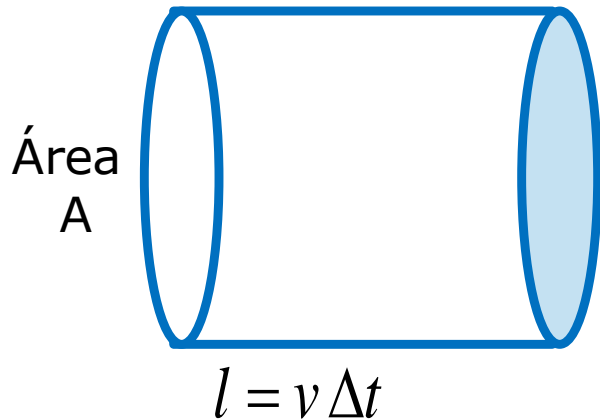


intensidade de turbulência =

= desvio padrão da velocidade do vento / velocidade média



## Quanta é a energia do vento



Energia cinética

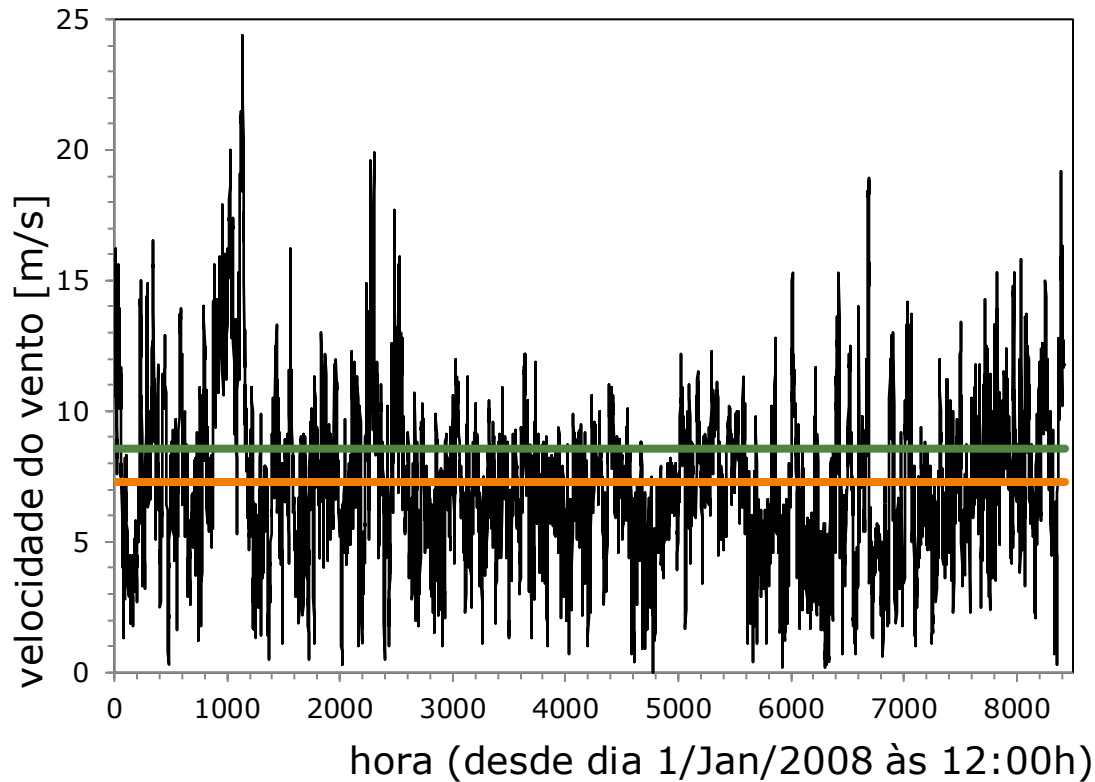
$$E = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} (\rho A v \Delta t) v^2 = \frac{1}{2} \rho A \Delta t v^3$$

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

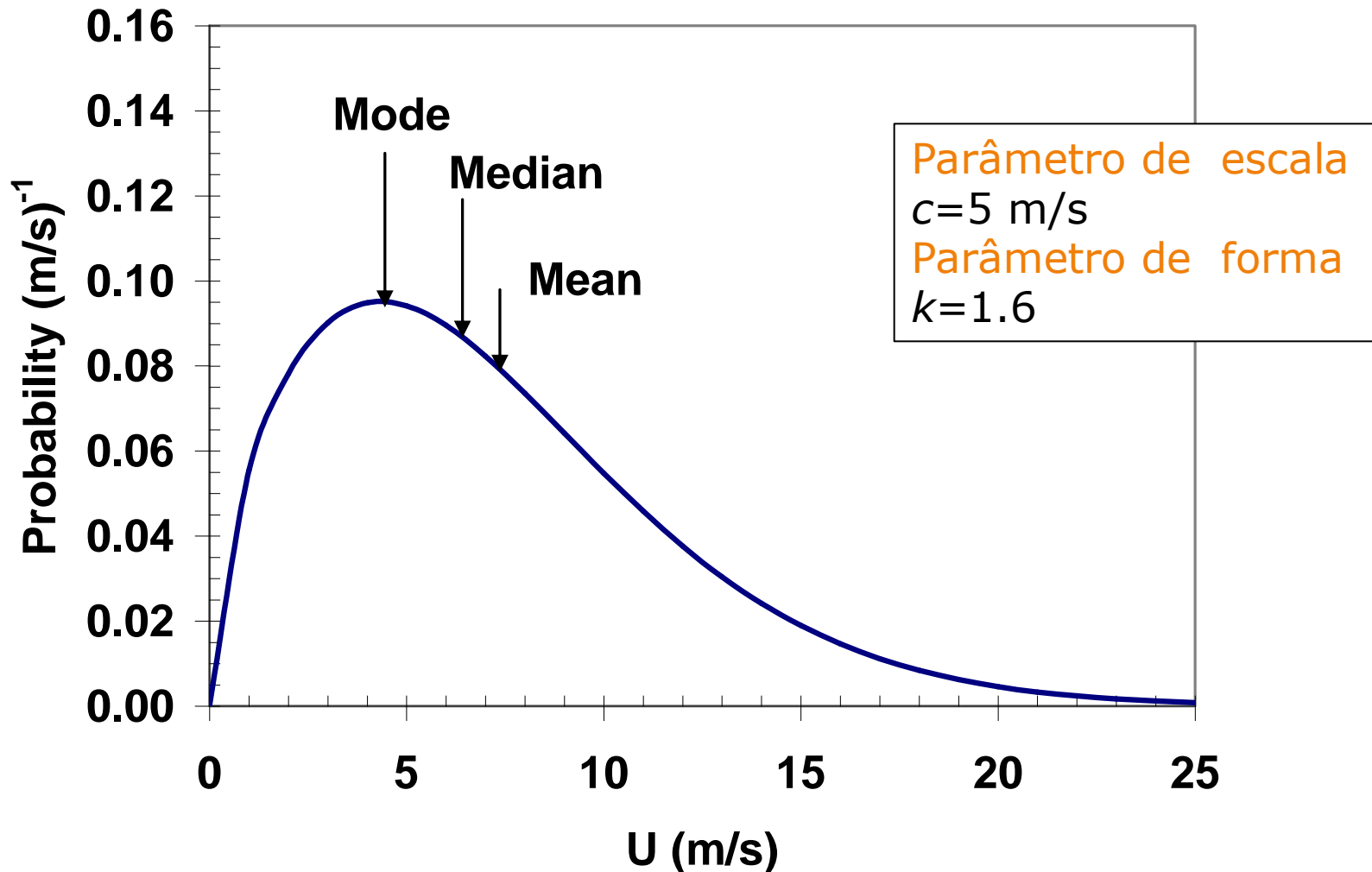
$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

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

Distribuição da velocidade do vento

## Distribuição de Weibull

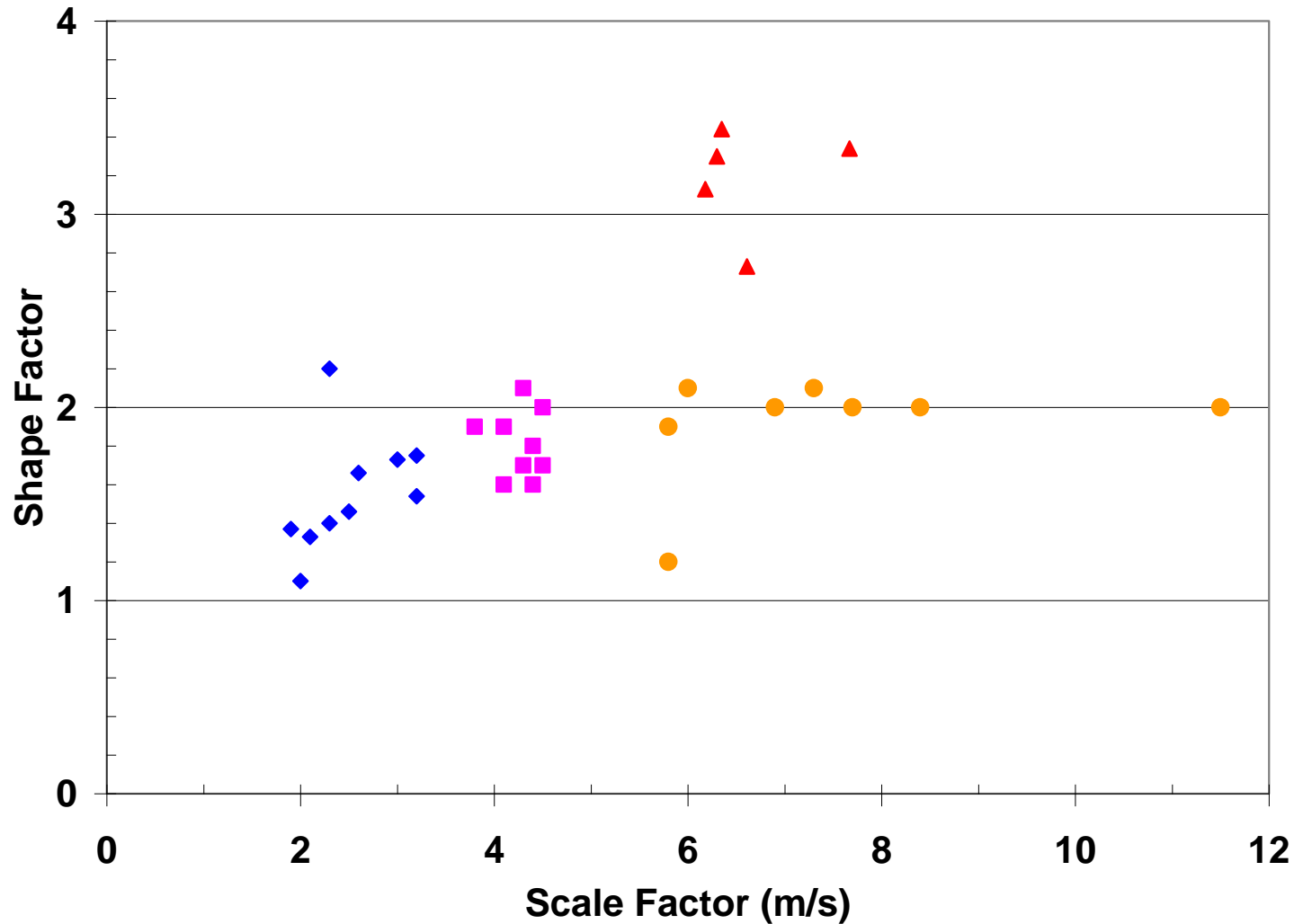
$$f(u) = \frac{k}{c} \left( \frac{u}{c} \right)^{k-1} e^{-(u/c)^k}$$



Distribuição da velocidade do vento

## Distribuição de Weibull

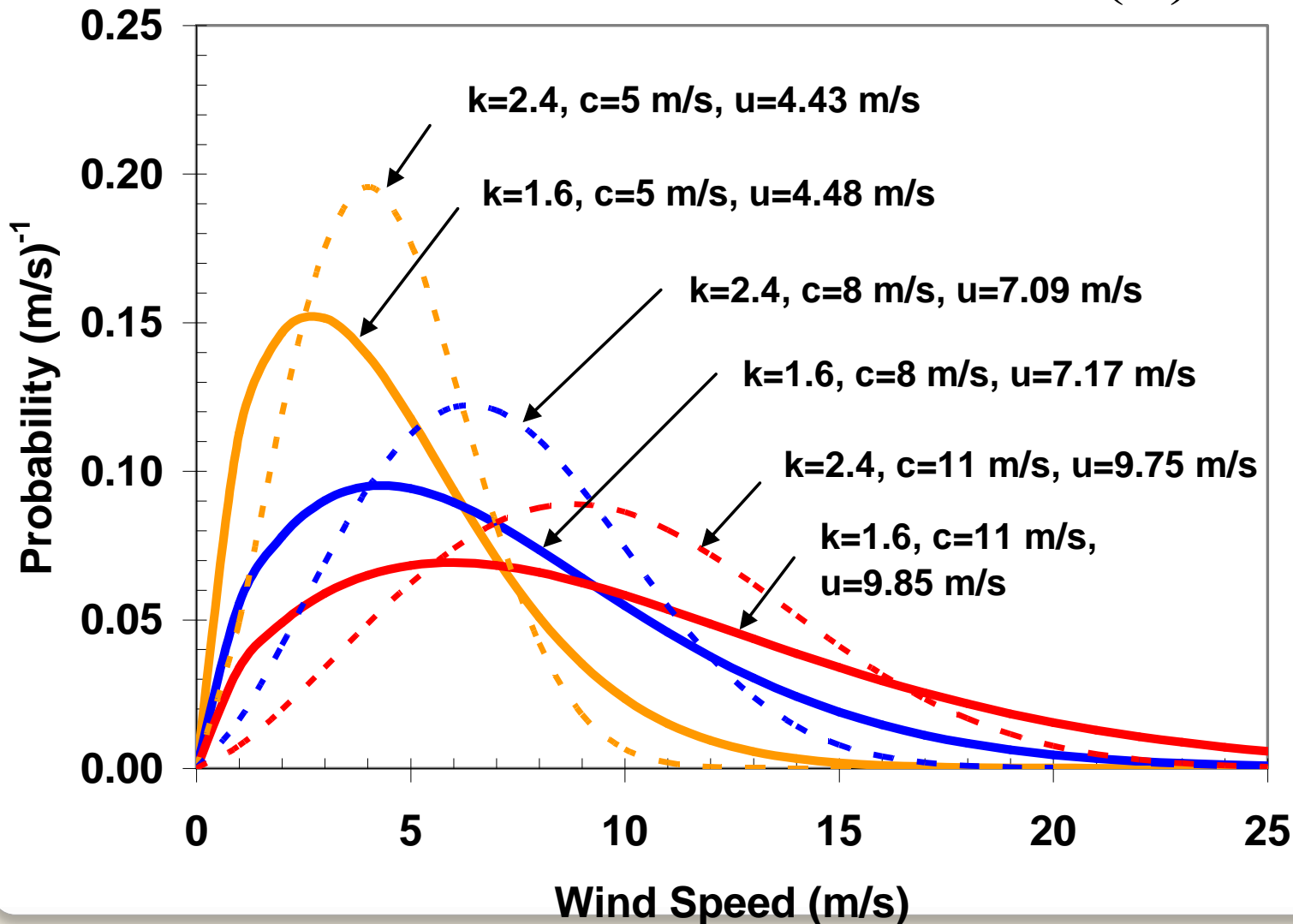
$$f(u) = \frac{k}{c} \left( \frac{u}{c} \right)^{k-1} e^{-(u/c)^k}$$



Distribuição da velocidade do vento

## Distribuição de Weibull

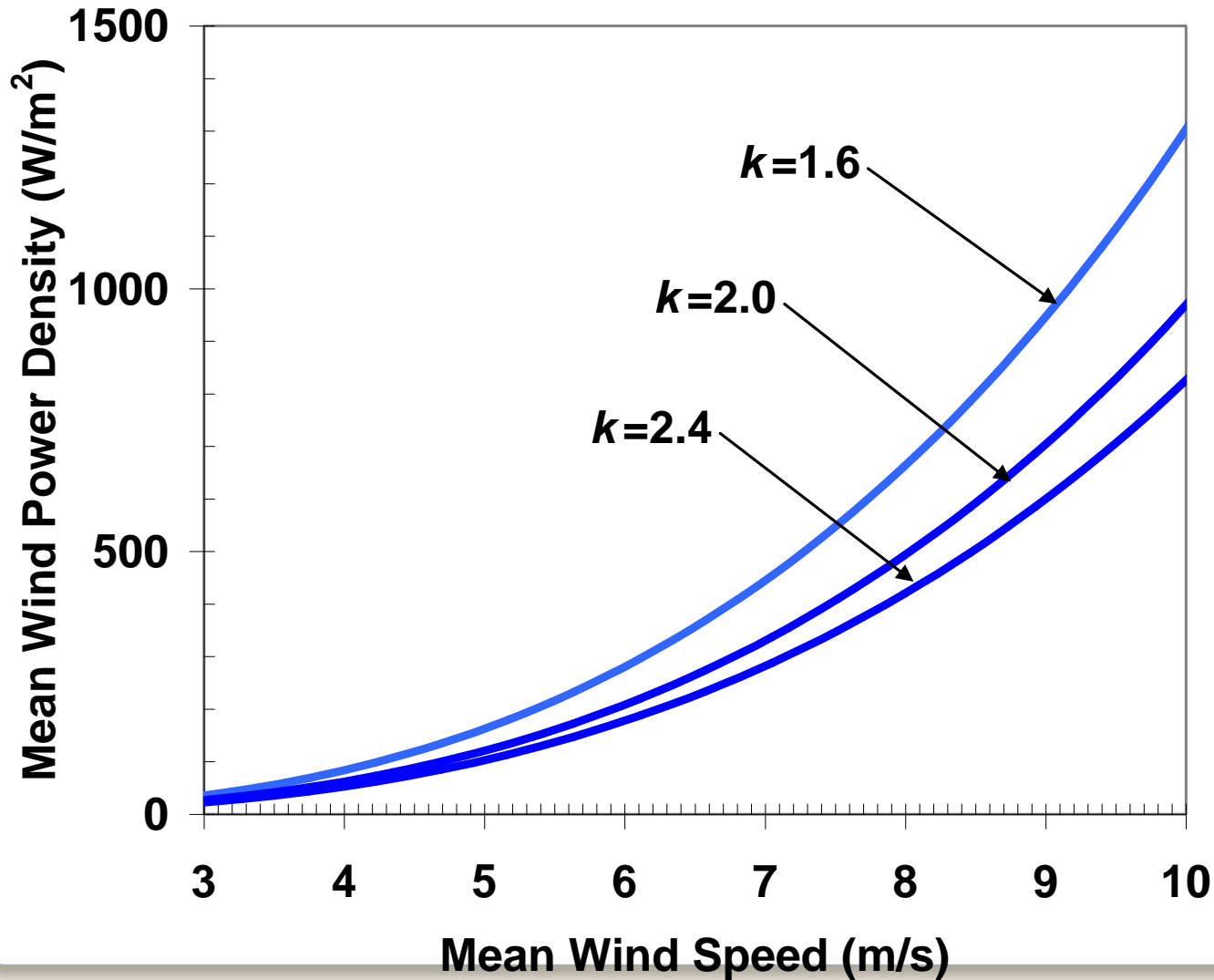
$$f(u) = \frac{k}{c} \left( \frac{u}{c} \right)^{k-1} e^{-(u/c)^k}$$



Distribuição da velocidade do vento

## Distribuição de Weibull

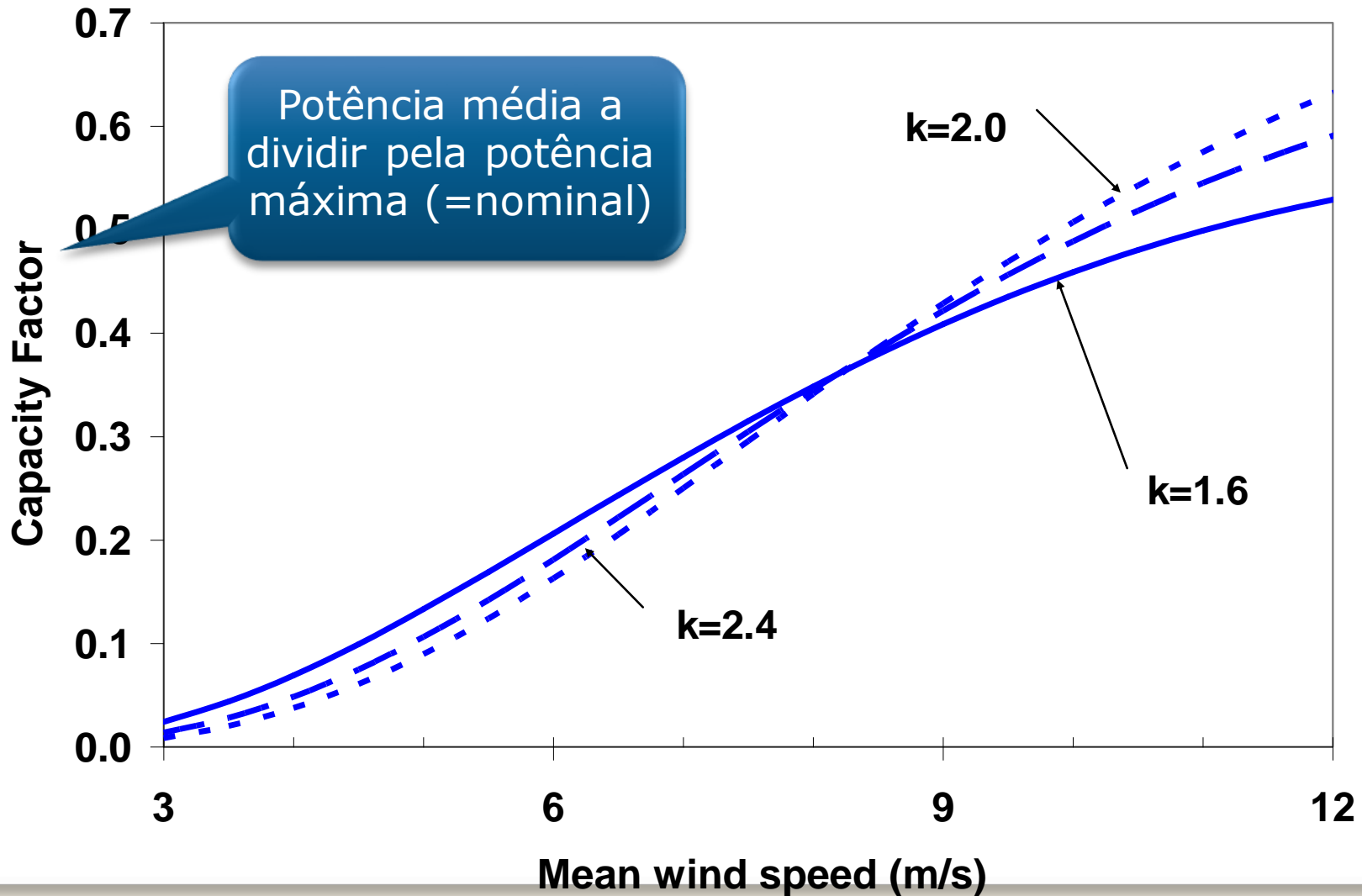
$$f(u) = \frac{k}{c} \left( \frac{u}{c} \right)^{k-1} e^{-(u/c)^k}$$



Distribuição da velocidade do vento

## Distribuição de Weibull

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



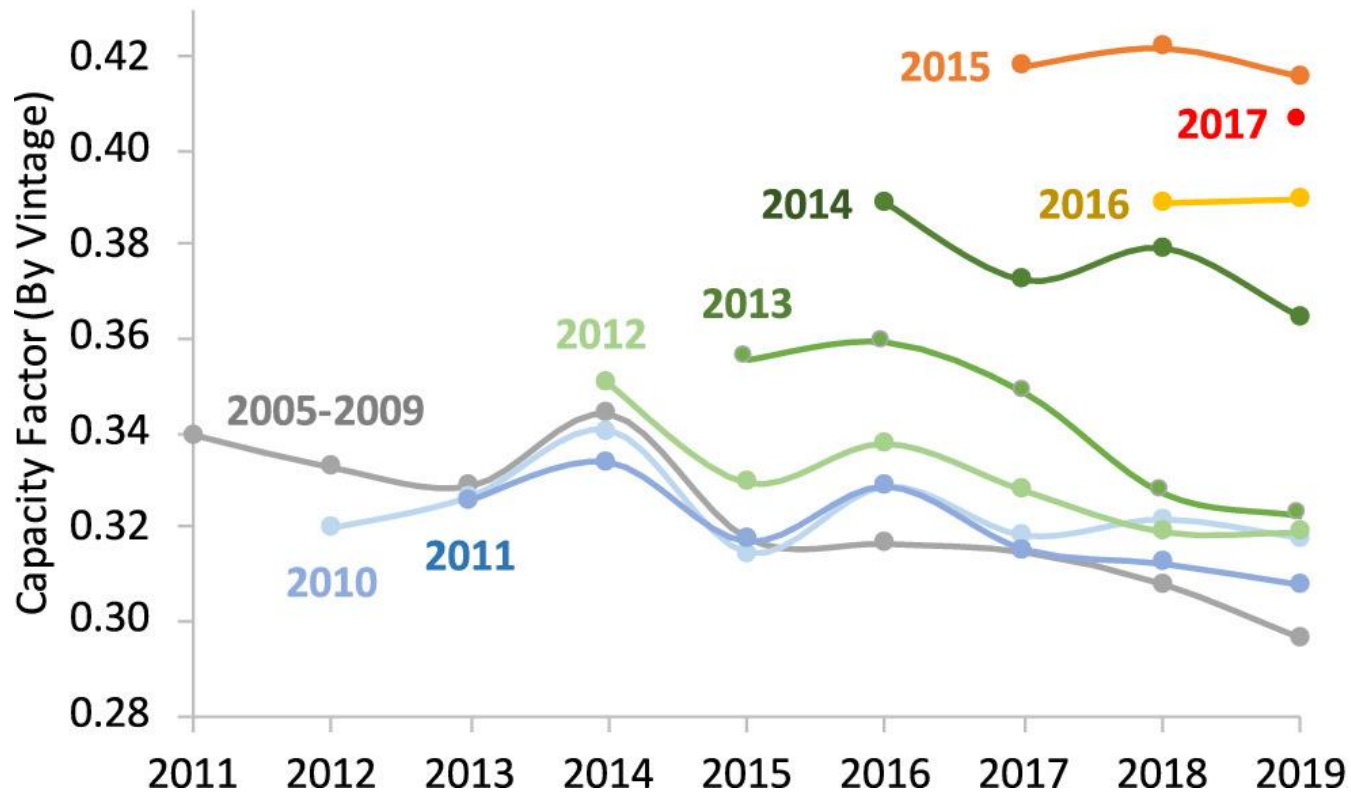
## Factor de capacidade:

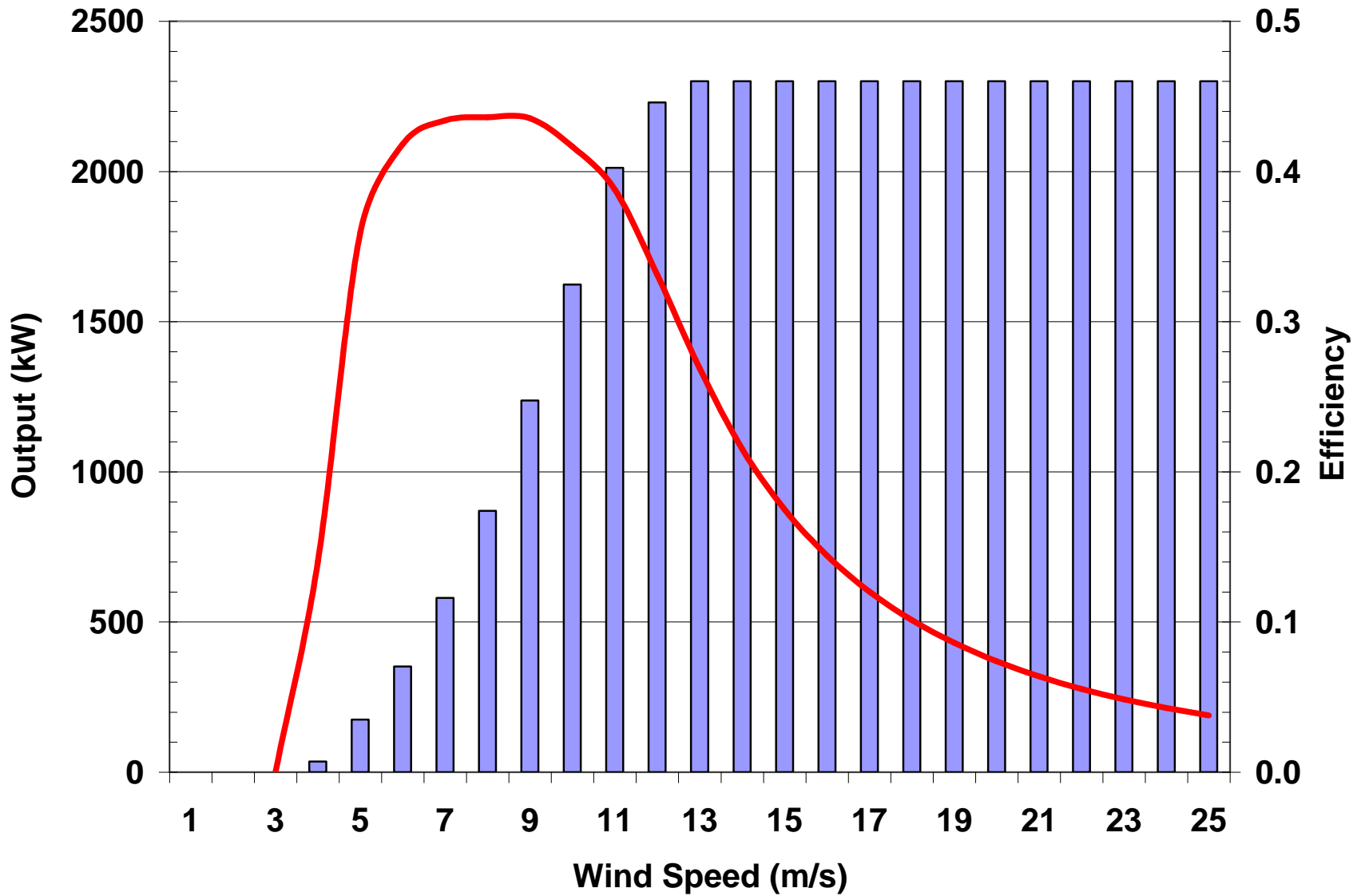
Potência média a dividir pela  
potência máxima (=nominal)

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

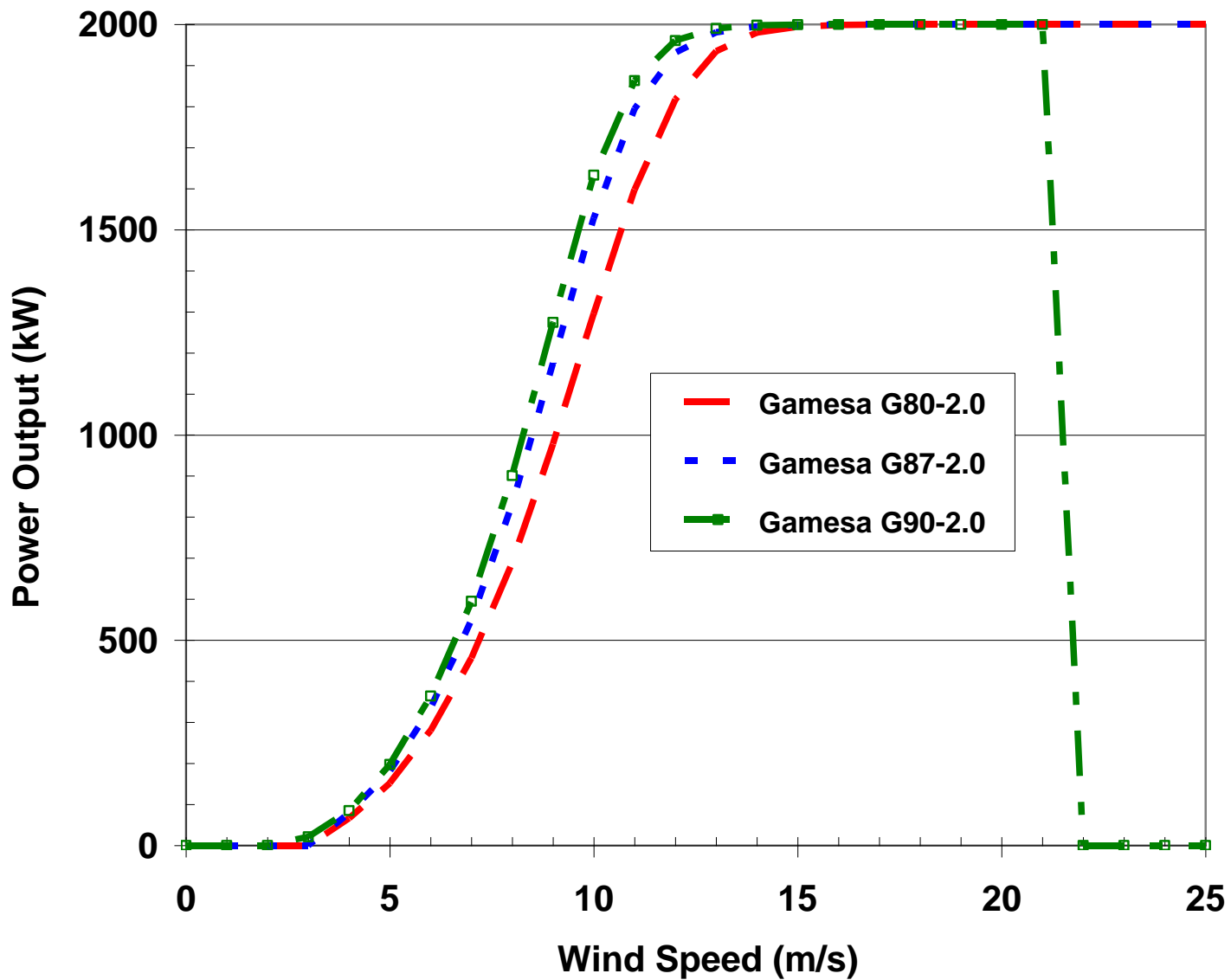


## Factor de capacidade: Potência média a dividir pela potência máxima (=nominal)

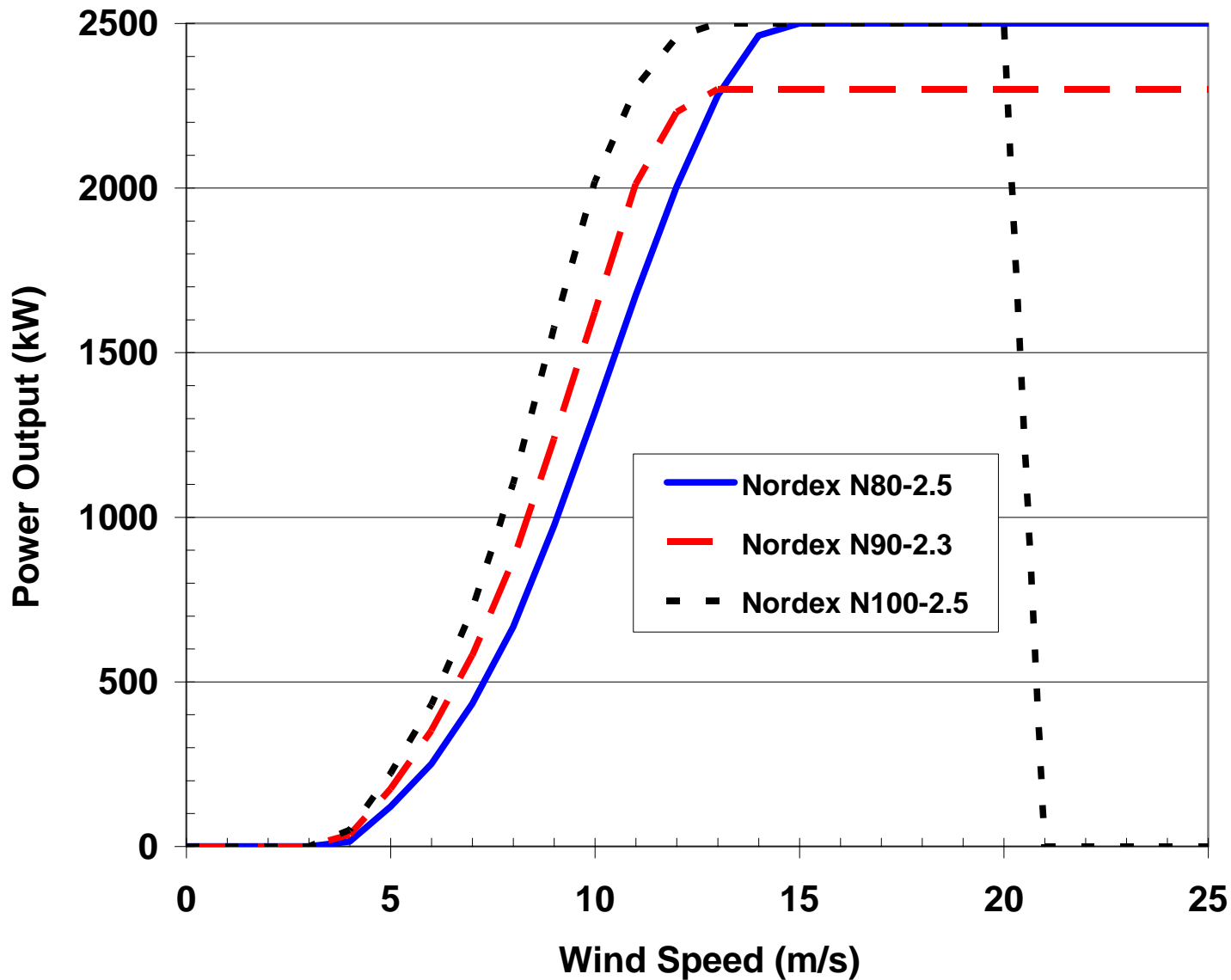




Eficiência diminui com velocidade de vento porque limitada à potência nominal



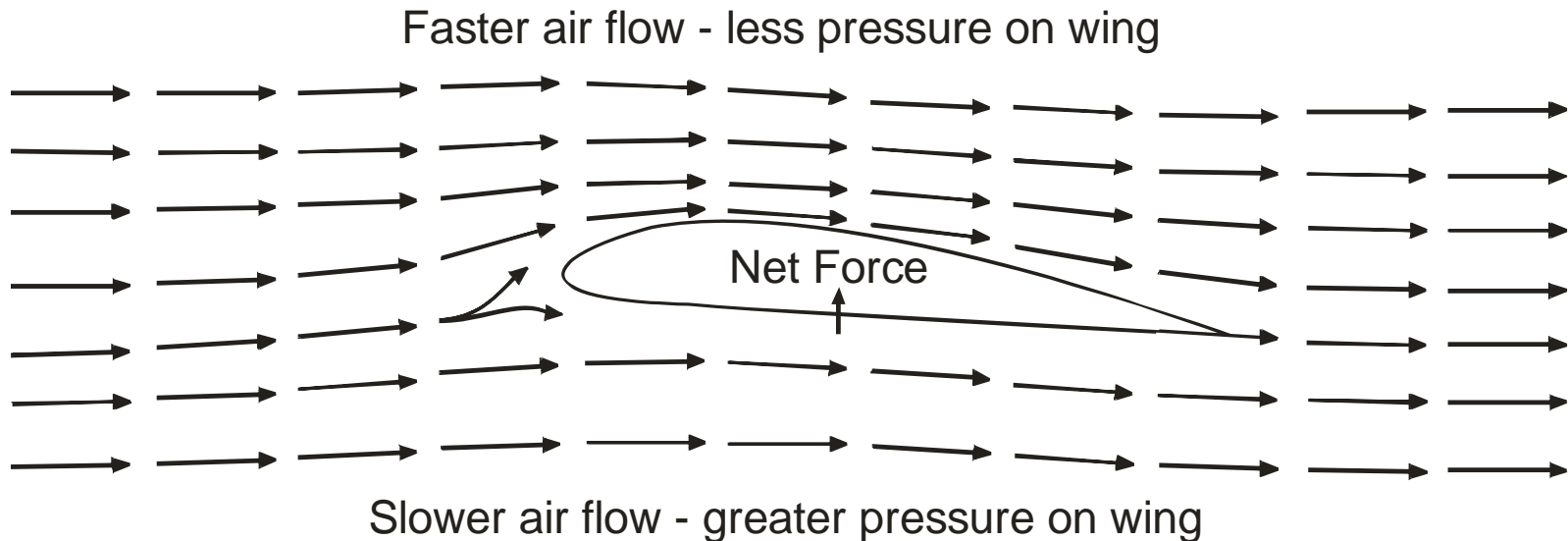
Curvas de potência para diferentes diâmetros de rotor



Curvas de potência para diferentes diâmetros de rotor e geradores

## Qual a eficiência de uma turbina eólica

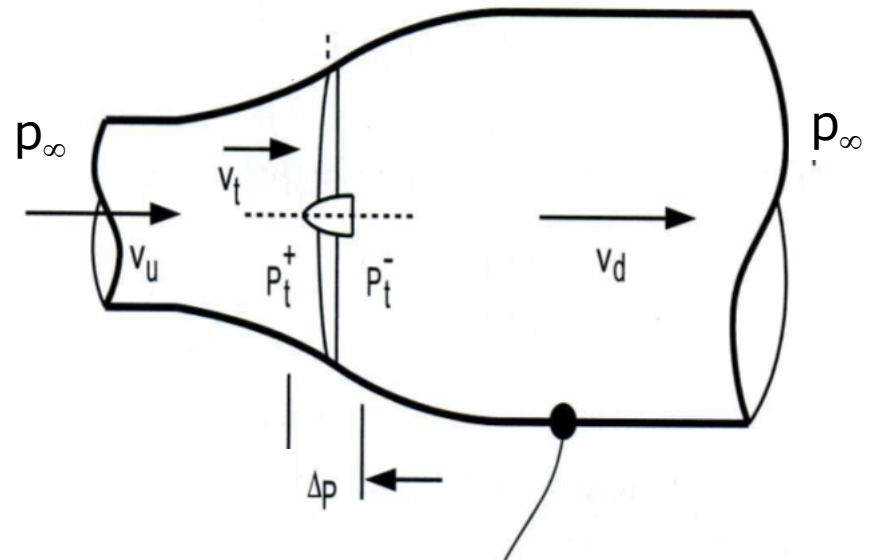
A pá de uma turbina funciona como uma asa de avião. O mecanismo é baseado na diferença de pressões nas duas faces da pá e não na força!



## 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)

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

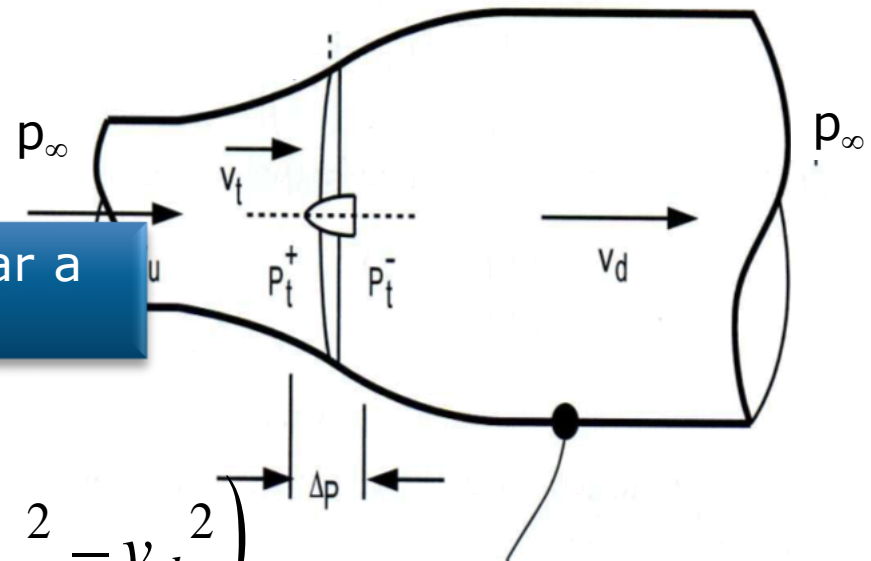


## Qual a eficiência de uma turbina eólica

Trabalho realizado na turbina

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

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

$$V_u = V_t = V_d$$

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

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

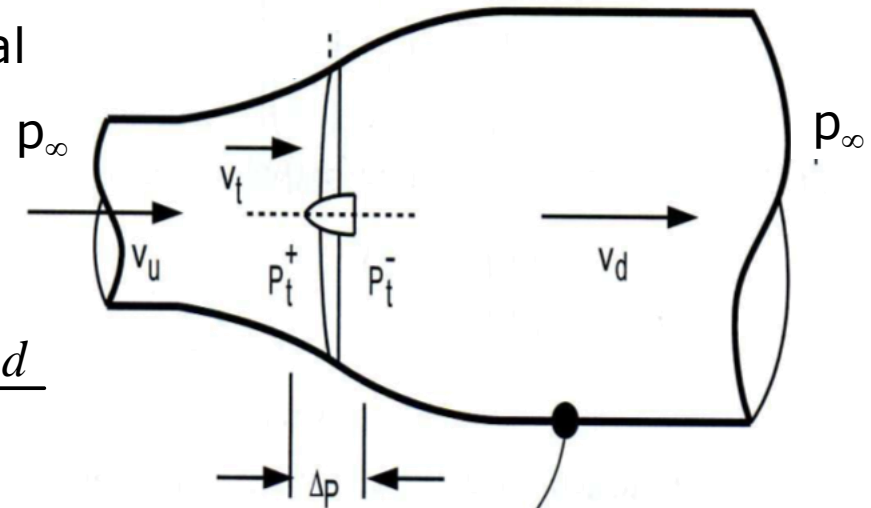
e portanto

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

### 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

$$V_u = V_t = V_d$$

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

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

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

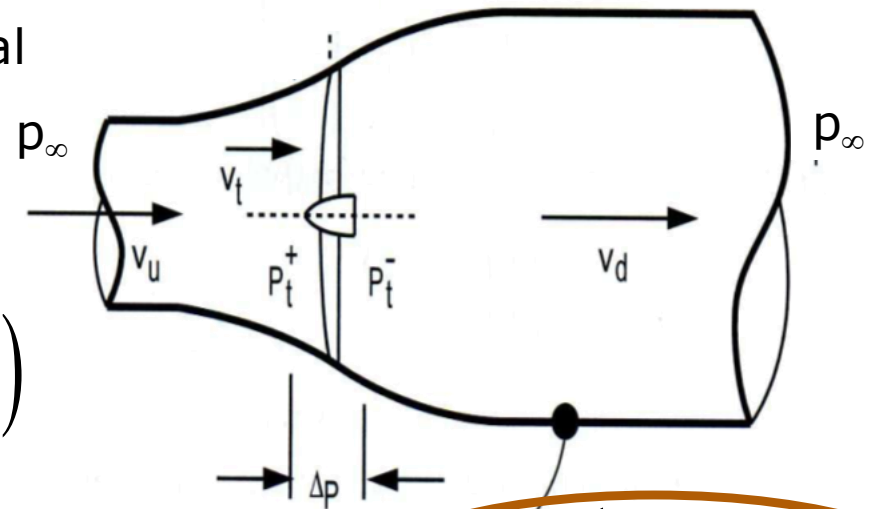
### Conservação de momento linear

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

$$(p_t^+ - p_t^-) A_t = \rho (A_u v_u^2 - A_d v_d^2)$$

$$= \rho A_t v_t (v_u - v_d)$$

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

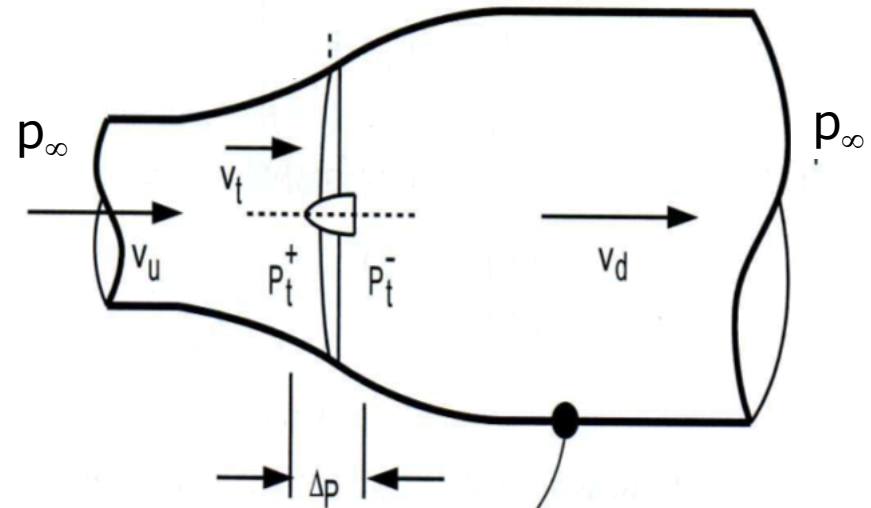


$$v_t = \frac{1}{2} (v_u + v_d)$$

## Qual a eficiência de uma turbina eólica

Trabalho realizado na turbina

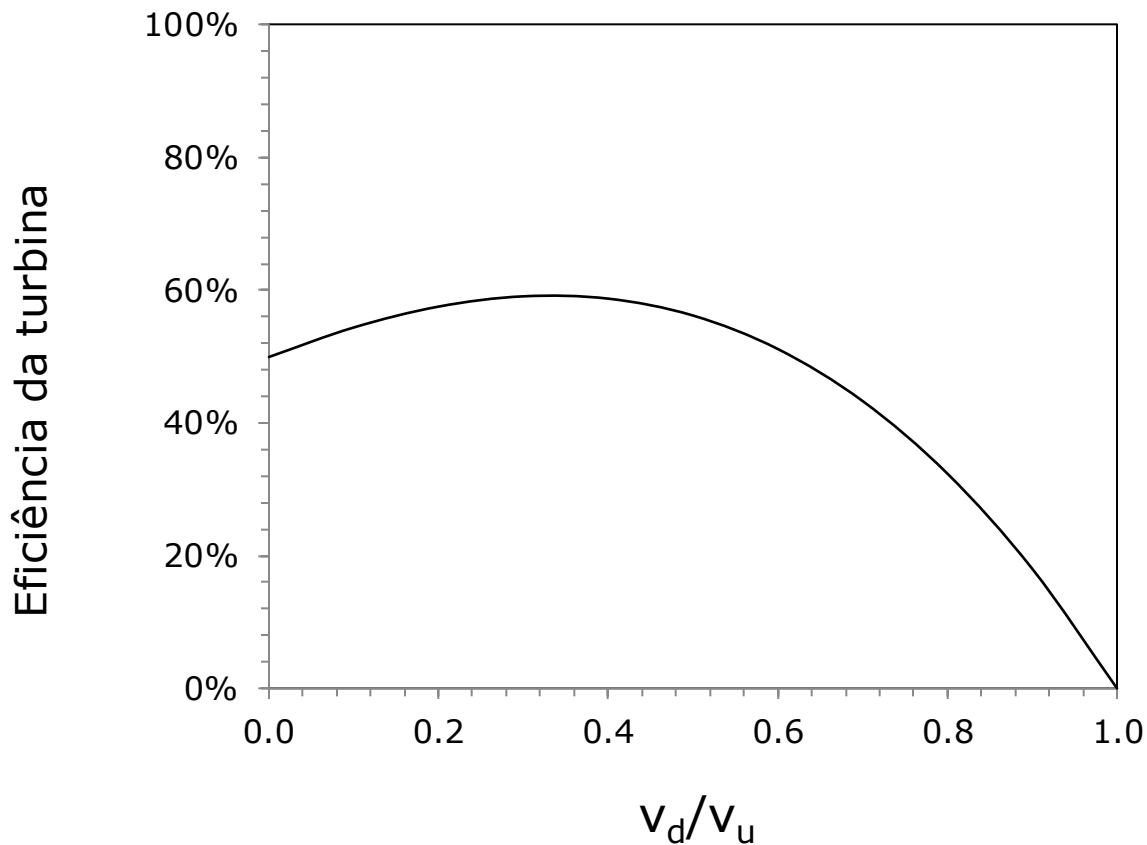
$$W_t = \frac{1}{2} A \rho (v_u^2 - v_d^2) v_t = \frac{1}{4} A \rho (v_u^2 - v_d^2) (v_u + v_d)$$



$\left. \right) \frac{16}{27}$

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%

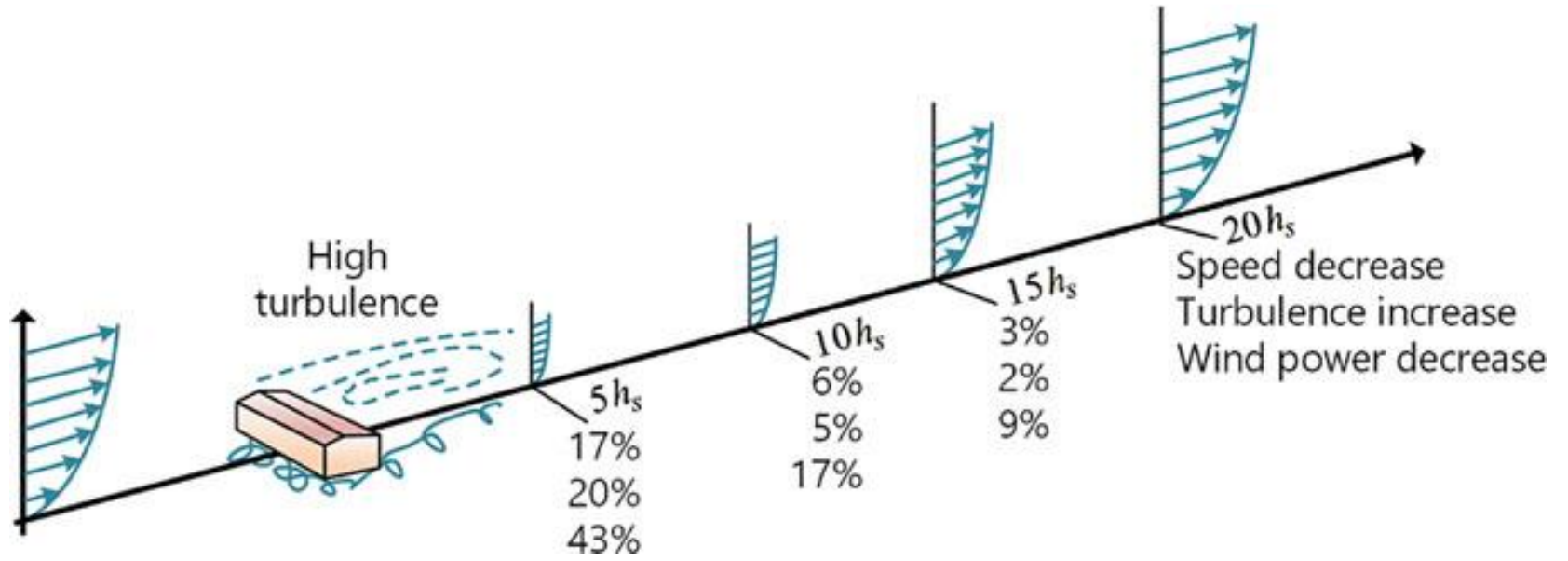
= 44% (valor pico) x 96-99% x 96-99%

= 25% (valor médio) x 96-99% x 96-99%

**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

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



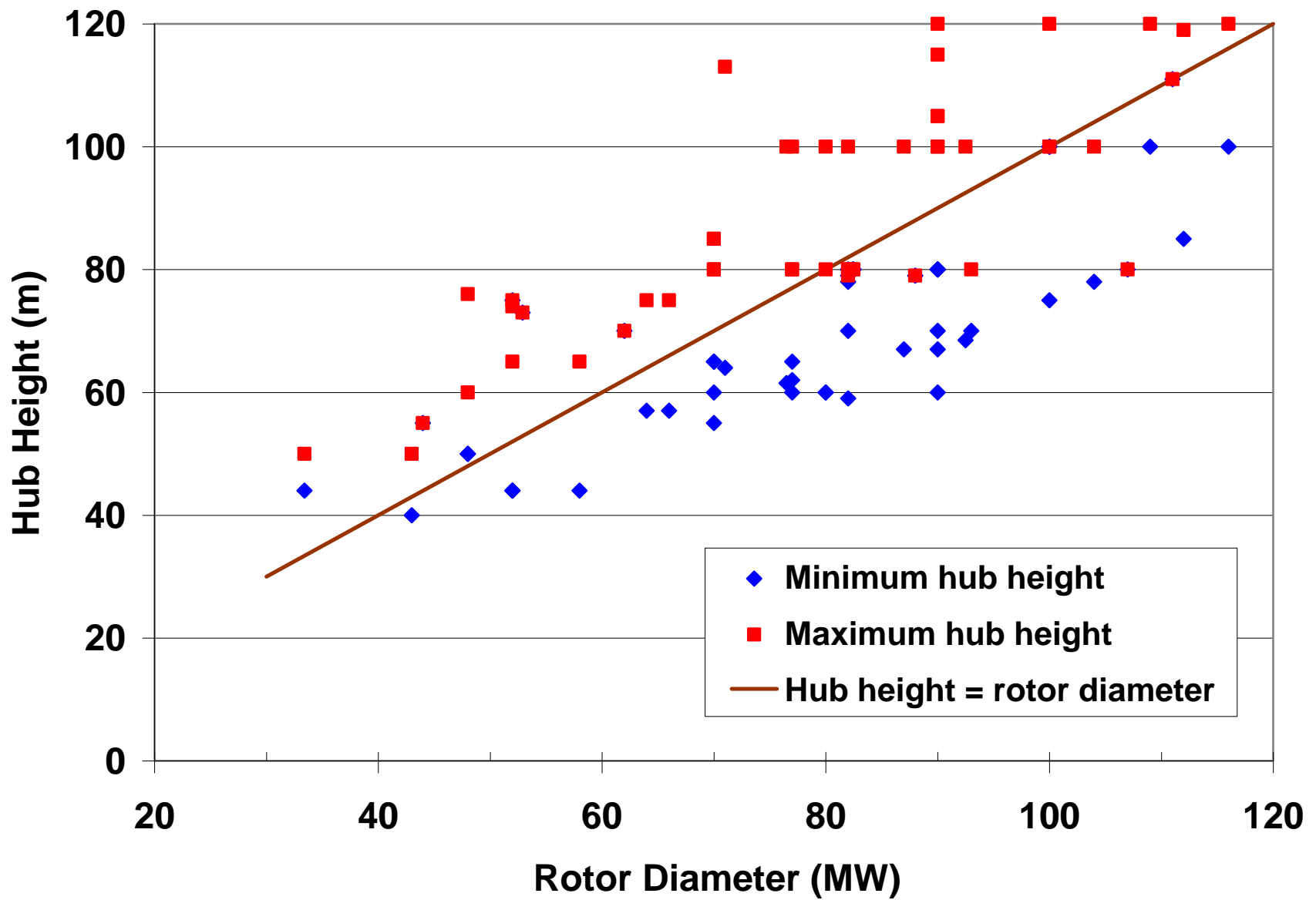
## Qual a densidade de energia de uma parque eólico



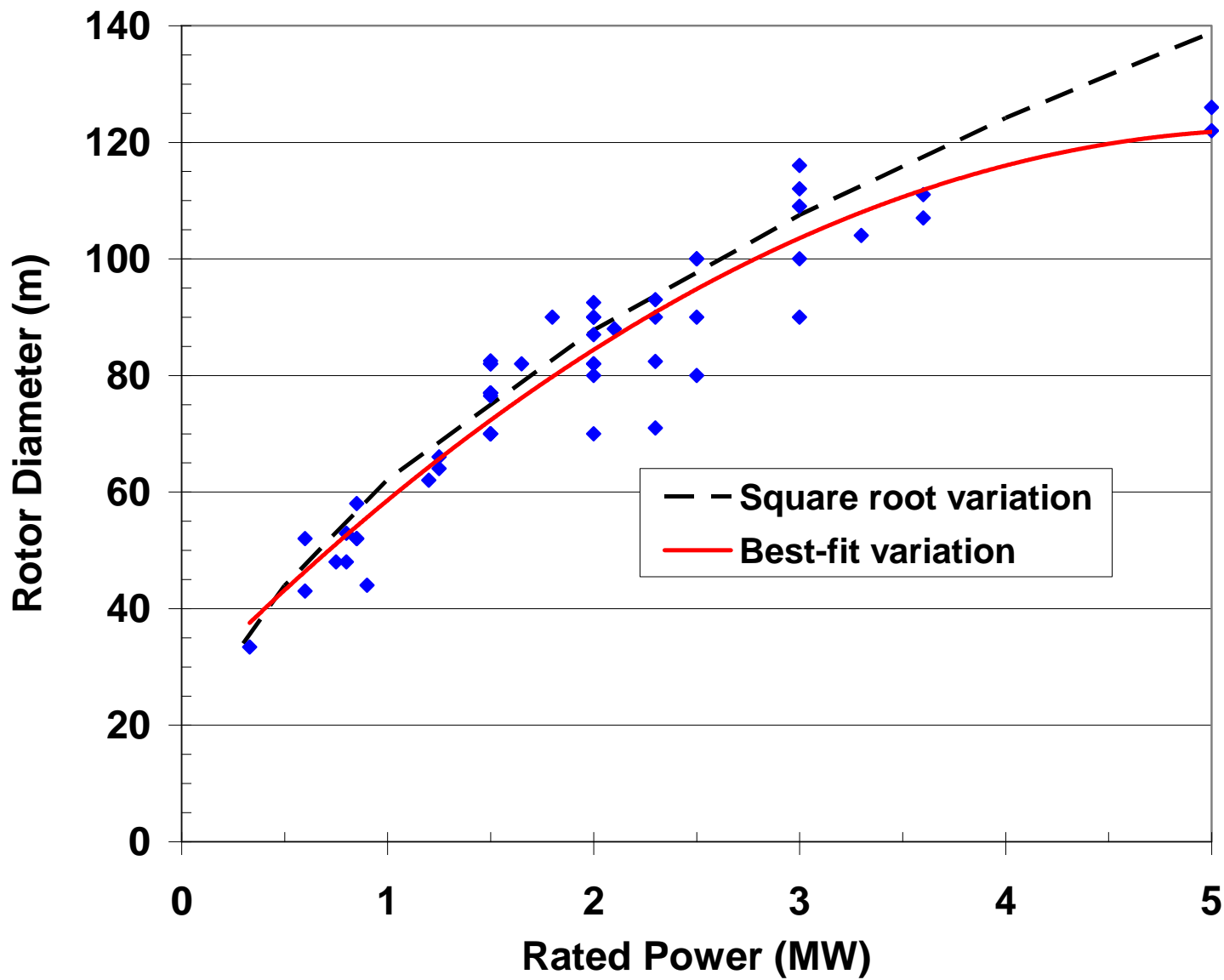
Assumindo

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

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/m<sup>2</sup>) não depende da potência, porquê fazer cada vez maiores turbinas?

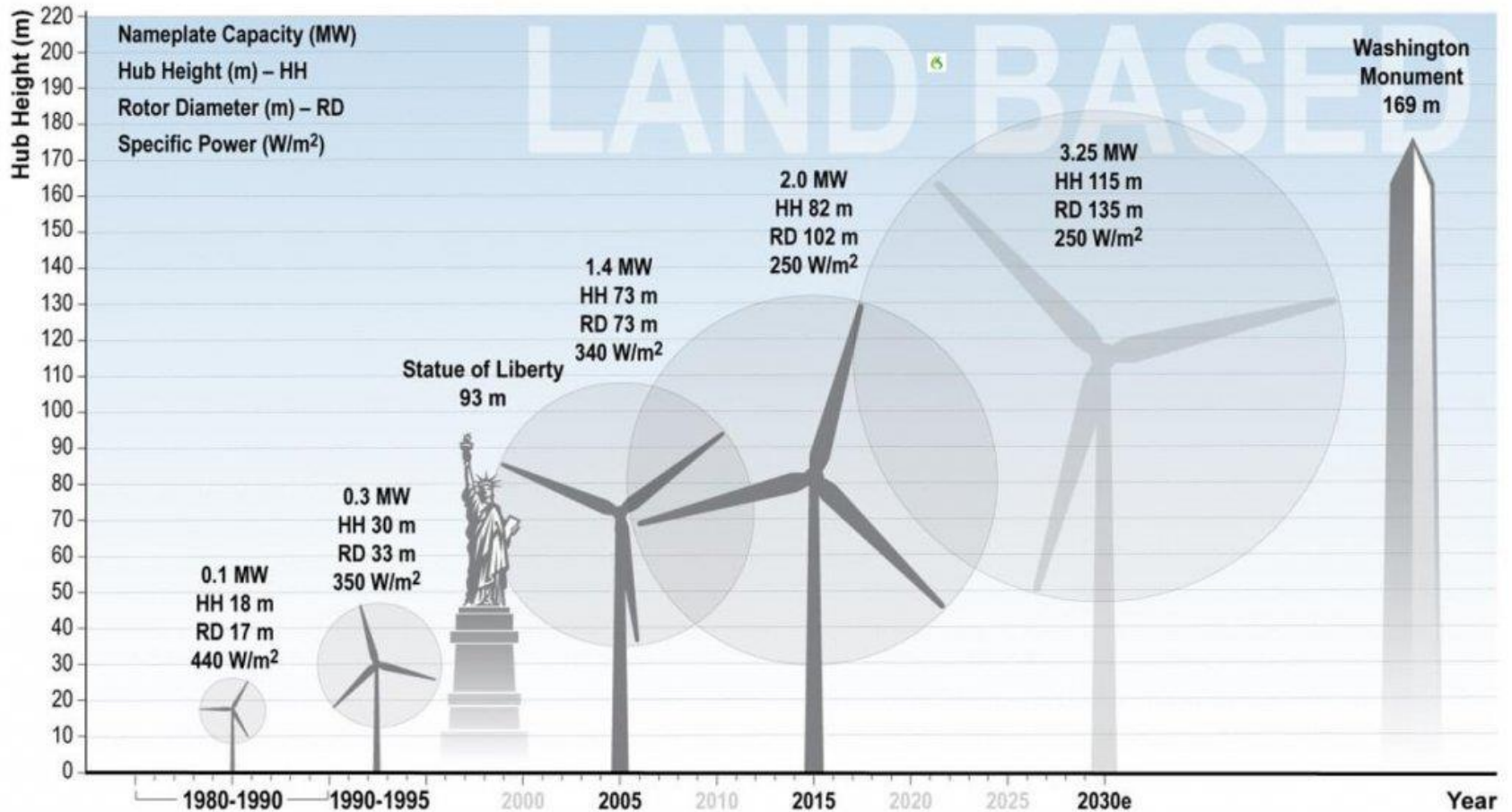


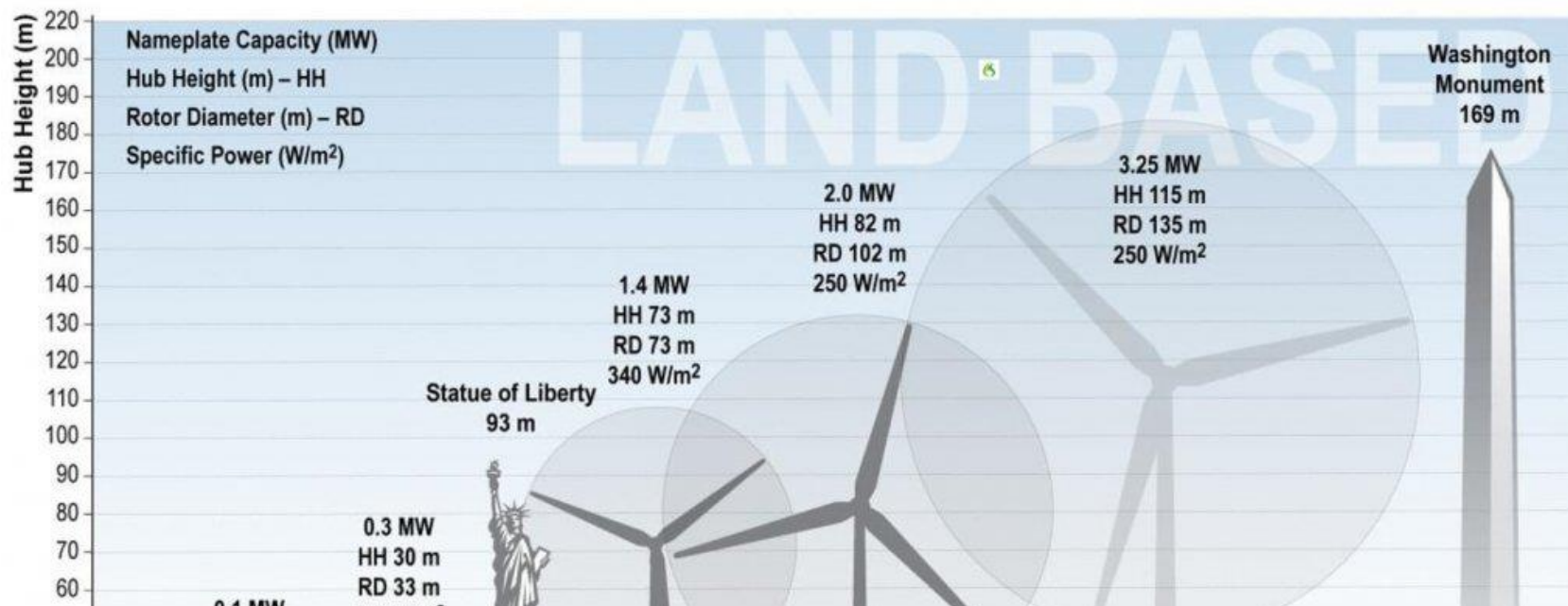
Figure 1. Expected Growth in Land-Based Turbine Size in North America

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



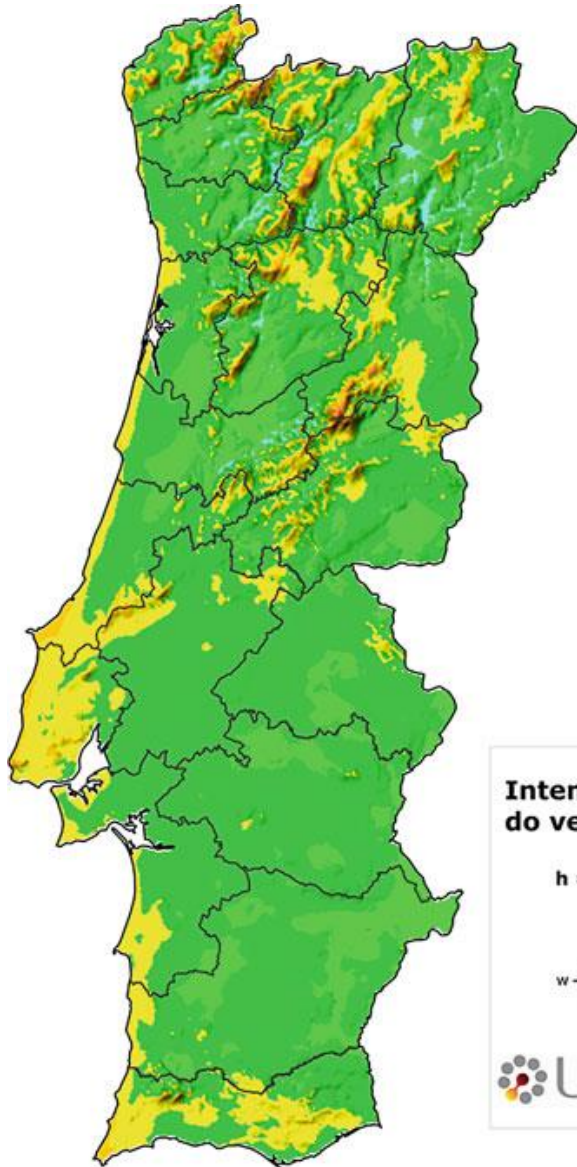
- Como a potência aumenta com  $v^3$  e a velocidade média da vento aumenta com a altura, turbinas mais altas produzem mais do que turbinas menores
- A diferença entre vento no topo e fundo das pás é menor quanto mais alta a turbina
- A turbulência diminui com altura, e portanto distribuição de vento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

Se a densidade de energia ( $\text{kWh/m}^2$ ) 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

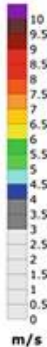


**Intensidade do vento**

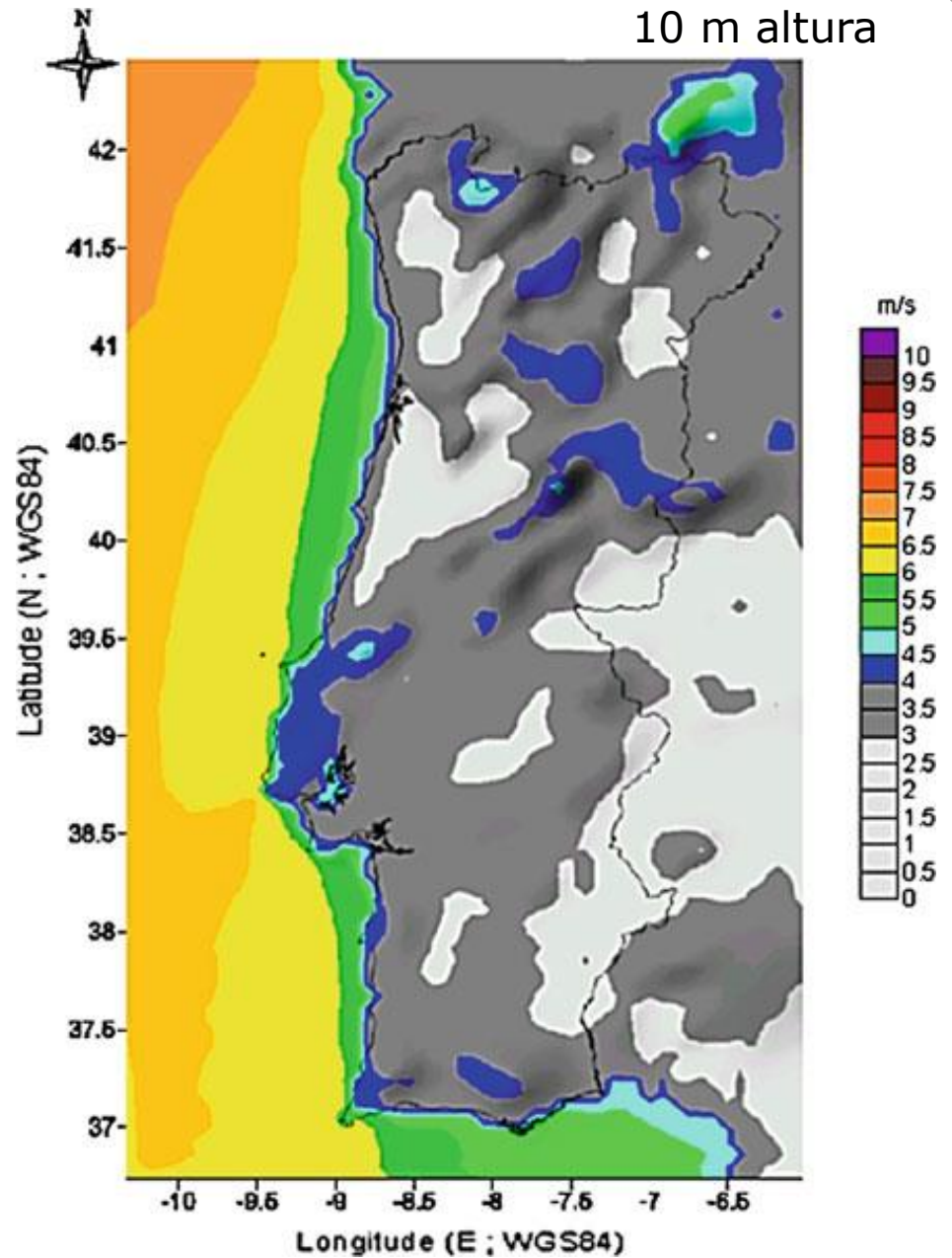
**h = 80m**



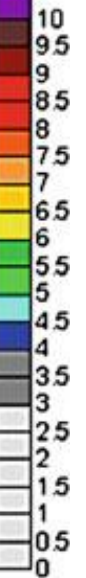
**LNEG**



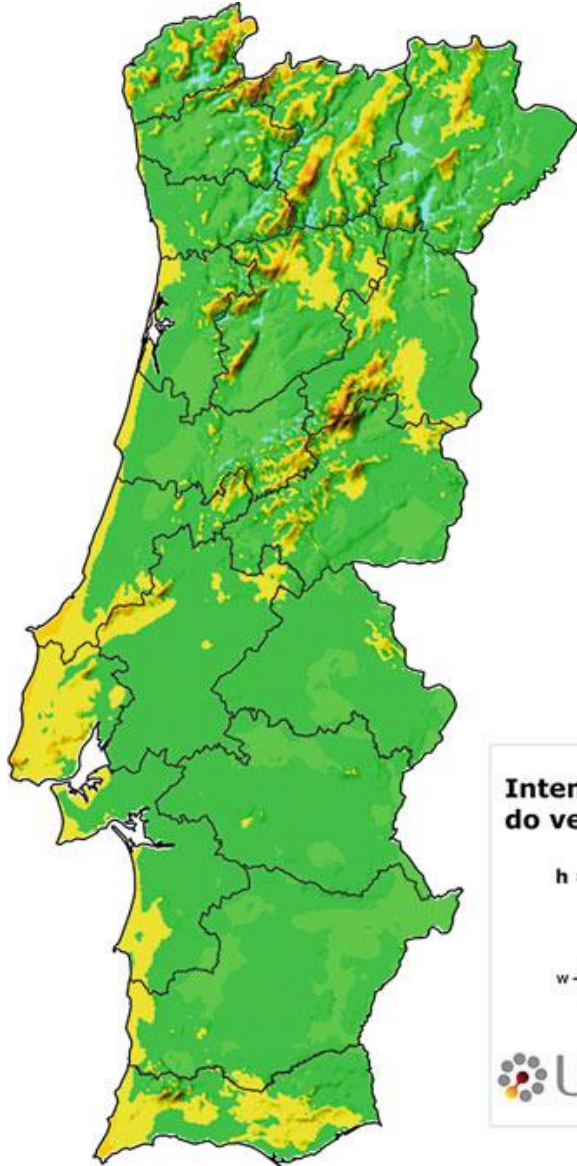
10 m altura



m/s



80 m altura



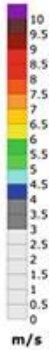
**Intensidade do vento**

**h = 80m**

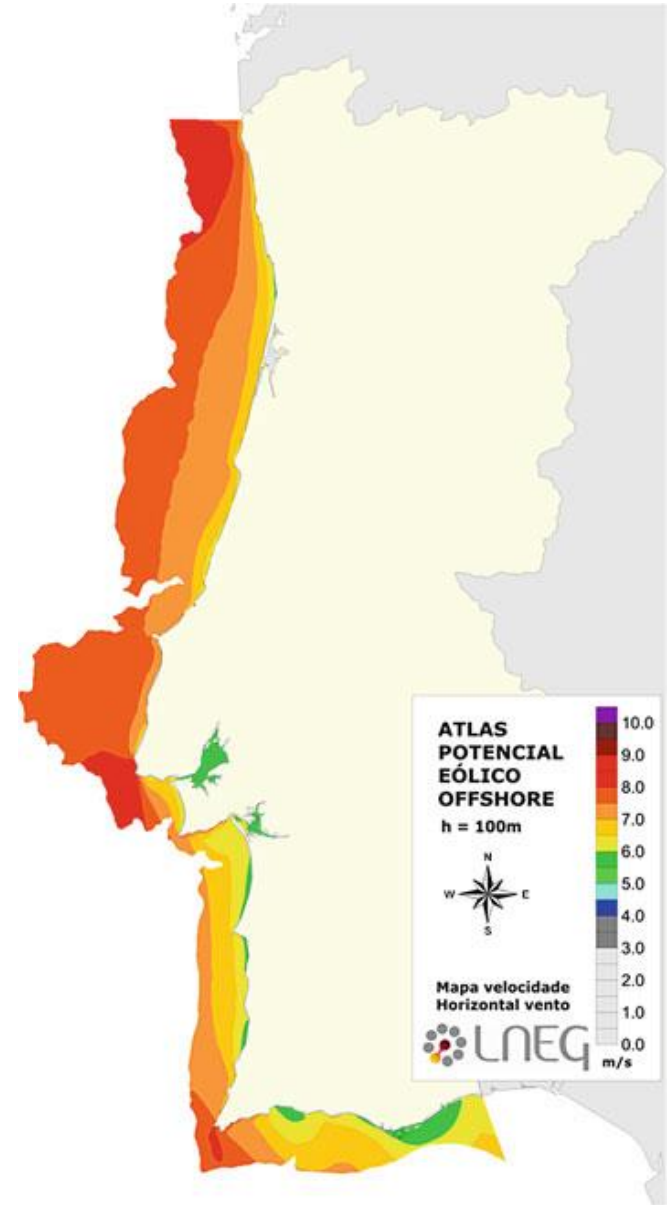


**LNEG**

m/s



100 m altura



**ATLAS POTENCIAL EÓLICO OFFSHORE**

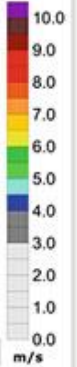
**h = 100m**



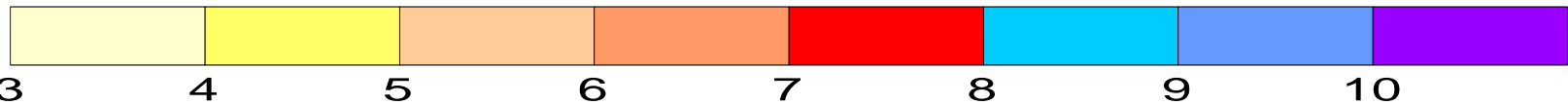
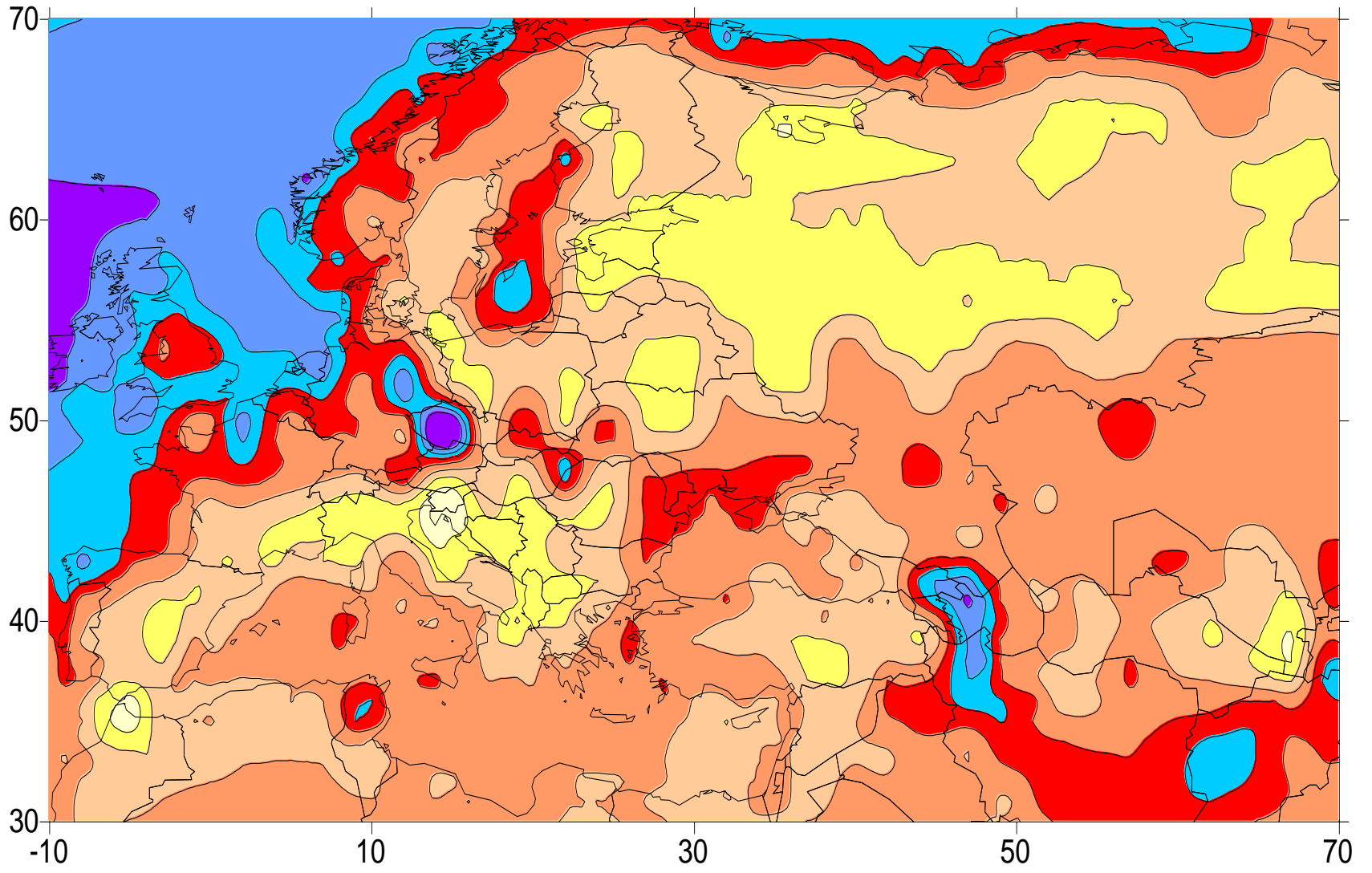
**Mapa velocidade Horizontal vento**

**LNEG**

m/s







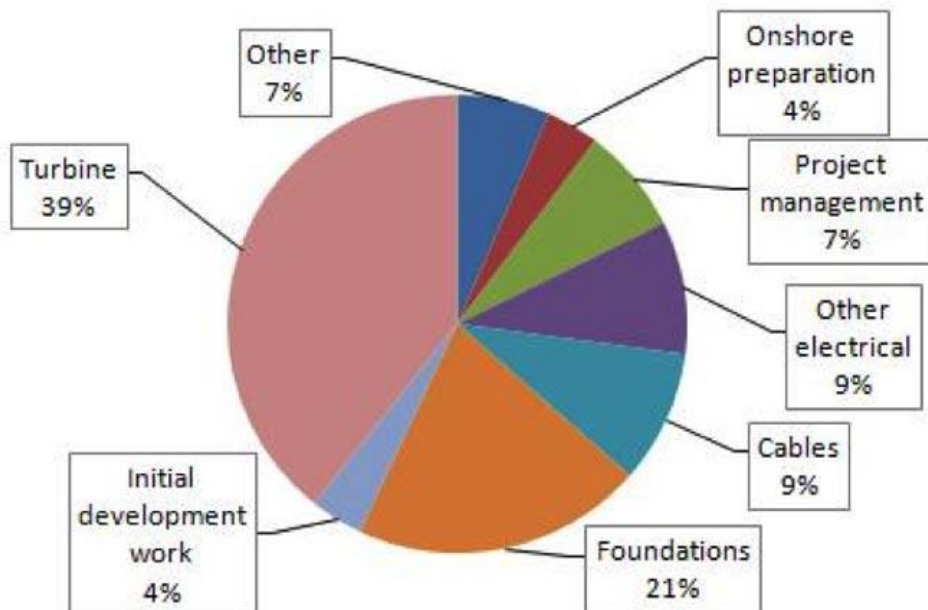
Wind speed (m/s) @ 100m

## Parques eólicos *offshore*

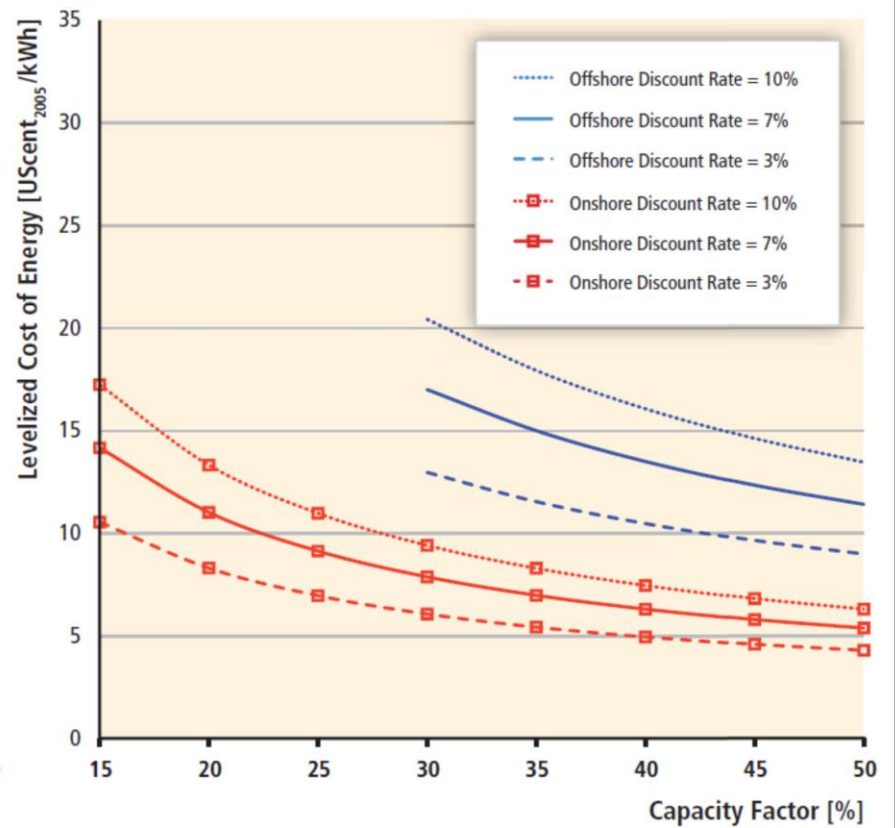
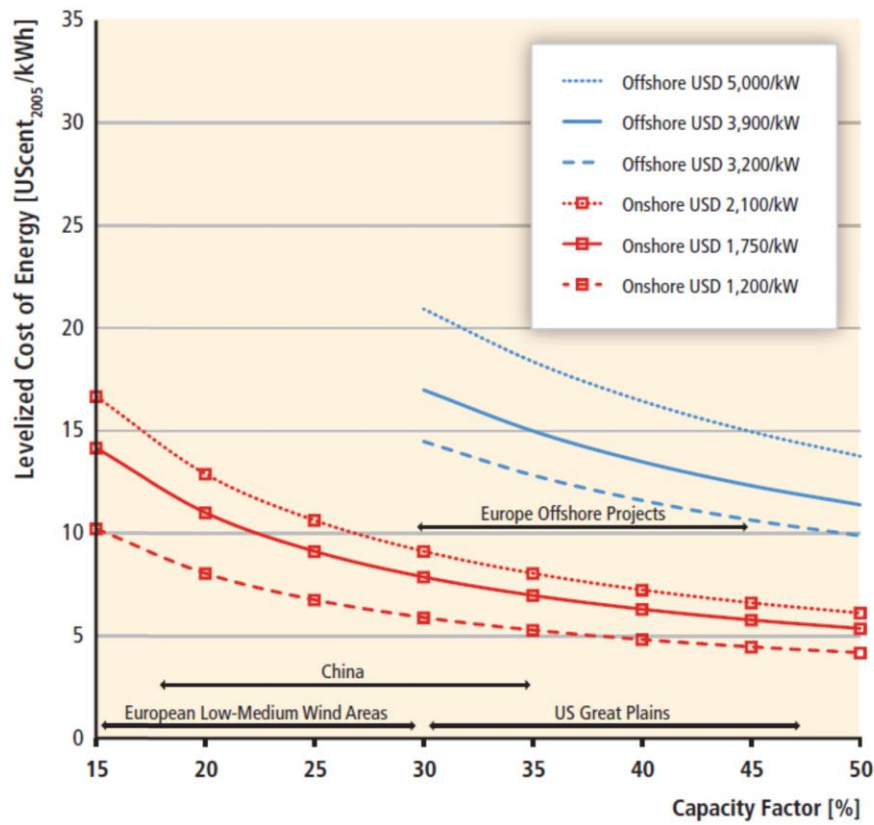
- custos mais elevados (2-3x)
- maior produção de electricidade (2x)
- maior factor de capacidade

40-50% em vez de 20-25%

Typical offshore wind energy project costs



# Parques eólicos offshore



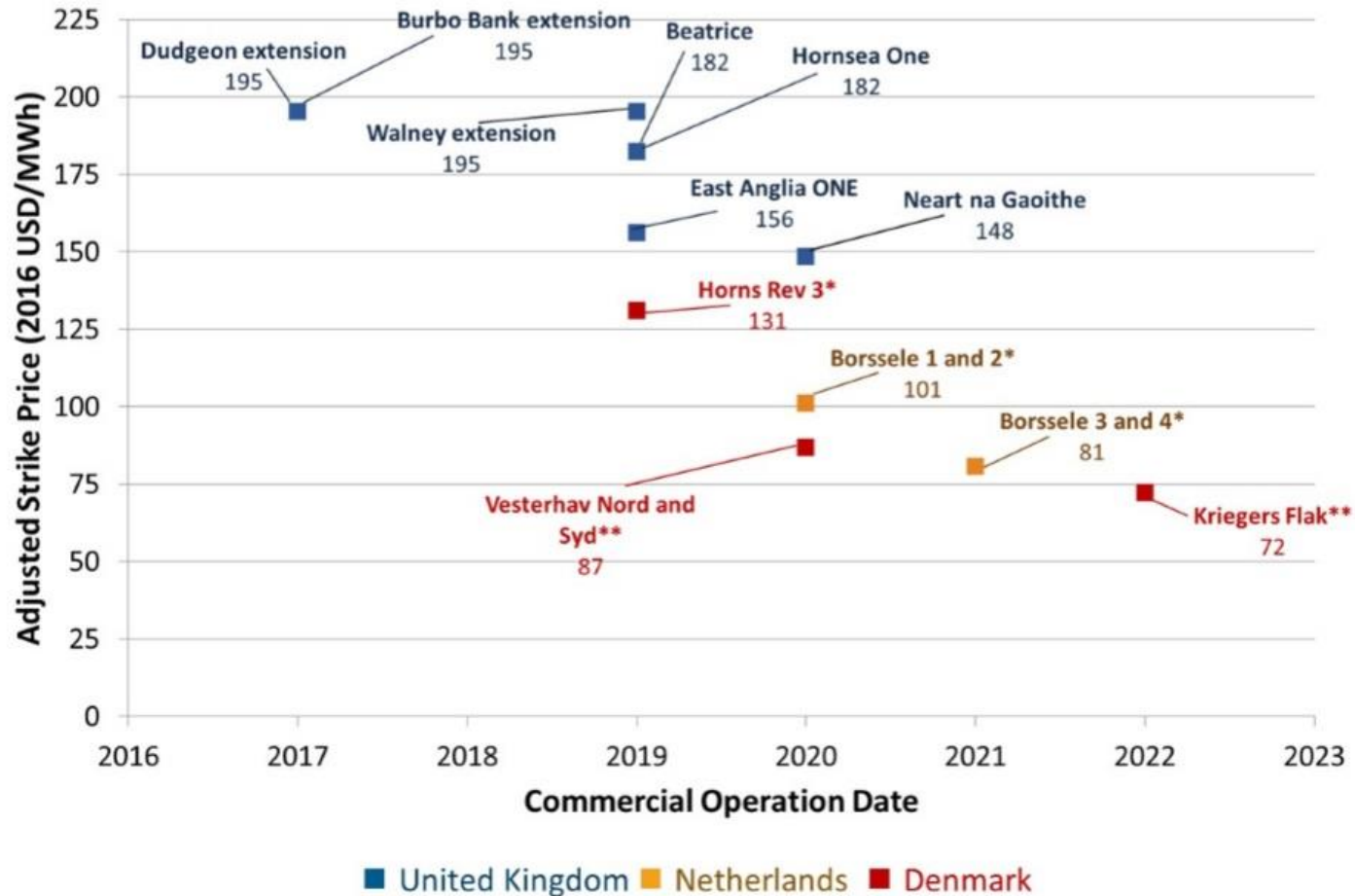


Figure 1. Recent strike prices of European offshore wind winning tenders adjusted to U.S. dollars, with grid cost, development cost, and contract length adders

# New offshore wind installations

■ Europe ■ China ■ Rest of the world

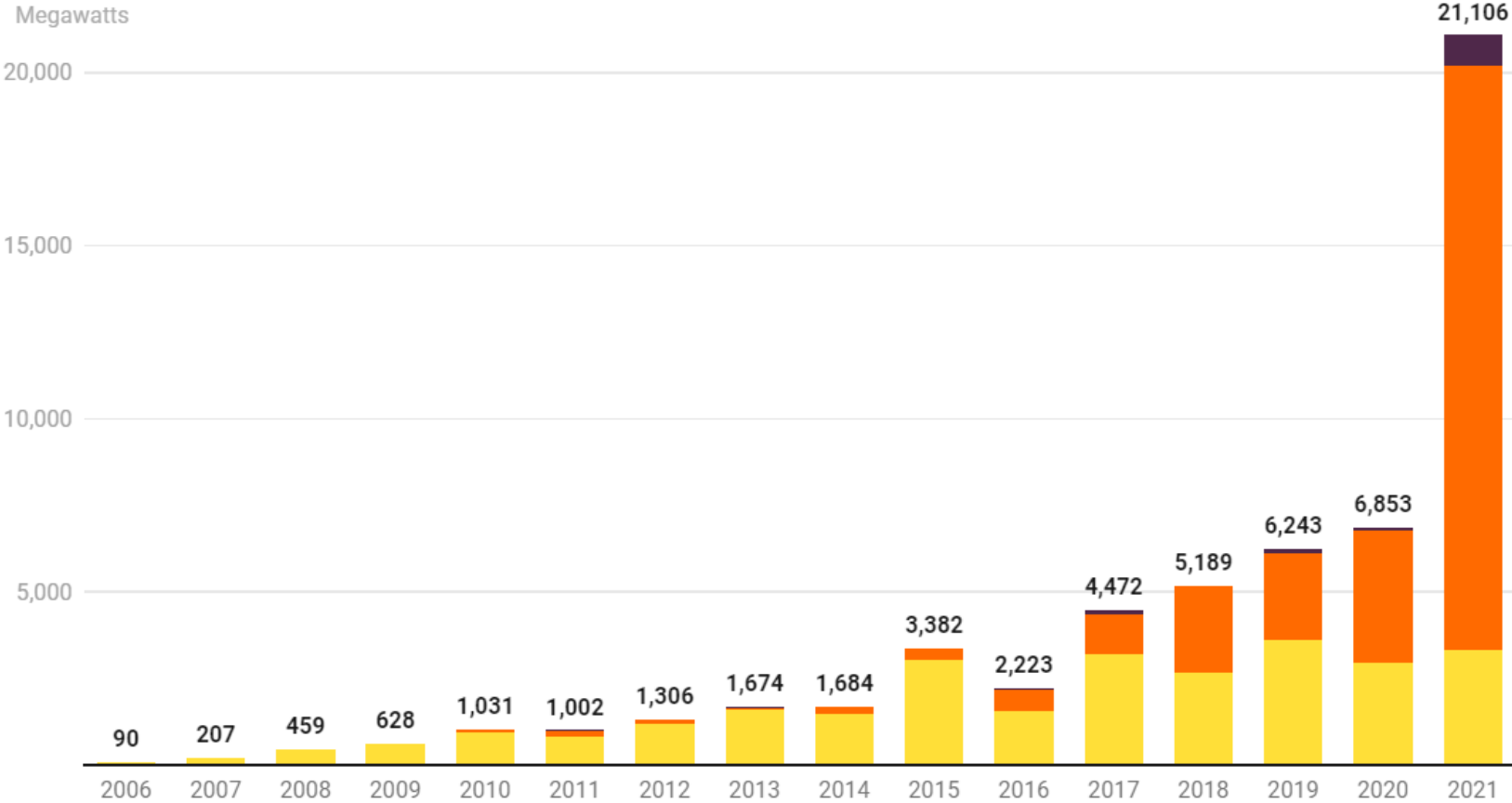
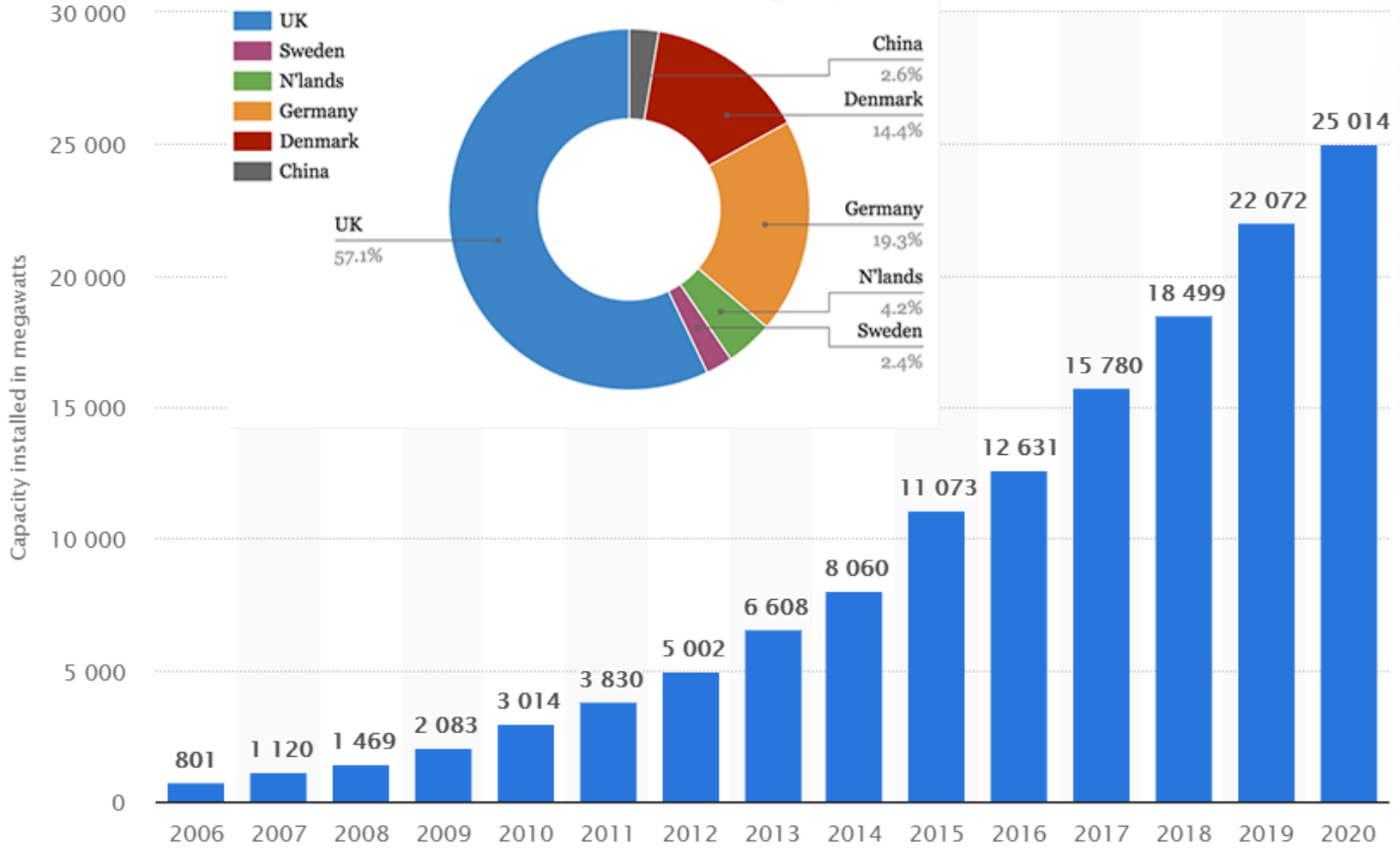
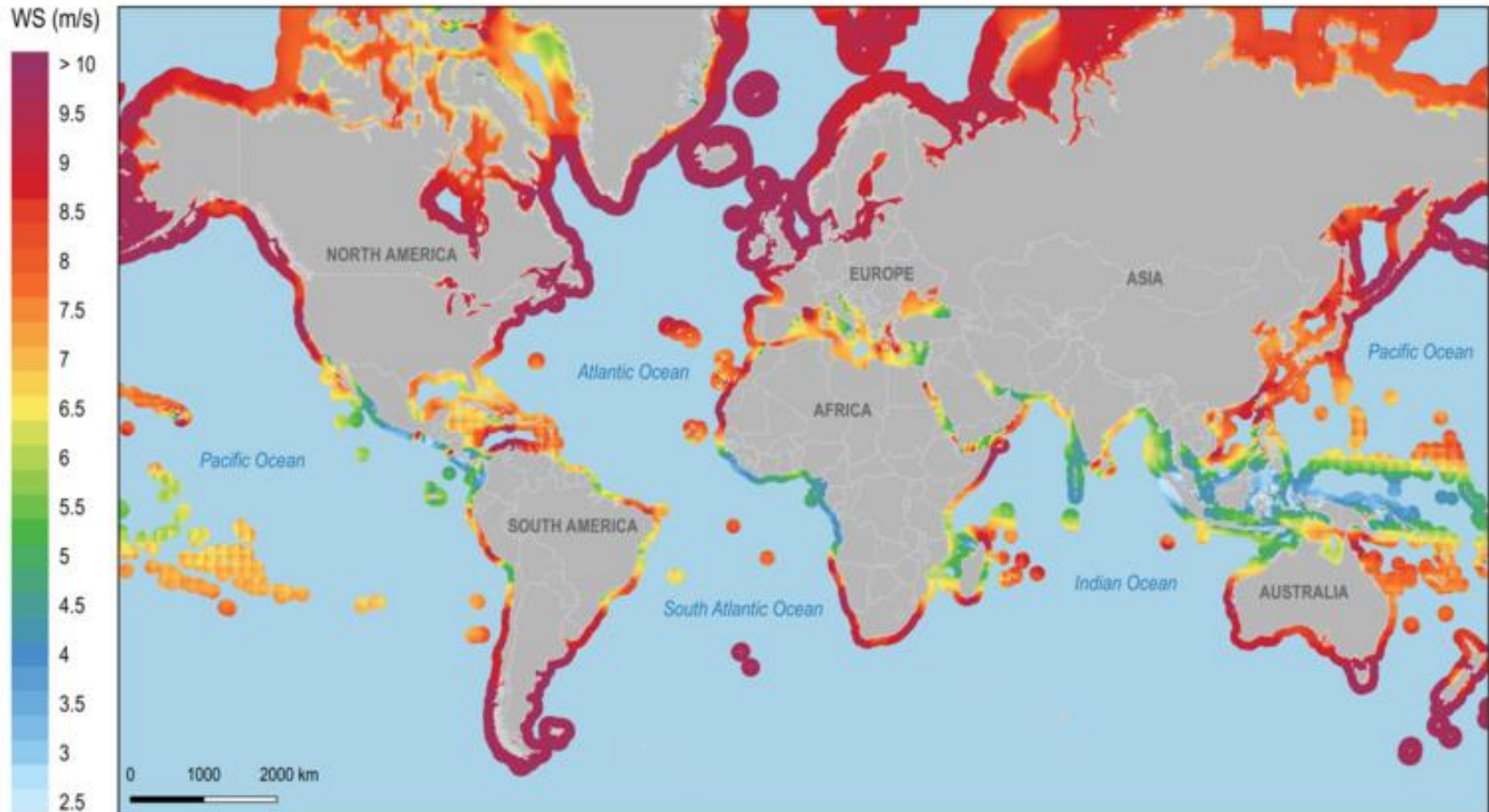


Chart: Canary Media • Source: Global Wind Energy Council • [Embed](#)

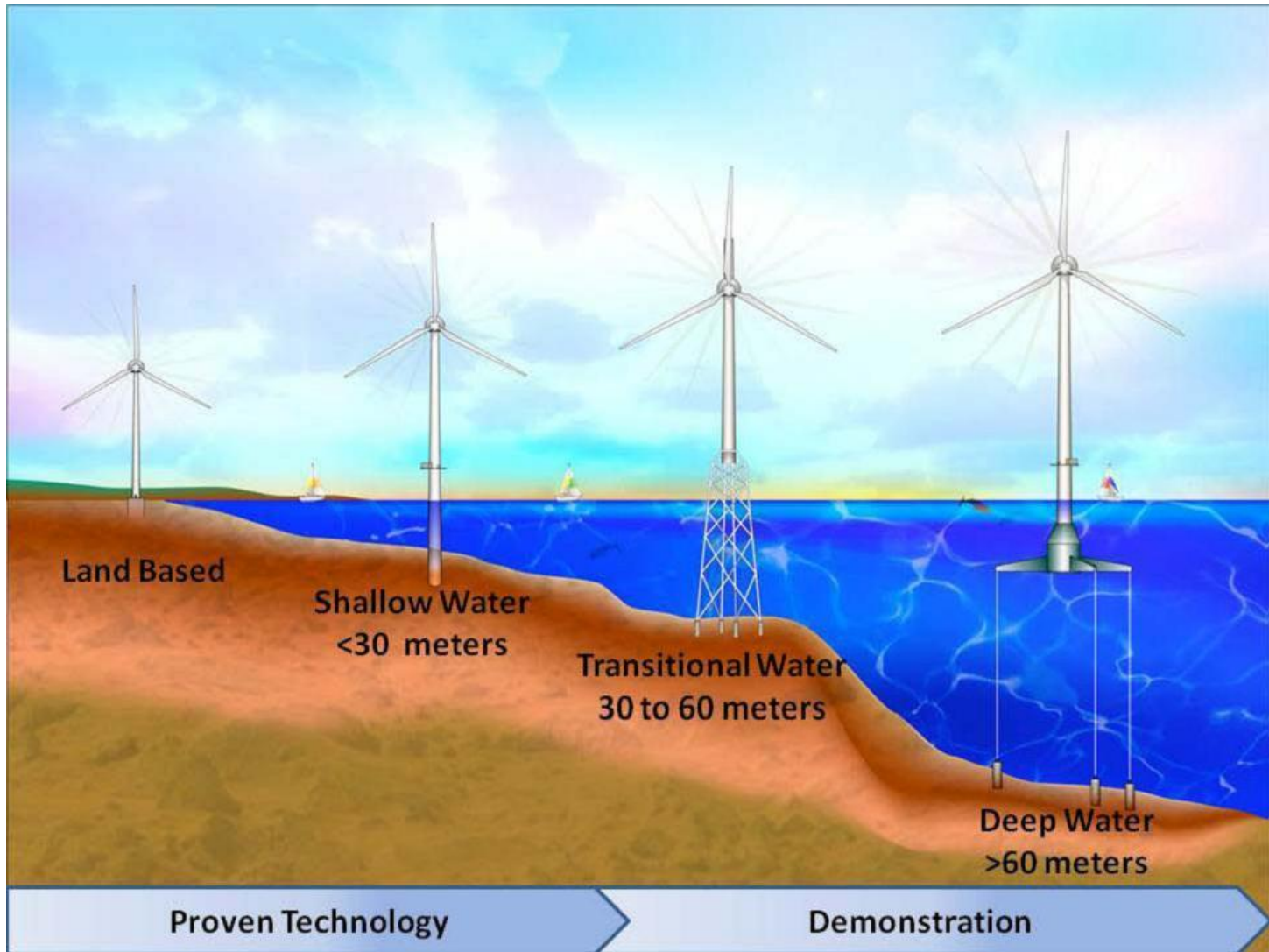
### Share of current offshore wind capacity



# Global Offshore Wind Speeds



This wind resource map provides an estimate of mean annual wind speeds (m/s) extending 200 kilometers from shore at a hub height of 100 meters. It is provided under a World Bank Group (WBG) initiative on offshore wind that is funded and led by the Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP). For more information please visit: <https://esmap.org/offshore-wind>. The wind resource data is from the Global Wind Atlas (version 3.0), a free, web-based application that provides data with a 100 m resolution based on the latest input datasets and modeling methodologies. For more information please visit: <https://globalwindatlas.info>.





# 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

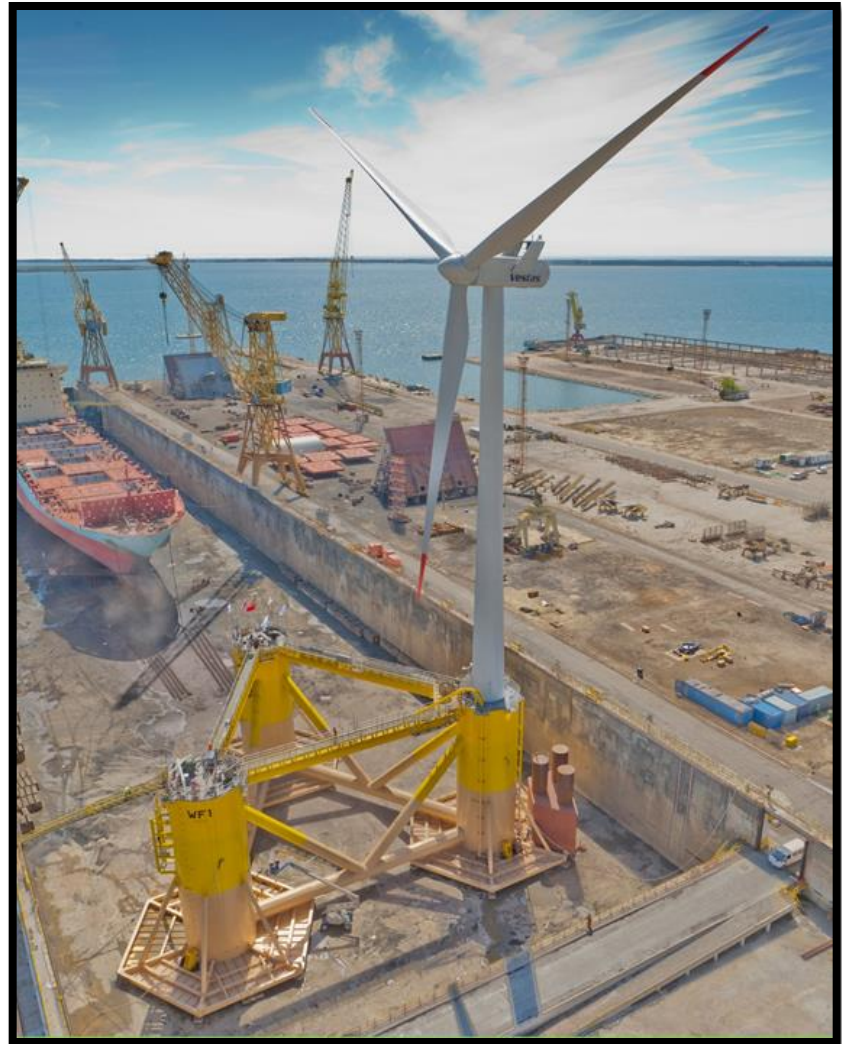
**Transformer/support platform:** Yes

## Phase 3 - Commercial

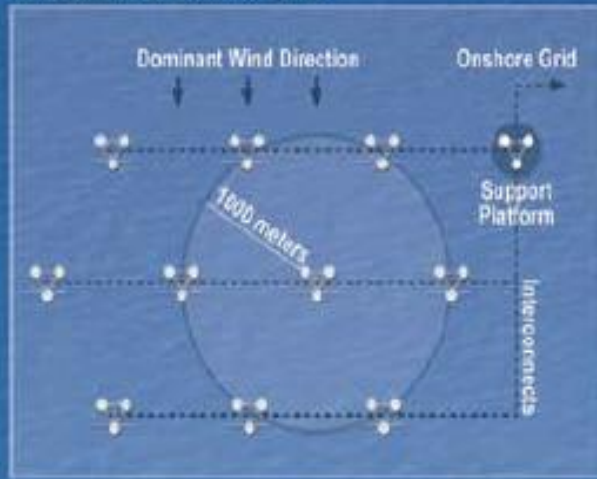
**Capacity:** 150MW, gradual build-out

**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



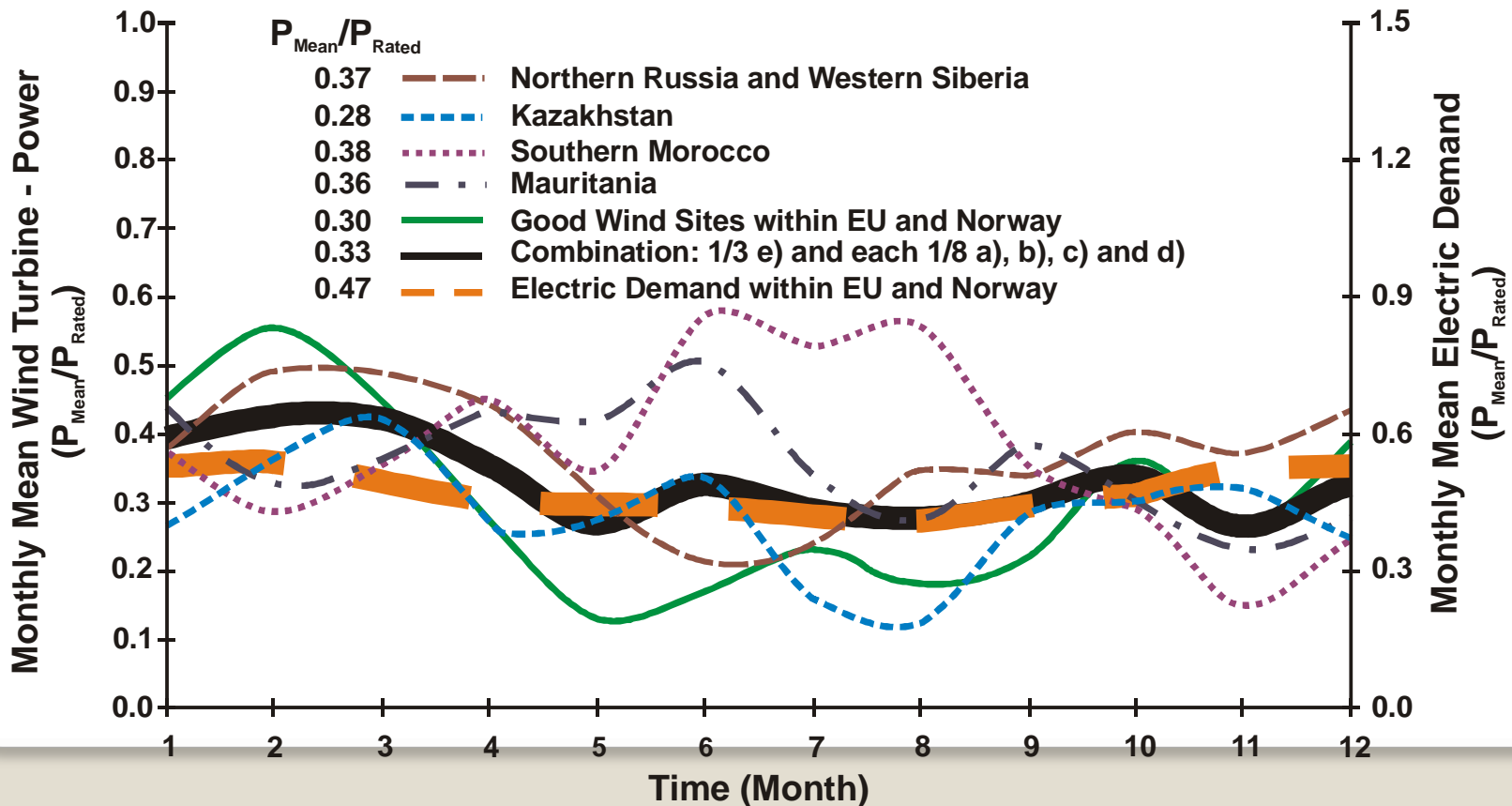




## A **variabilidade** do vento

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

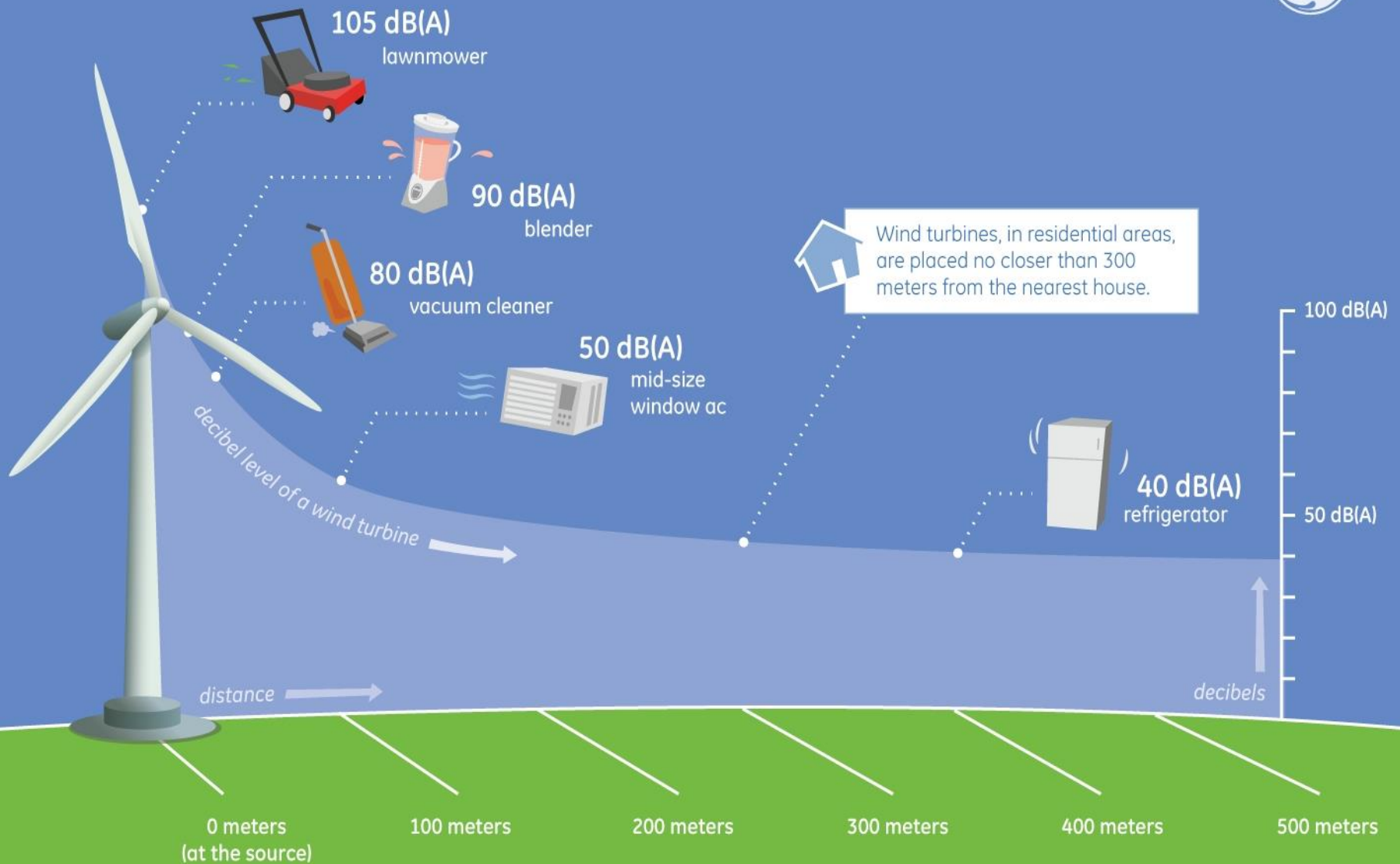
## **Soluções/remédios**

- **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

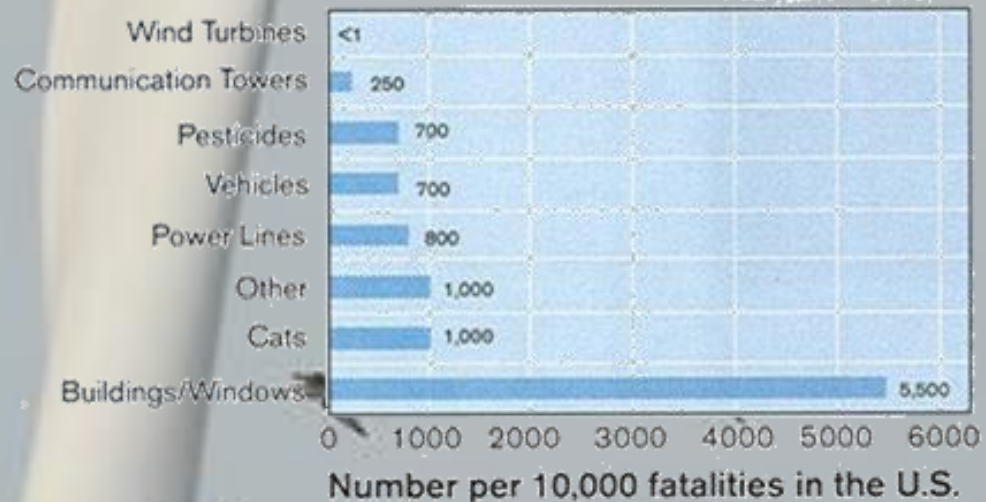
- na rede eléctrica, devido à **variabilidade**
- **ruído**, que perturba população e biodiversidade
- mortalidade **avifauna**
- alteração da **paisagem**

# 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 à 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.

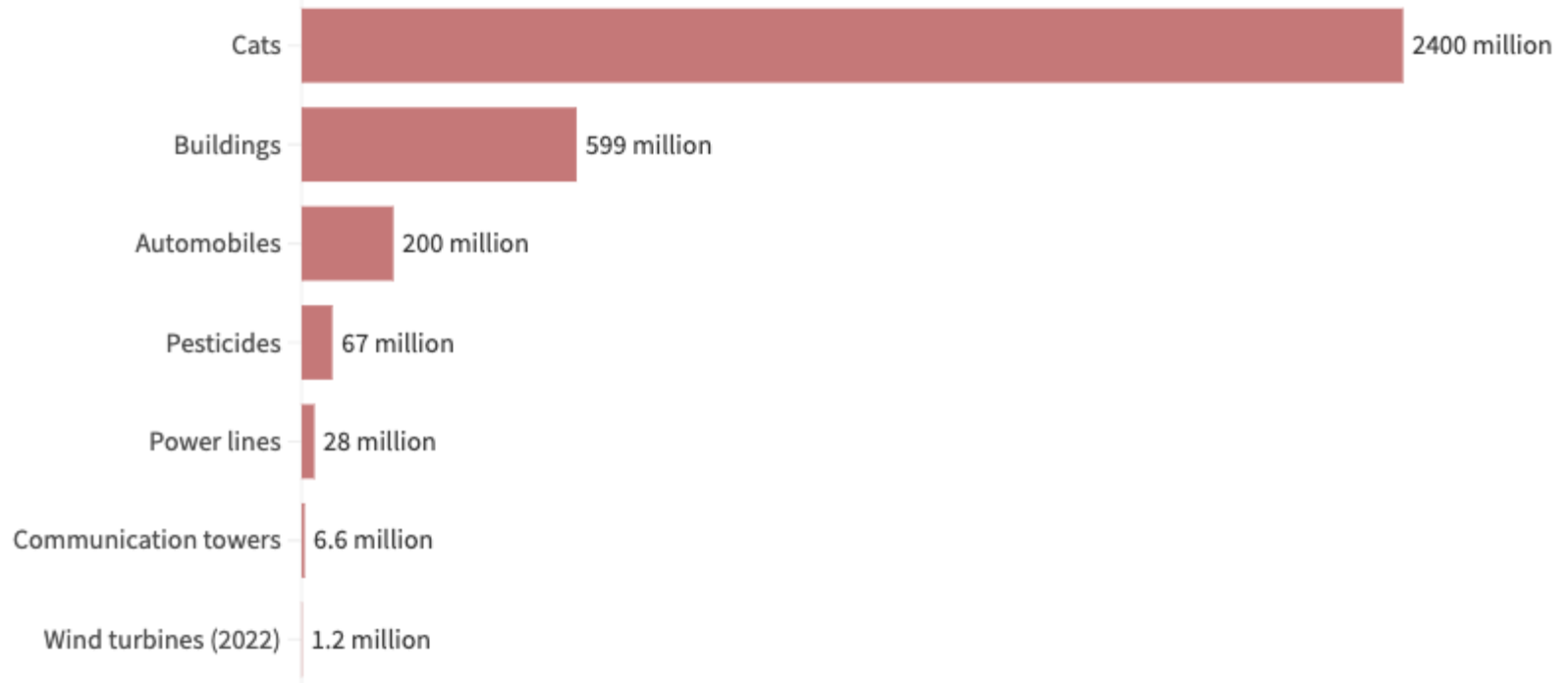
Por [José Milheiro](#)

30 Janeiro, 2023 • 14:06

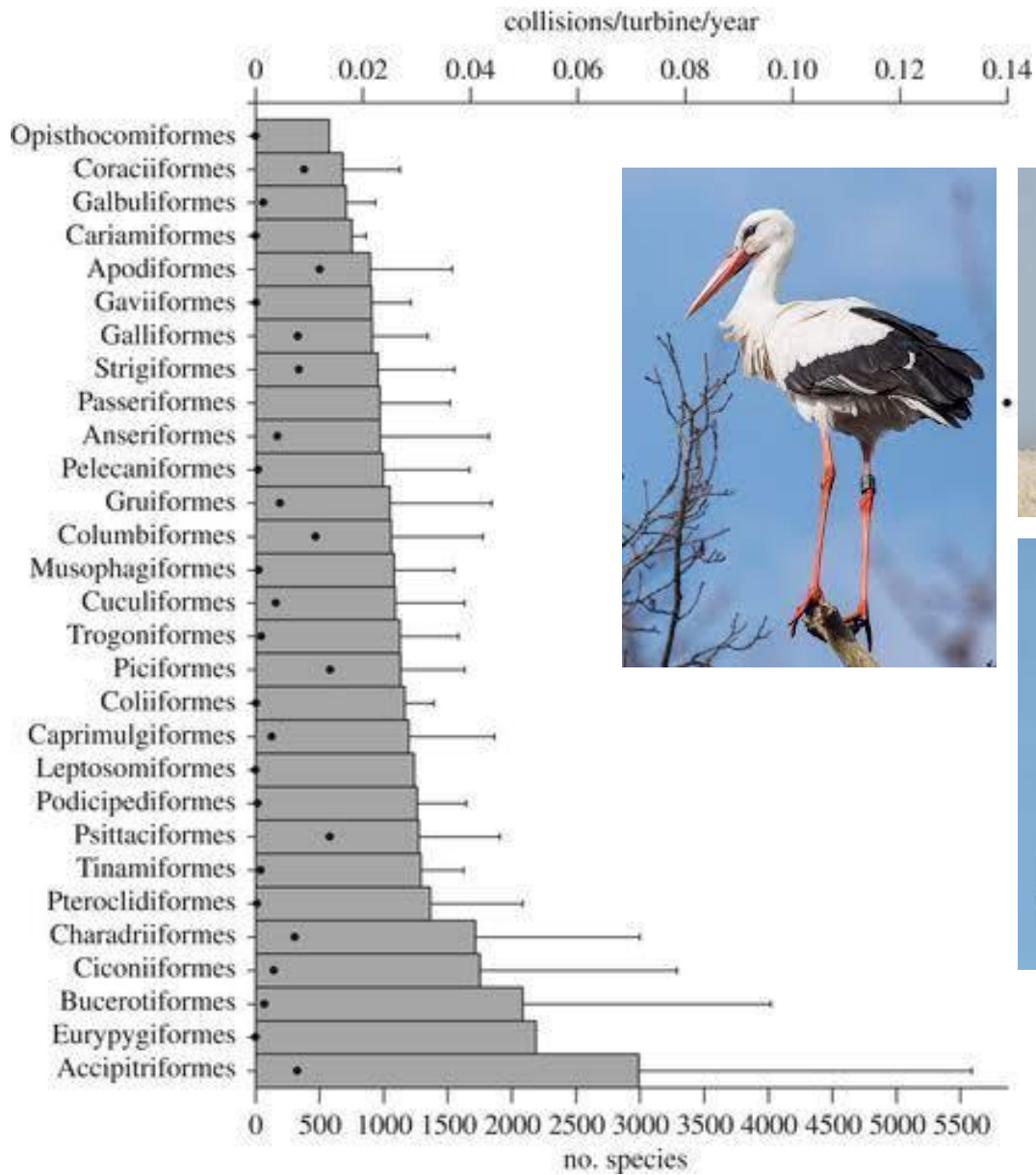
Esta ZPE foi justificada pela "utilização do meio marinho adjacente à costa continental portuguesa por diversas espécies de aves, algumas das quais com estatuto de ameaça desfavorável, entre as quais se destaca a pardela-baleiar", pode ler-se no decreto regulamentar que criou este estatuto de proteção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

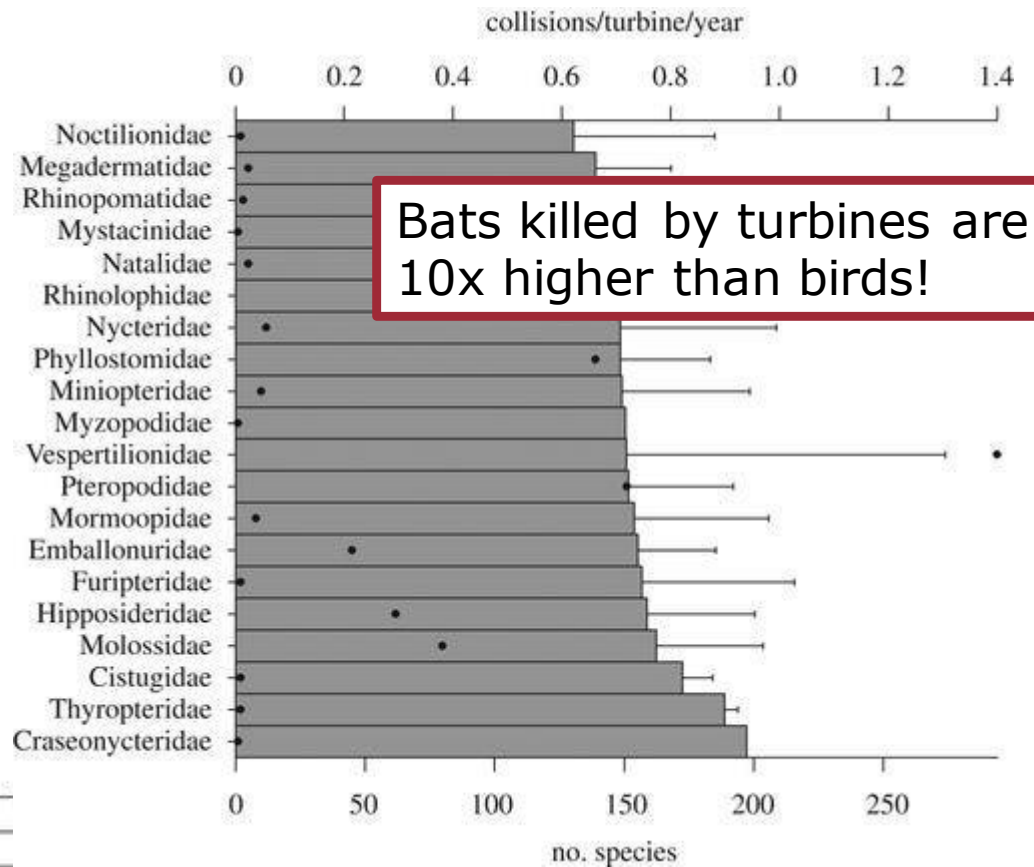
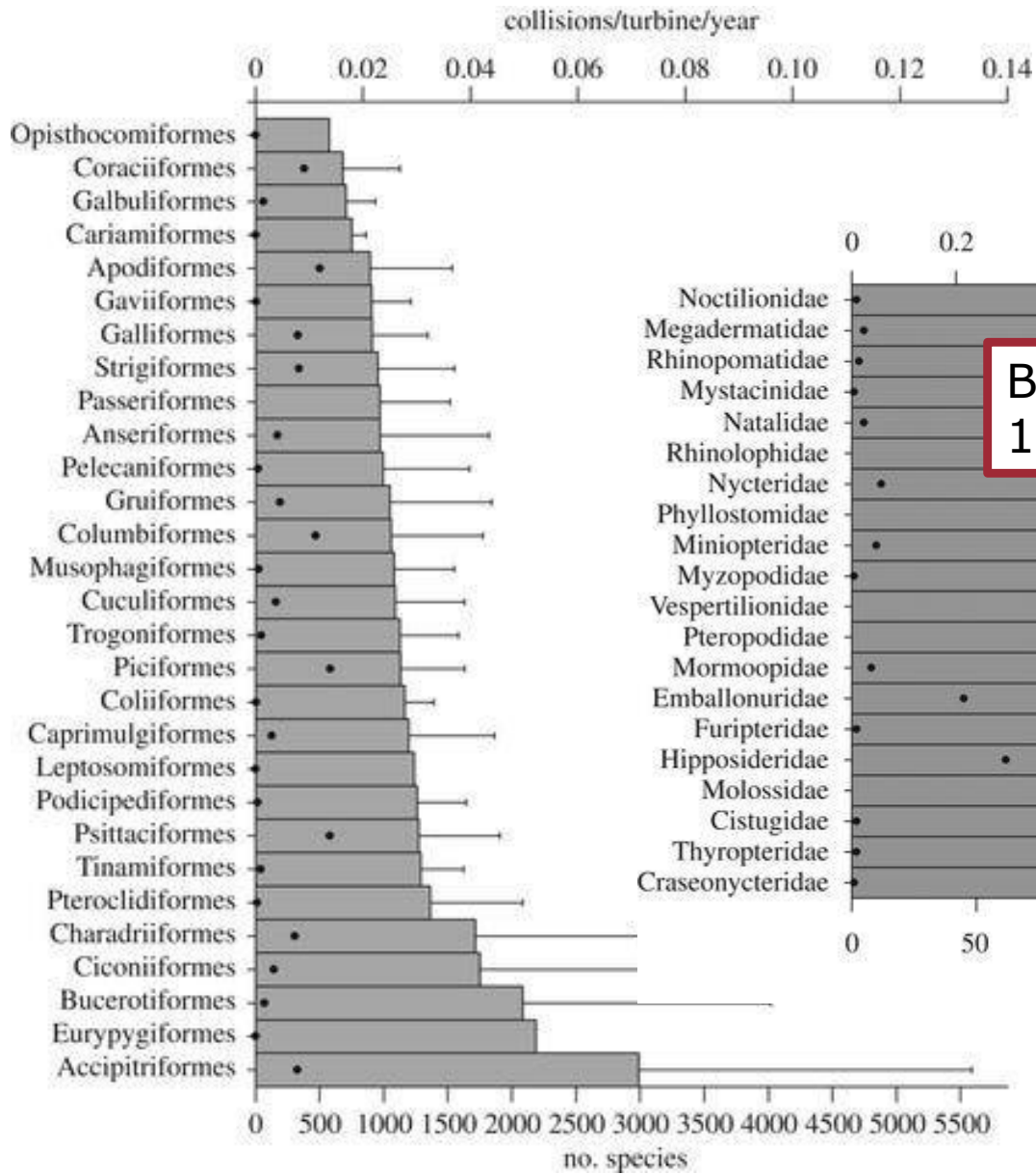
"As áreas de Leixões e da Figueira da Foz são adjacentes ao limite exterior do Sítio de Importância Comunitária Maceda/Praia da Vieira" aprovado em 2019 e destinado à proteção dos golfinhos.

## Birds killed by different hazards in the US per year



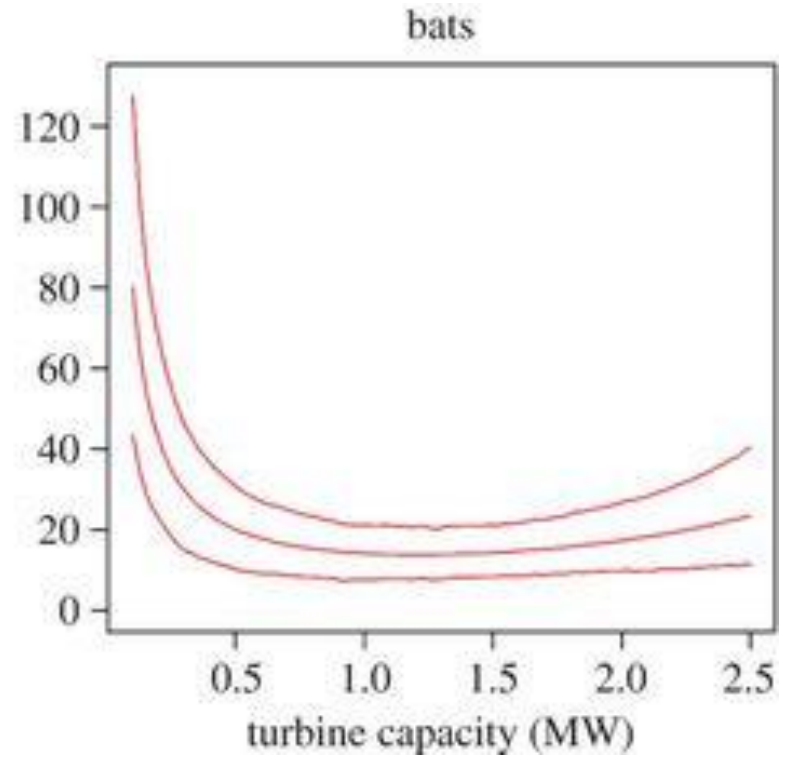
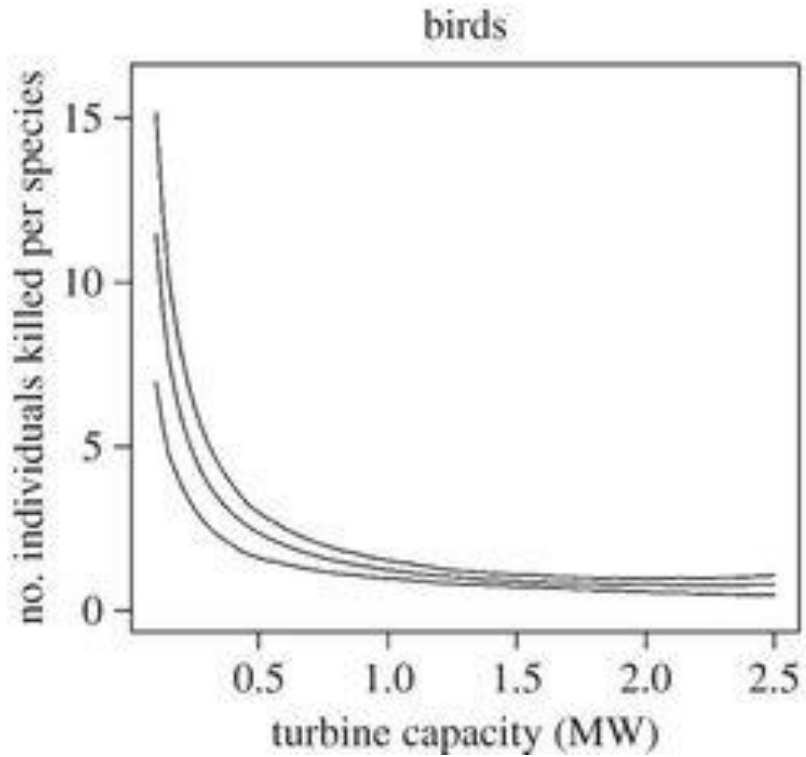
Sources: Loss et al. (2015); (2013). US Fish and Wildlife Service; Subramanian et al. (2012); American Bird Conservancy (2021).





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

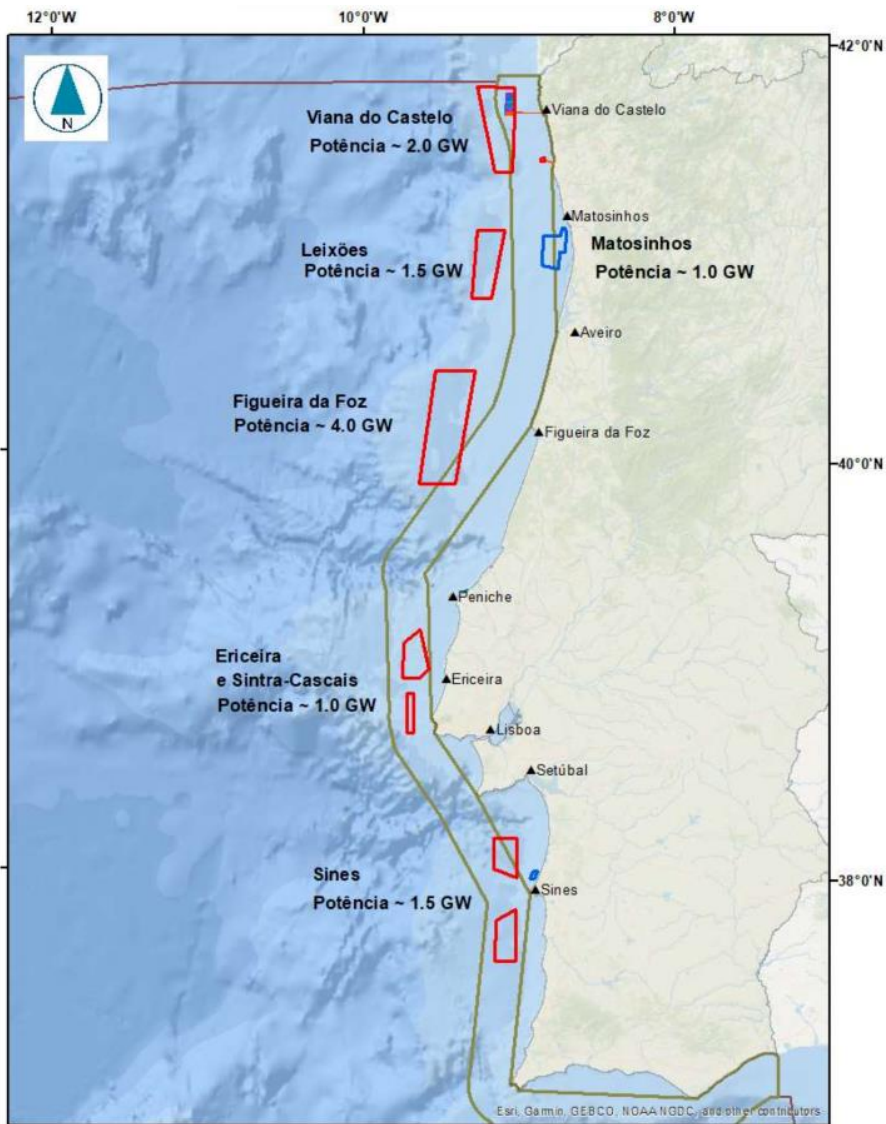
Volume 24, December 2020, e01099



Original Research Article

## Ultrasonic acoustic deterrents significantly reduce bat fatalities at wind turbines

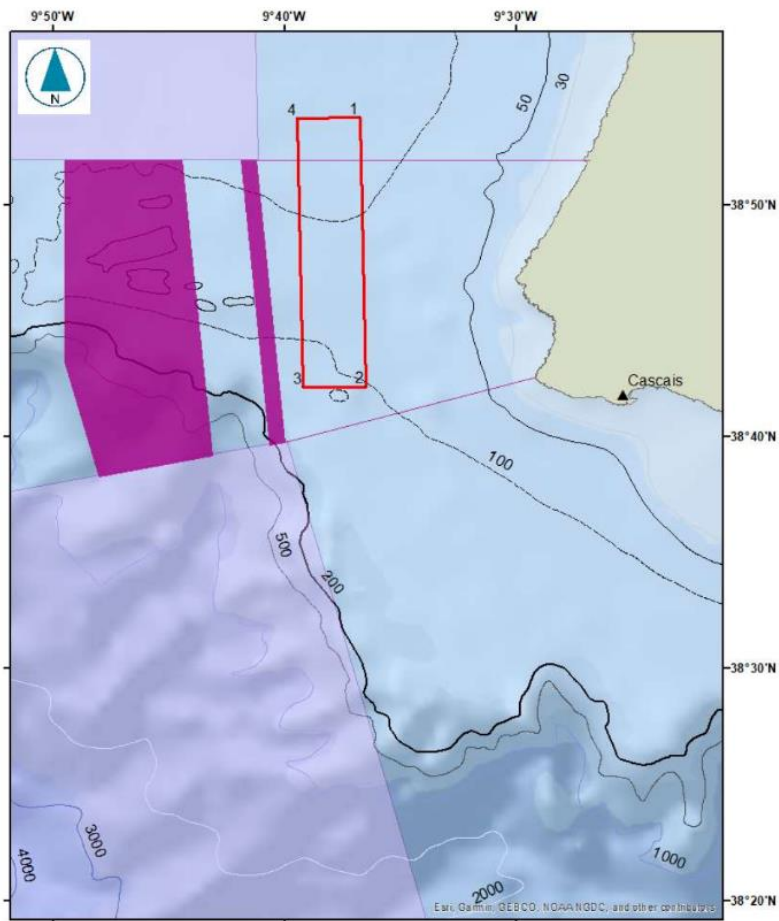
Sara P. Weaver<sup>a b</sup>  , Cris D. Hein<sup>c</sup> , Thomas R. Simpson<sup>b</sup> , Jonah W. Evans<sup>d</sup> ,  
Ivan Castro-Arellano<sup>b</sup> 



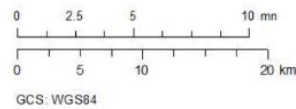
Áreas Propostas	Área (km <sup>2</sup> )	Potência passível de ser instalada (GW)
Viana do Castelo	663,00	2,0
Leixões	463,36	1,5
Figueira da Foz	1237,29	4,0
Ericeira	256,84	1,0
Sintra/Cascais	83,75	1,5
Sines	498,66	1,5
<b>Total</b>	<b>3202,9</b>	<b>10,0</b>



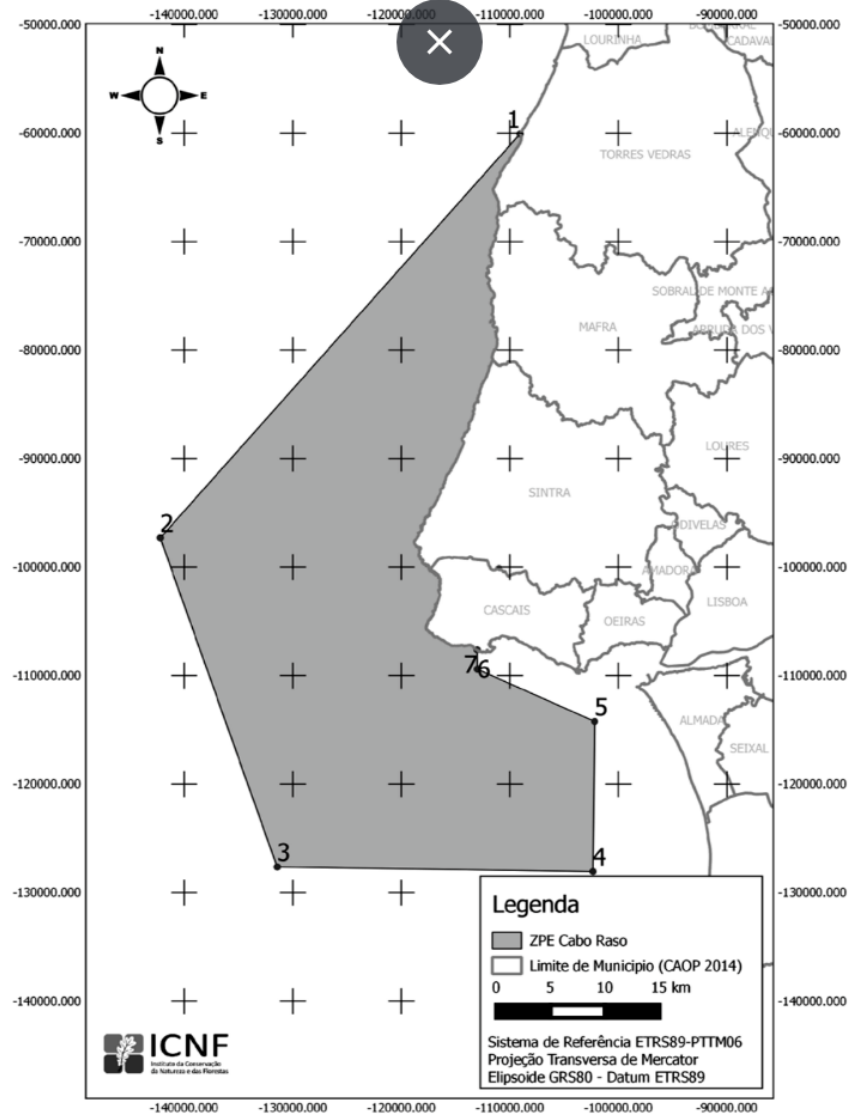
## Sintra/Cascais



- Legenda**
- Renovável Cascais
  - Direcções 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](http://www.davegranlund.com)

# ARGUMENTS AGAINST-



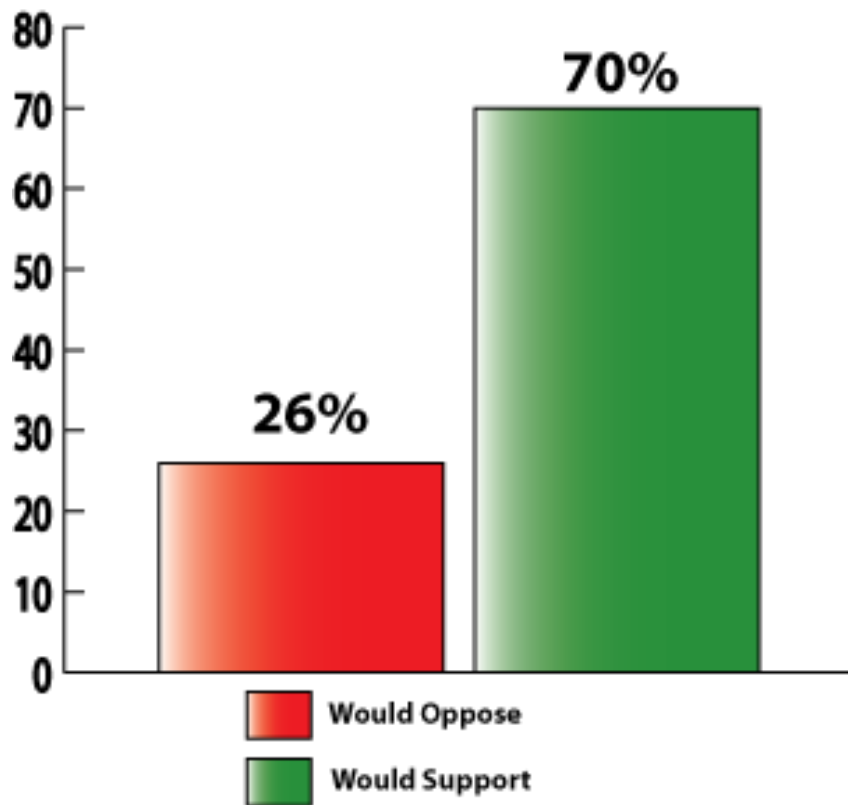
Joehller ©2011 GREENBAY PRESS GAZETTE

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

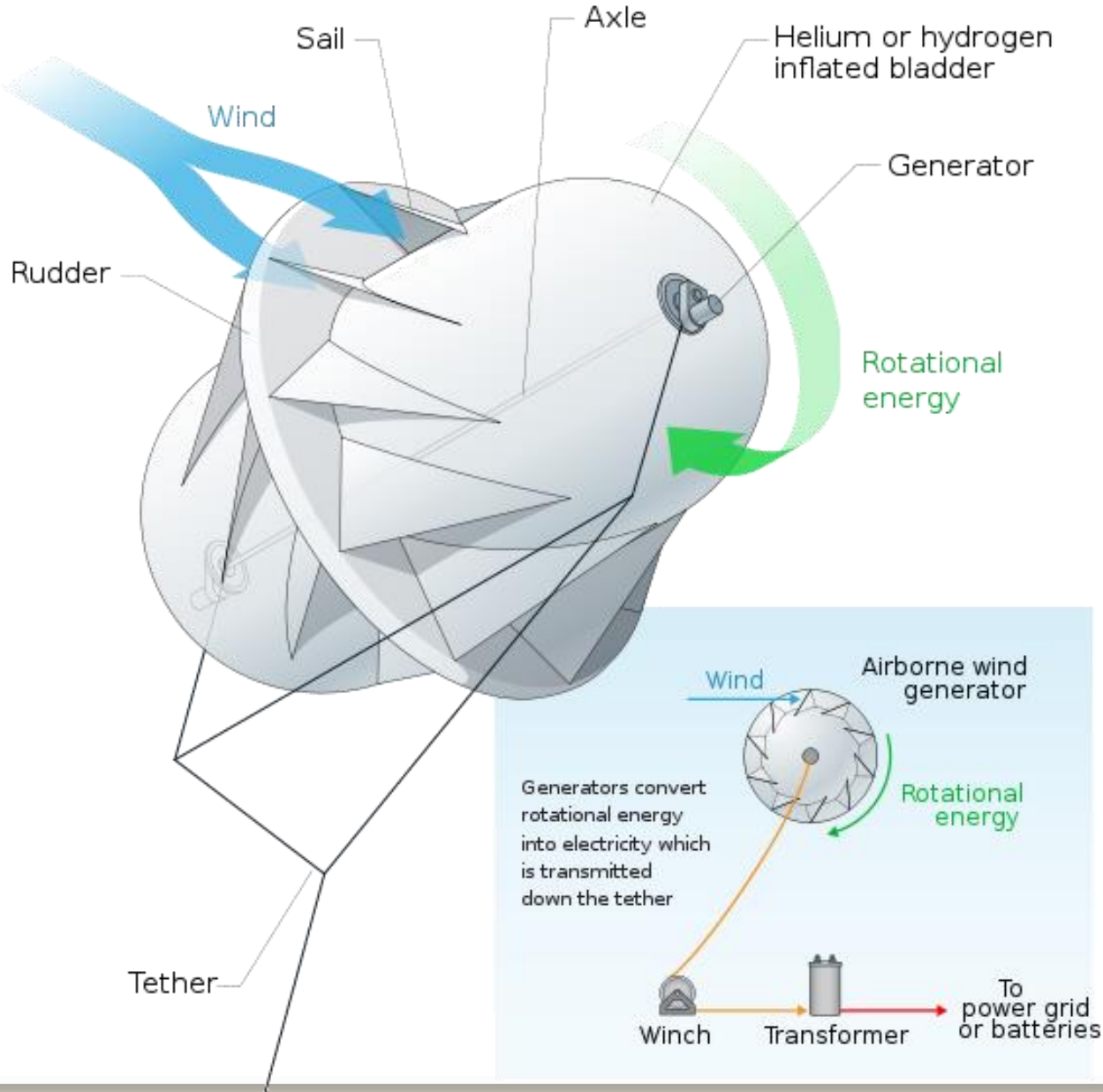








# Grande altitude



**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

