

ENERGIA OCEANOS

Energias renováveis

Miguel Centeno Brito

ENERGIA DOS OCEANOS

Aproveitamento da

- energia das **ondas**
- energia das **marés**
- gradiente **térmico**
- gradiente **salinidade**

ENERGIA DAS ONDAS



ENERGIA DAS ONDAS

Energia das ondas é energia solar de *3ª geração*

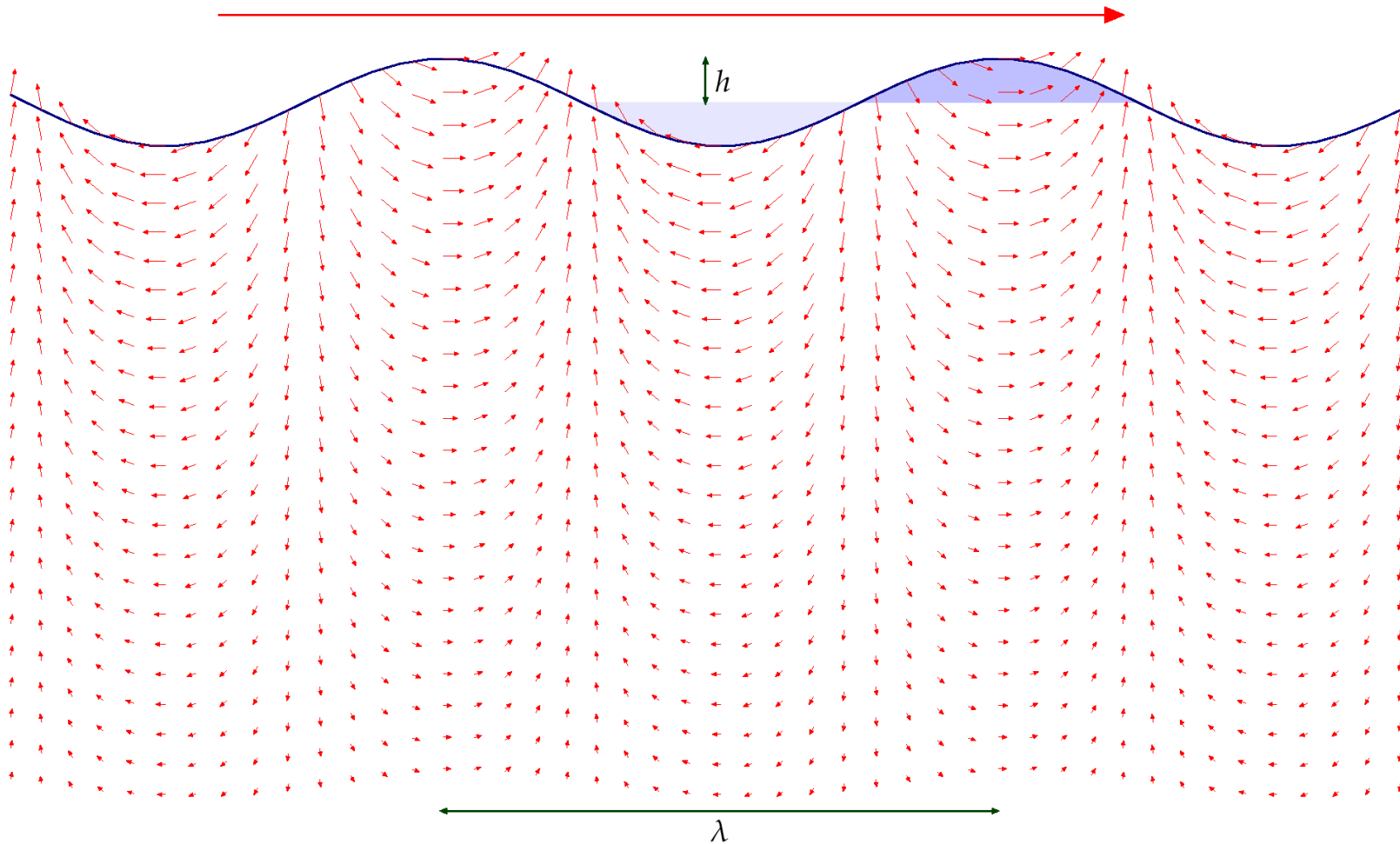
- radiação **solar** aquece superfície da Terra,
- cujas diferenças de temperatura causam **vento**,
- ventos sobre a superfície do oceano causam **ondas**

Quando uma onda encontra um obstáculo que absorve a sua energia (e.g. ilha) o mar é jusante é mais calmo: efeito sombra.

As unidades para definir a energia das ondas devem ser portanto W/m
(e não W/m²).

ENERGIA DAS ONDAS

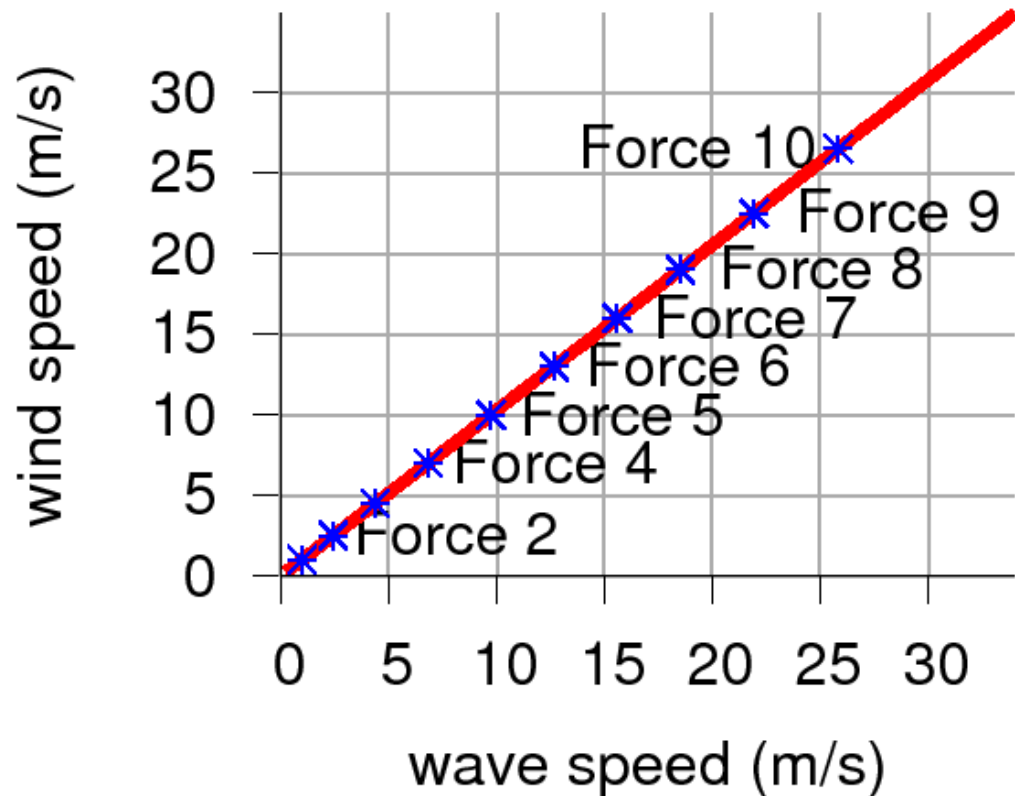
Energia das ondas = energia potencial + energia cinética



ENERGIA DAS ONDAS

Energia das ondas = energia potencial + energia cinética

Velocidade das ondas é proporcional à velocidade do vento.

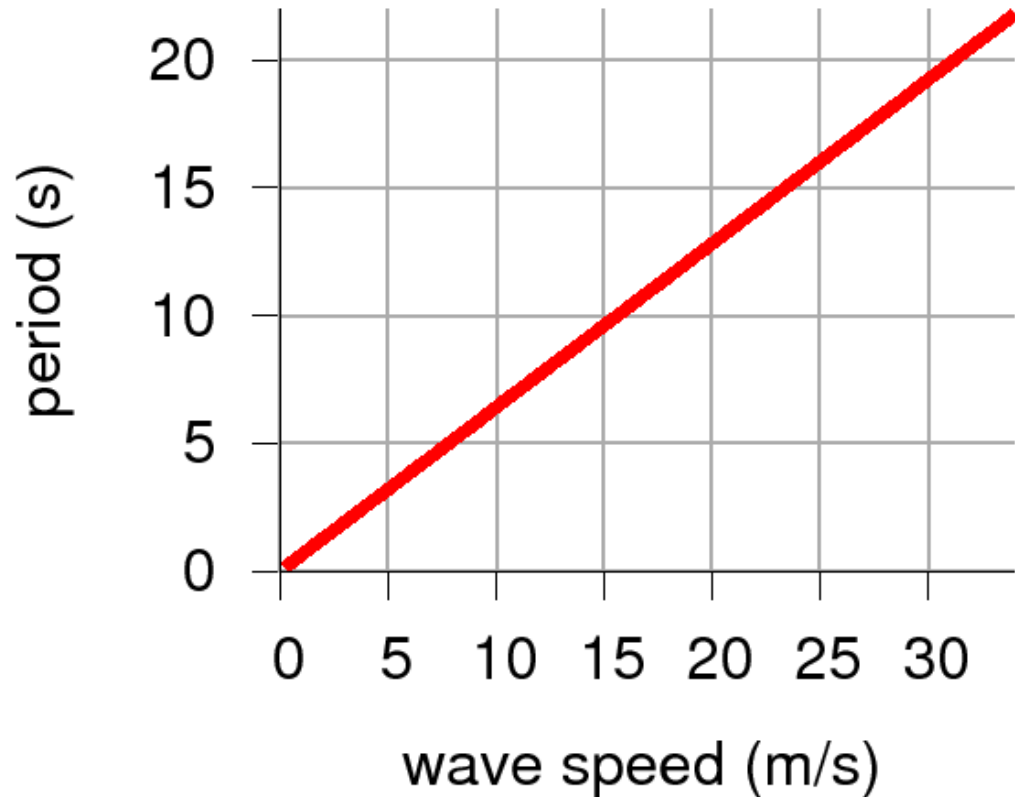


ENERGIA DAS ONDAS

Energia das ondas = energia potencial + energia cinética

O período das ondas é proporcional à velocidade.

$$v = \frac{gT}{2\pi}$$



ENERGIA DAS ONDAS

Energia das ondas = energia potencial + energia cinética

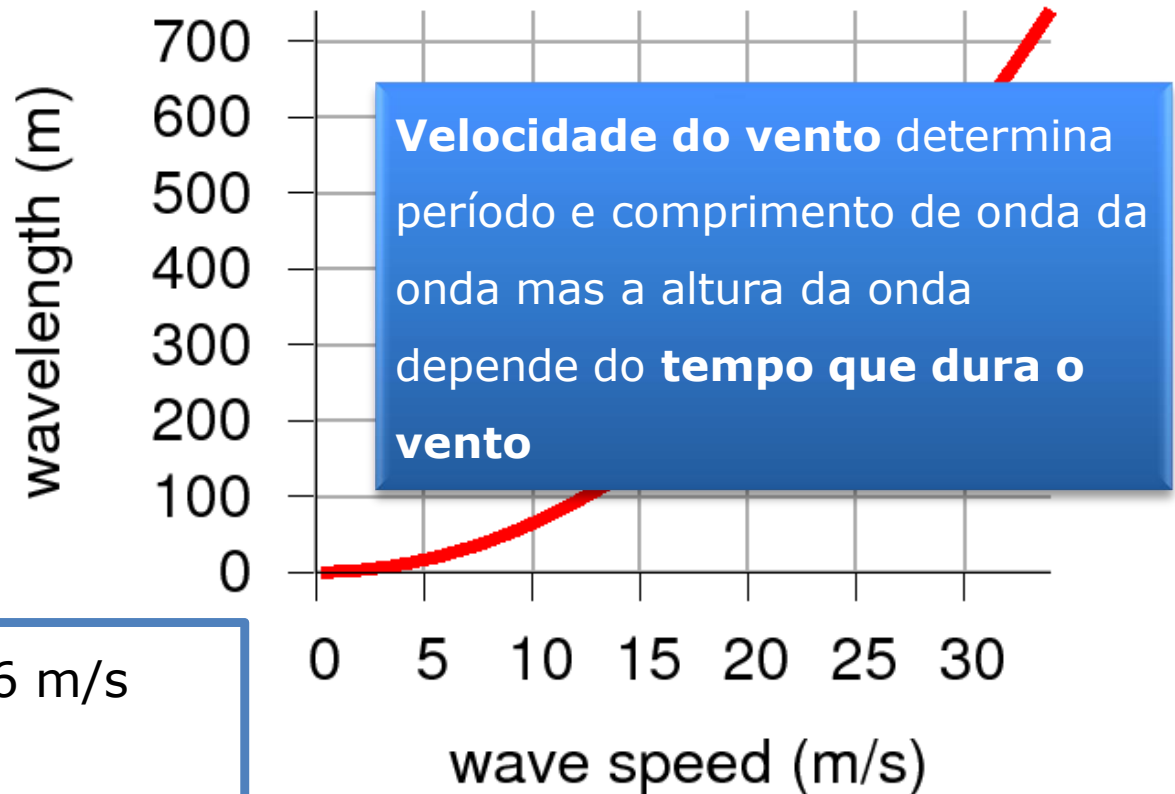
O comprimento de onda das ondas aumenta com o quadrado da velocidade.

$$v = \frac{gT}{2\pi}$$

$$\lambda = vT = \frac{gT^2}{2\pi}$$

$$T = 10 \text{ s} \quad v = 16 \text{ m/s}$$

$$\lambda = 160 \text{ m}$$



ENERGIA DAS ONDAS

Energia das ondas = energia potencial + energia cinética

$$P_{potencial} \approx \frac{mgh}{T} \approx \frac{\left(\frac{1}{2} \rho h \frac{\lambda}{2}\right) gh}{T} = \frac{1}{4} \rho g h^2 v$$

$$P_{cinética} = P_{potencial}$$

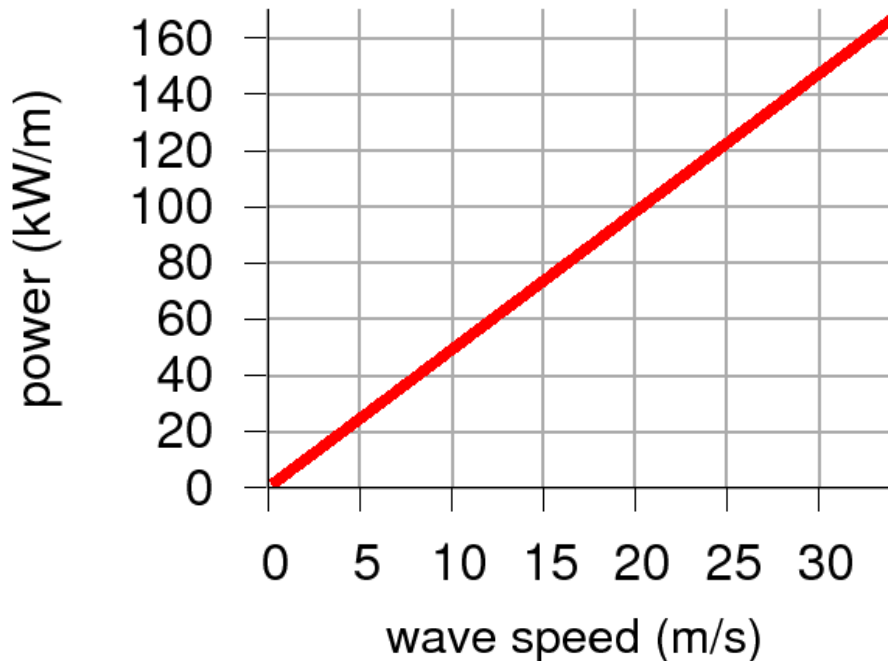
$$P_{total} = P_{potencial} + P_{cinética} = \frac{1}{2} \rho g h^2 v$$

Na realidade, para ondas em alto mar, a energia *viaja* à velocidade de grupo que é metade da velocidade da onda e por isso

$$P_{total} = \frac{1}{4} \rho g h^2 v$$

ENERGIA DAS ONDAS

Energia das ondas = energia potencial + energia cinética



Em mar profundo, perdas viscosidade desprezáveis (3x volta ao mundo com 90% da amplitude)

Em mar pouco profundo, perdas fricção relevantes (70% de perdas quando fundo sobe de 100 para 15m).

$$T = 10 \text{ s}$$

$$v = 16 \text{ m/s}$$

$$\lambda = 160 \text{ m}$$

$$\mathbf{P = 40 \text{ kW/m}}$$

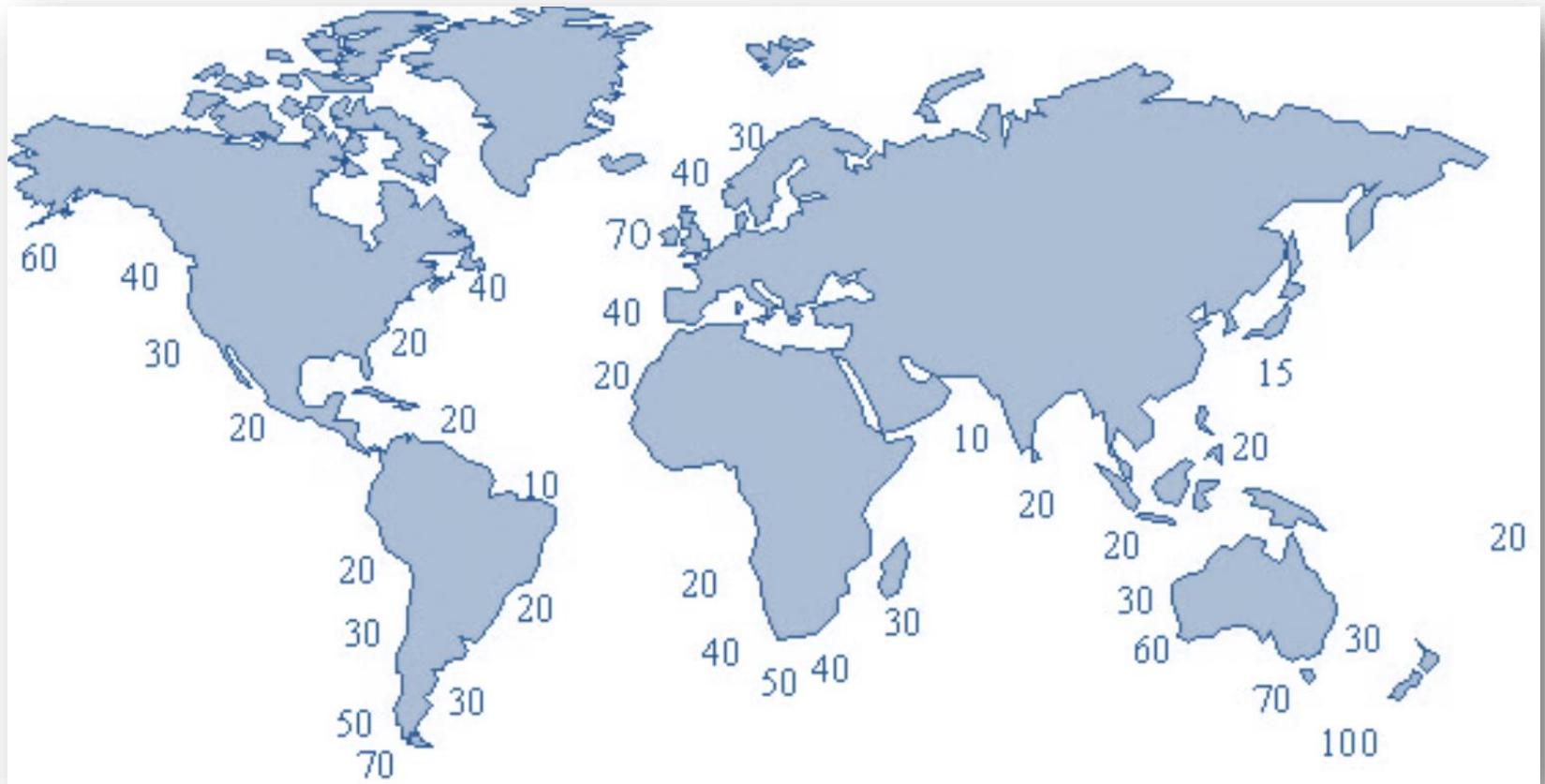
Na realidade a energia *viaja* à velocidade de grupo que é metade da velocidade da onda e por isso

$$P_{total} = \frac{1}{4} \rho g h^2 v$$

ENERGIA DAS ONDAS

Potencial das energia das ondas

Fluxo médio da energia das ondas em kW/m (ou MW/km)



ENERGIA DAS ONDAS

Potencial das energia das ondas

40 kW/m

Eficiência: 50%

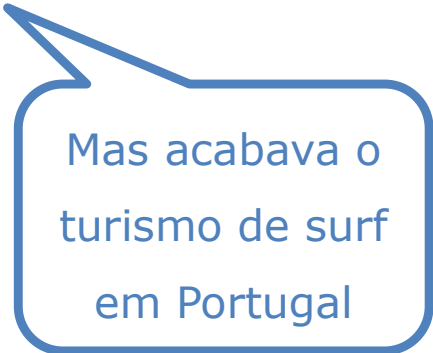
Comprimento costa nacional: 500 km

$40 \times 0.5 \times 500\,000 = 10\text{ GW}$

Per capita: $10^7\text{ kW} / 10^7\text{ pessoas} = \mathbf{1\text{ kW/pessoa}}$

Com uma eficiência mais realista:

Pelamis: 6 kW/m : **300 W/pessoa**



Mas acabava o
turismo de surf
em Portugal

ENERGIA DAS ONDAS

Potencial das energia das ondas

40 kW/m

Eficiência: 50%

Comprimento costa nacional: 500 km

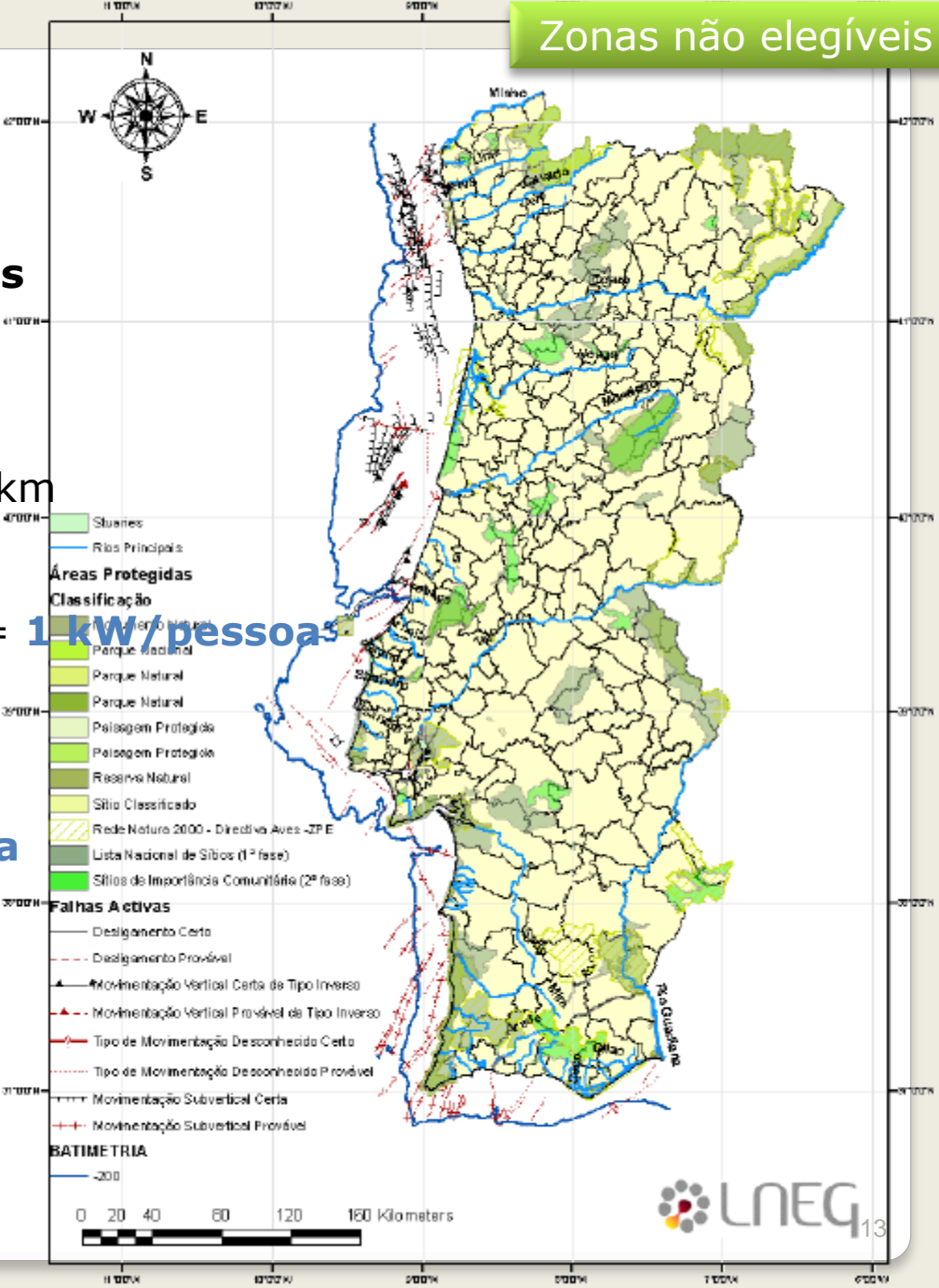
$$40 \times 0.5 \times 500 \ 000 = 10 \text{ GW}$$

$$\text{Per capita: } 10^7 \text{ kW} / 10^7 \text{ pessoas} = 1 \text{ kW/pessoa}$$

Com uma eficiência mais realista:

$$\text{Pelamis: } 6 \text{ kW/m} : 300 \text{ W/pessoa}$$

“Caracterização do sector dos recursos energéticos marinhos para Portugal continental”, Sandro Pereira, Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente, 2010.



ENERGIA DAS ONDAS

Potencial das energia das ondas

40 kW/m

Eficiência: 50%

Comprimento costa nacional: 500 km

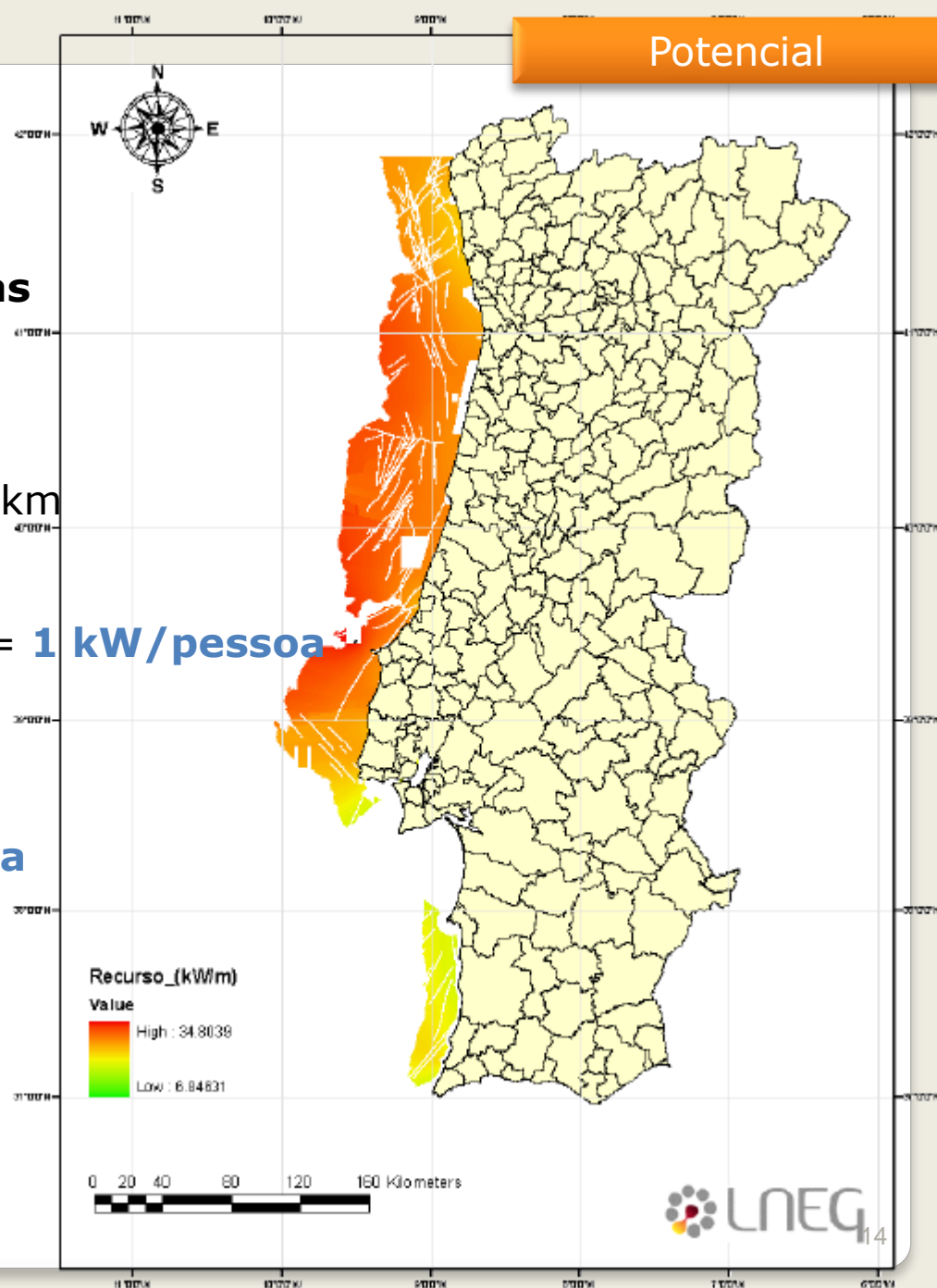
$40 \times 0.5 \times 500\ 000 = 10\ \text{GW}$

Per capita: $10^7\ \text{kW} / 10^7\ \text{pessoas} = 1\ \text{kW/pessoa}$

Com uma eficiência mais realista:

Pelamis: 6 kW/m : **300 W/pessoa**

“Caracterização do sector dos recursos energéticos marinhos para Portugal continental”, Sandro Pereira, Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente, 2010.



ENERGIA DAS ONDAS

Potencial das energia das ondas

40 kW/m

Eficiência: 50%

Comprimento costa nacional: 500 km

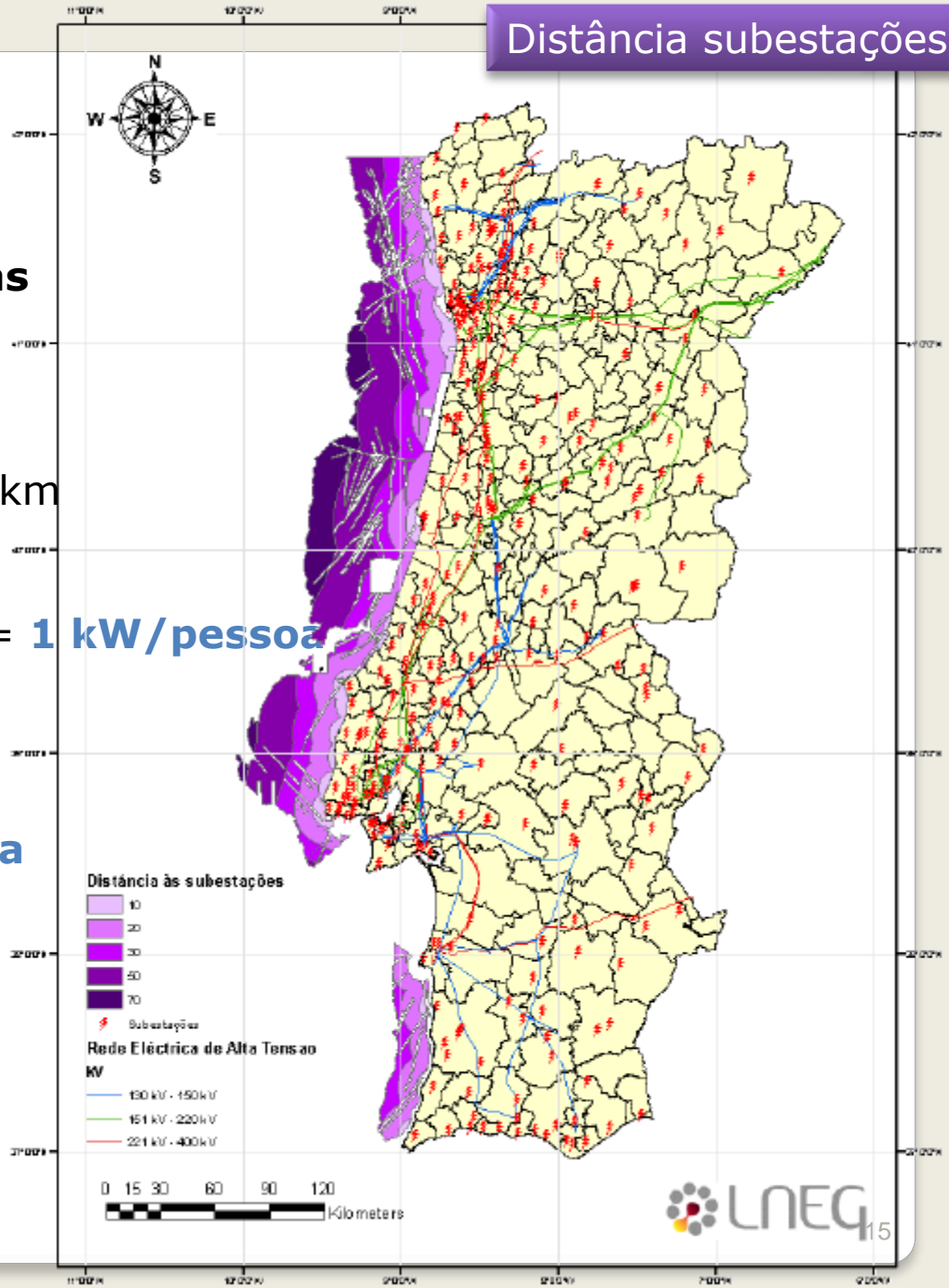
$$40 \times 0.5 \times 500\ 000 = 10\ \text{GW}$$

$$\text{Per capita: } 10^7\ \text{kW} / 10^7\ \text{pessoas} = \mathbf{1\ \text{kW/pessoa}}$$

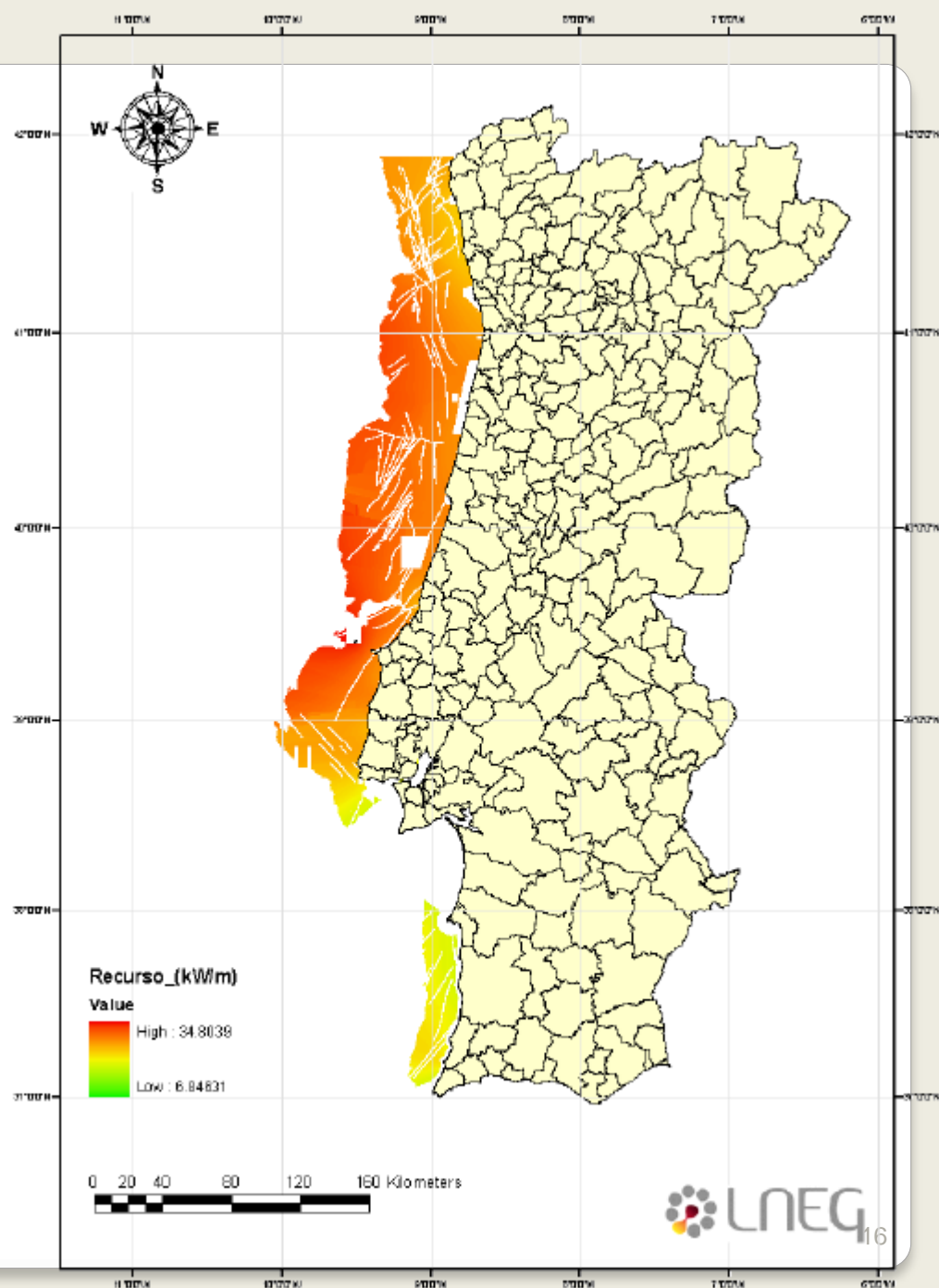
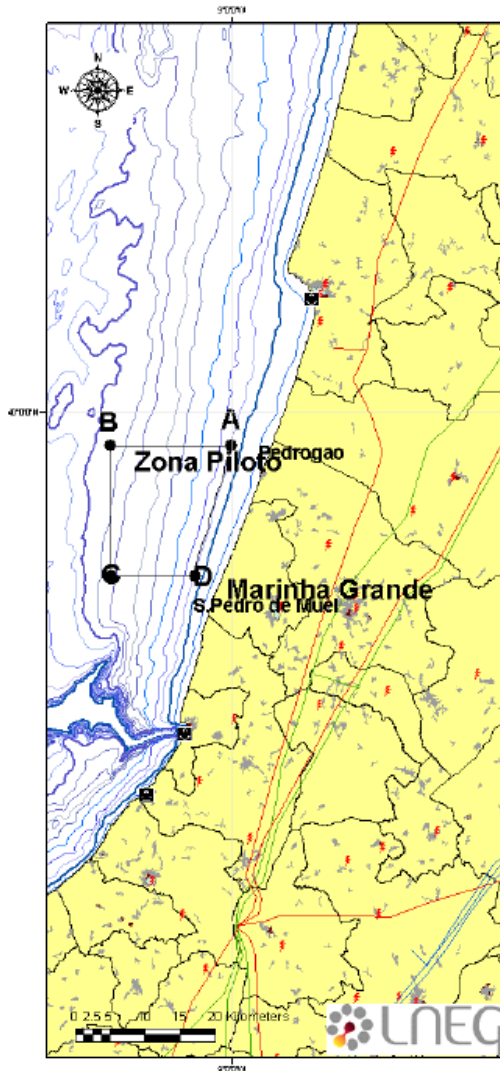
Com uma eficiência mais realista:

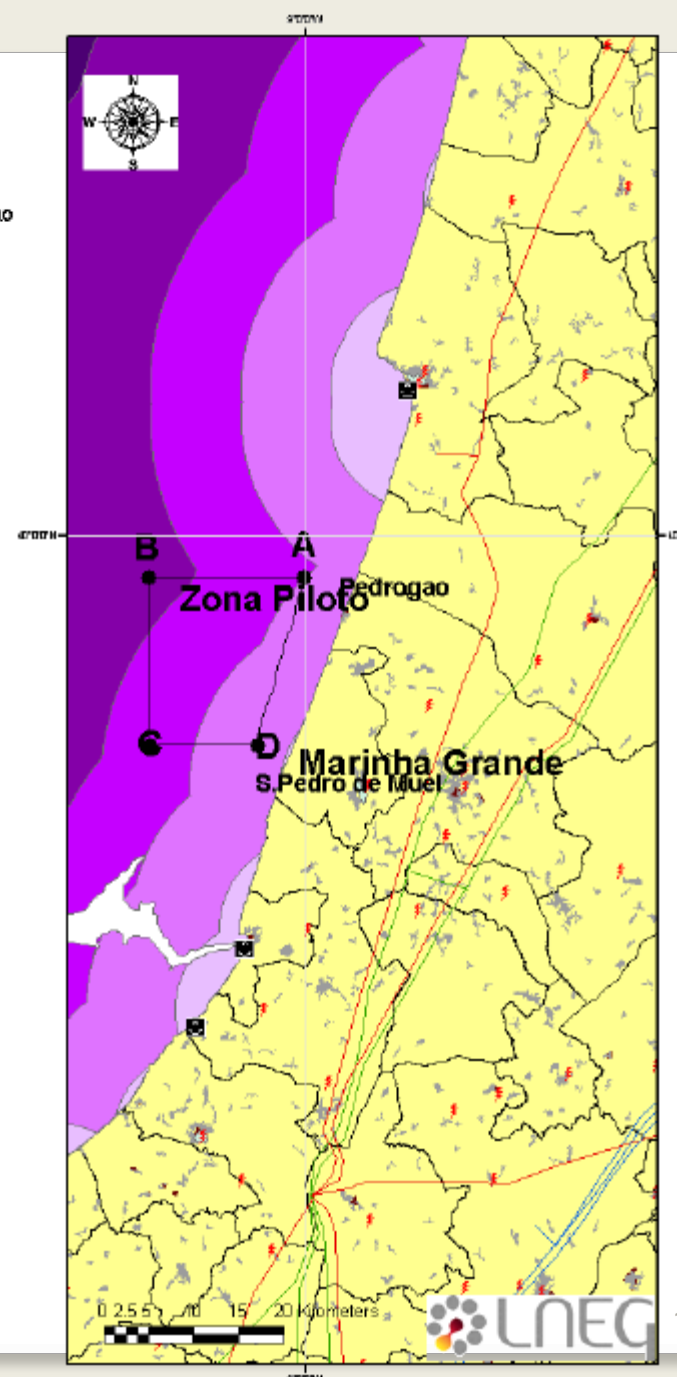
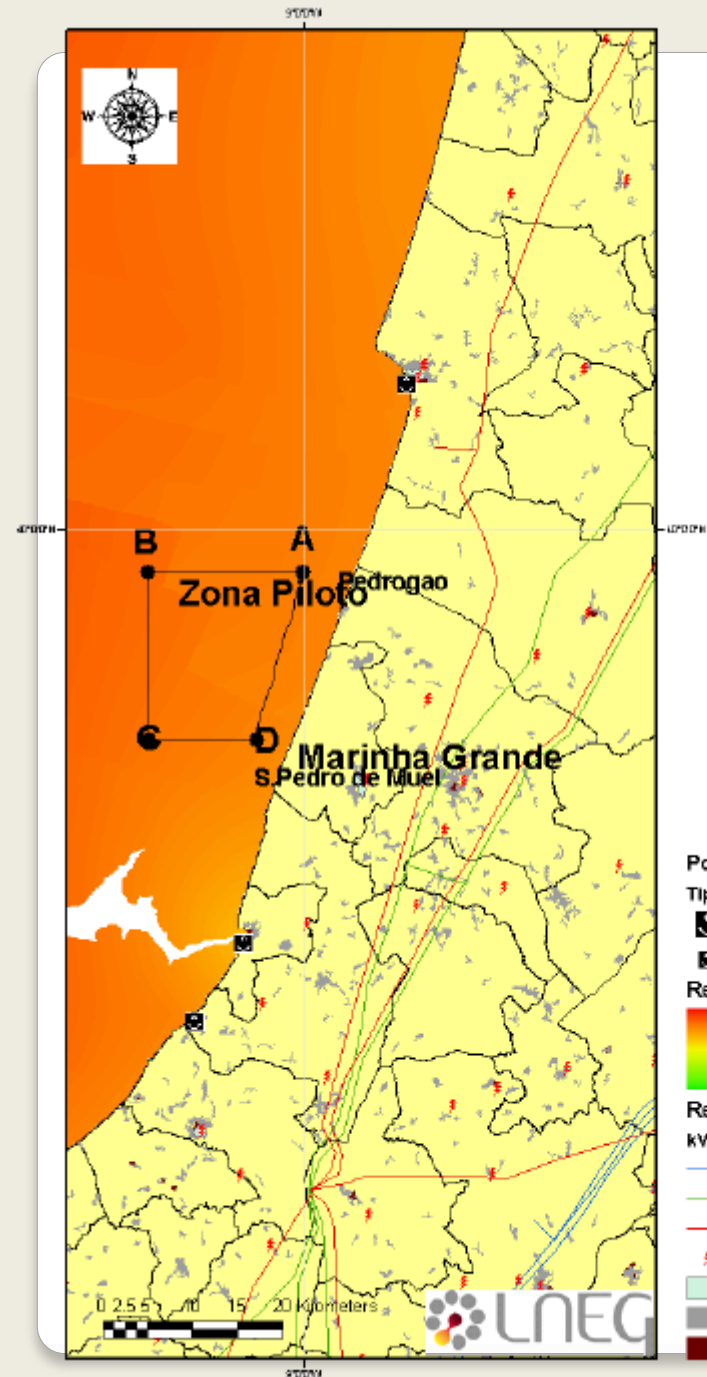
$$\text{Pelamis: } 6\ \text{kW/m} : \mathbf{300\ \text{W/pessoa}}$$

“Caracterização do sector dos recursos energéticos marinhos para Portugal continental”, Sandro Pereira, Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente, 2010.



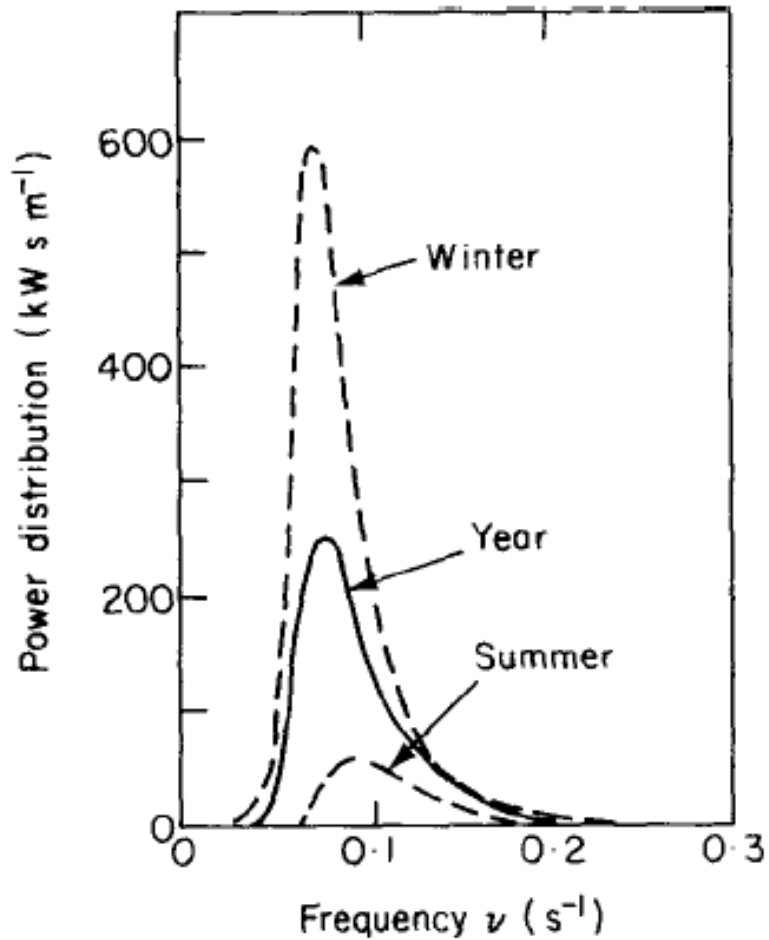
ENERGIA DAS ONDAS





ENERGIA DAS ONDAS

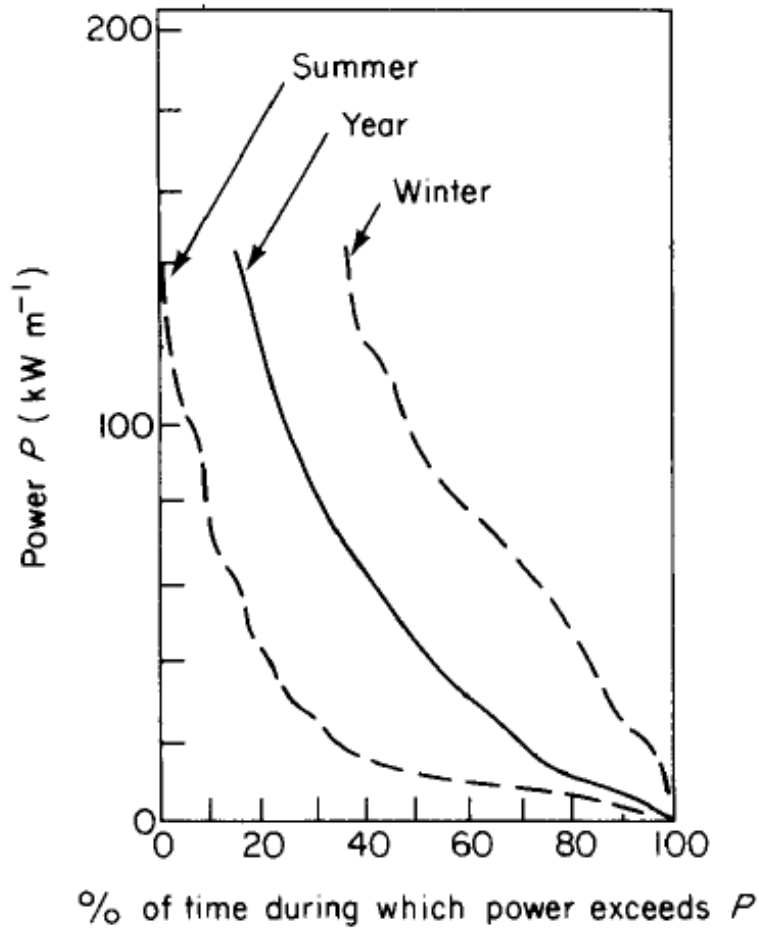
Variabilidade sazonal



Distribuição de frequências de potência das ondas para um ano de observações para a estação India (59°N; 19°W) no Atlântico Norte. [Mollison et al 1976]

ENERGIA DAS ONDAS

Factor de capacidade



Curva de duração de potência das ondas para um ano de observações para a estação India (59°N; 19°W) no Atlântico Norte. [Mollison et al 1976]

ENERGIA DAS ONDAS

Densidade energética

Pelamis

750kW

700 toneladas (incluindo 350 ton de balasto; logo 350 ton de aço)

E portanto **500kg/kW**

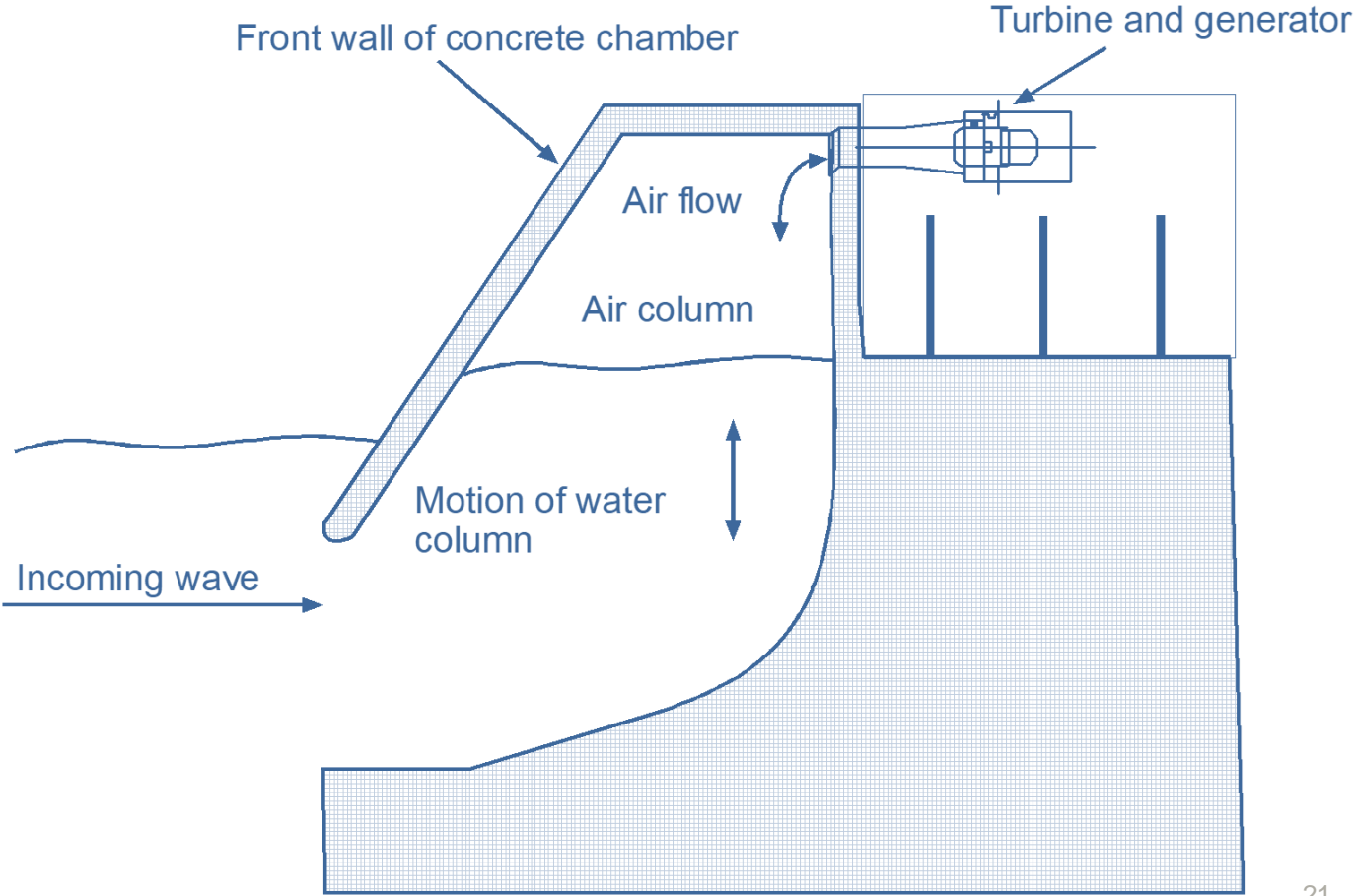
Difilmente será economicamente competitivo.
Se aproveitamento da energia das ondas for possível, vento offshore ainda será mais!

Custos de transmissão podem ser proibitivos, especialmente porque potencial diminui com a proximidade à costa.

ENERGIA DAS ONDAS

Tecnologias

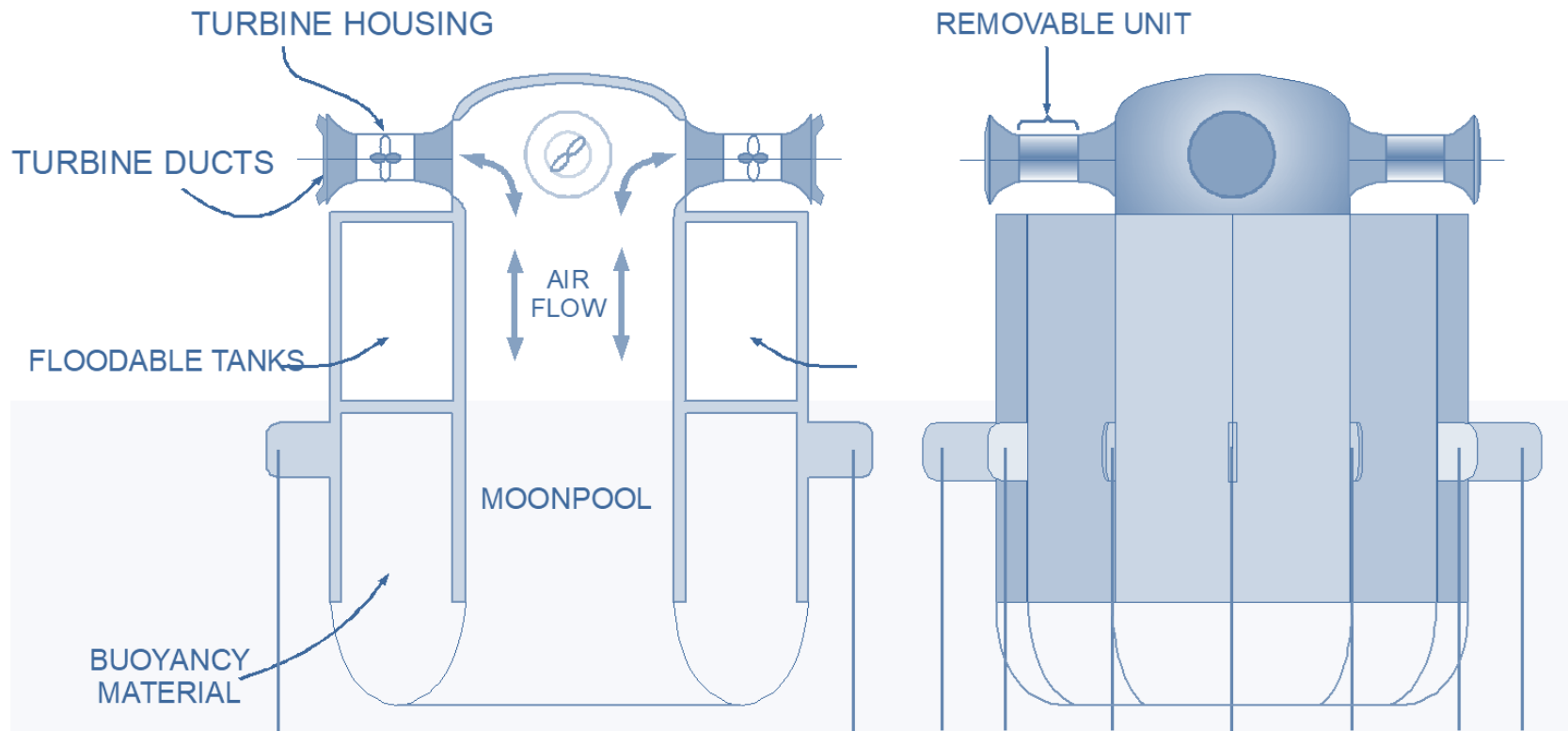
Sistema fixo



ENERGIA DAS ONDAS

Tecnologias

Sistema flutuante (fluido pode ser ar, água, ou outro qualquer e.g. Óleo)



ENERGIA DAS ONDAS

Tecnologias



ENERGIA DAS ONDAS

Tecnologias

Estrutura com dupla finalidade: integração dum
central de ondas num quebra-mar

Foz do Rio Douro

Novo
quebra-mar



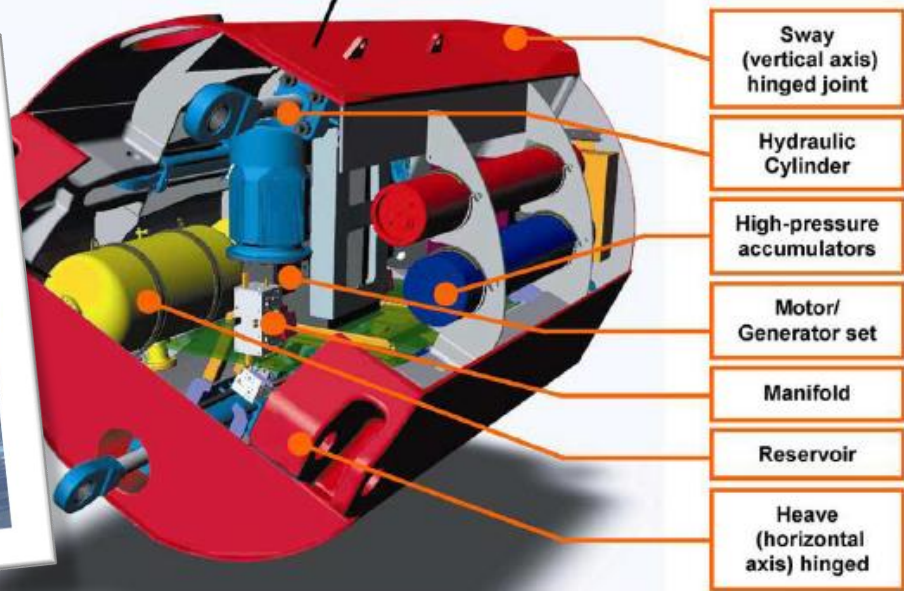
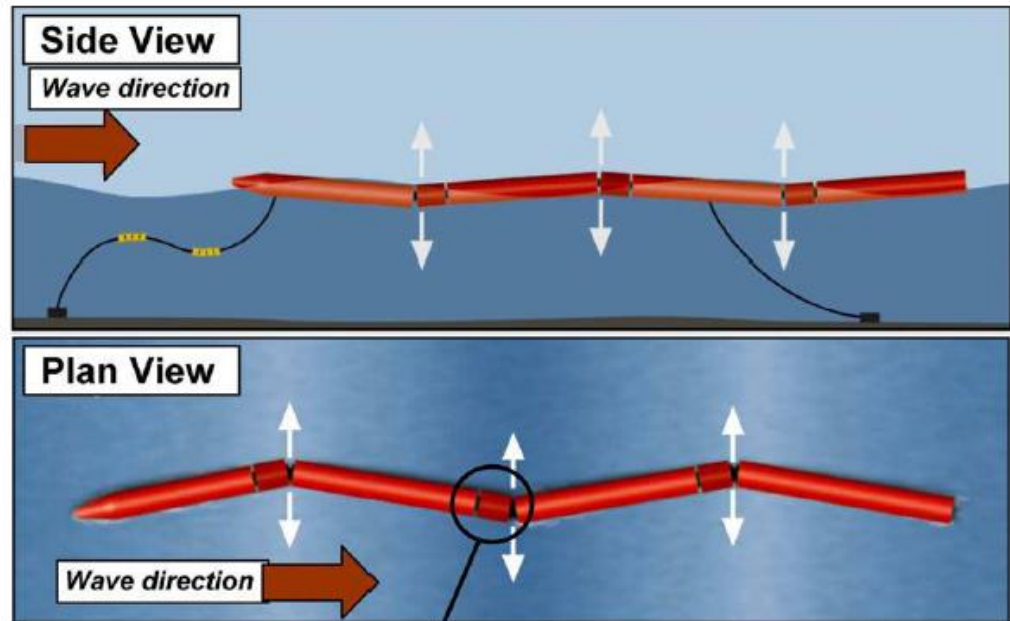
ENERGIA DAS ONDAS

Tecnologias



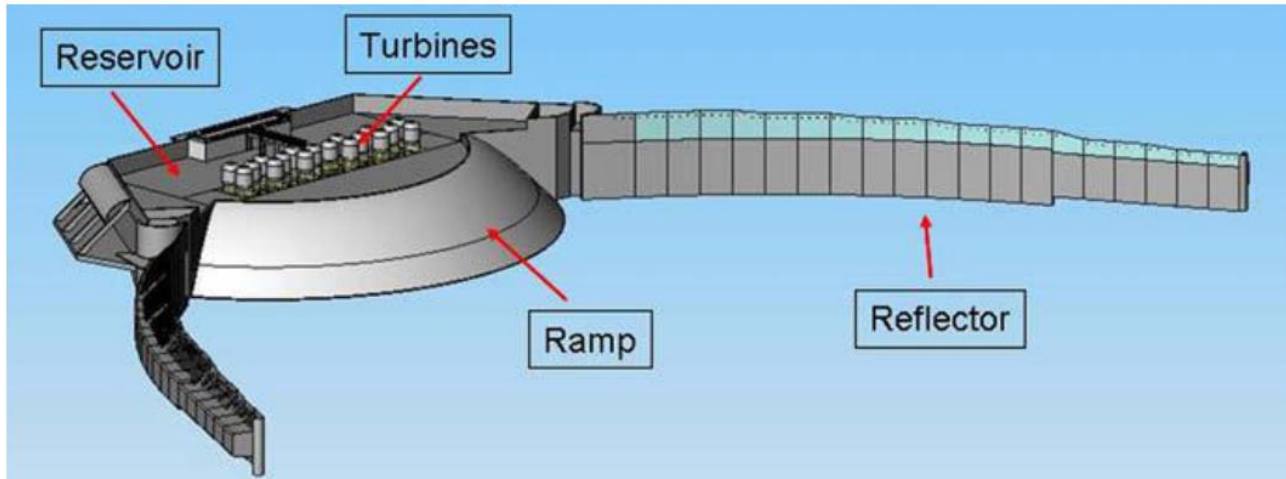
ENERGIA DAS ONDAS

Tecnologias



ENERGIA DAS ONDAS

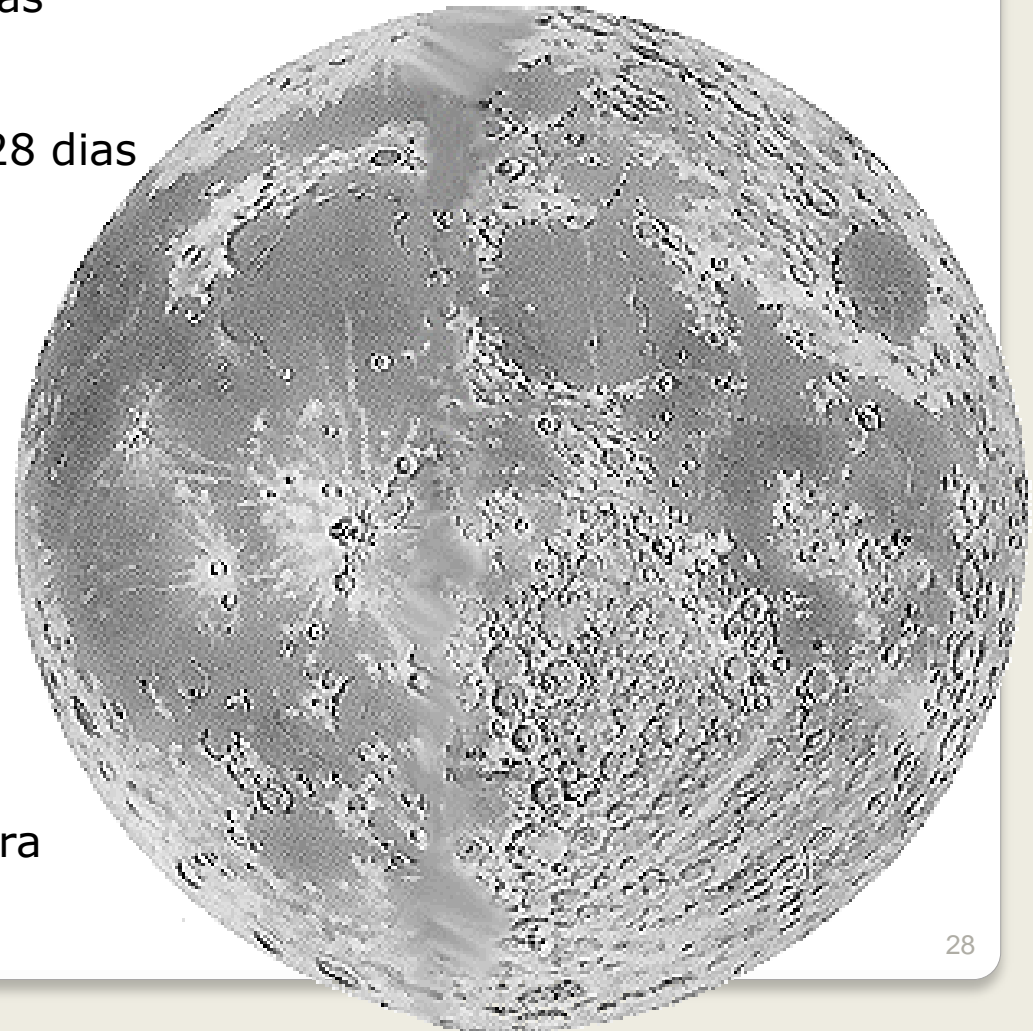
Tecnologias



ENERGIA DAS MARÉS

Período de rotação da Lua
em torno da Terra: 28 dias

Período de rota da Lua
em torno de si própria: 28 dias

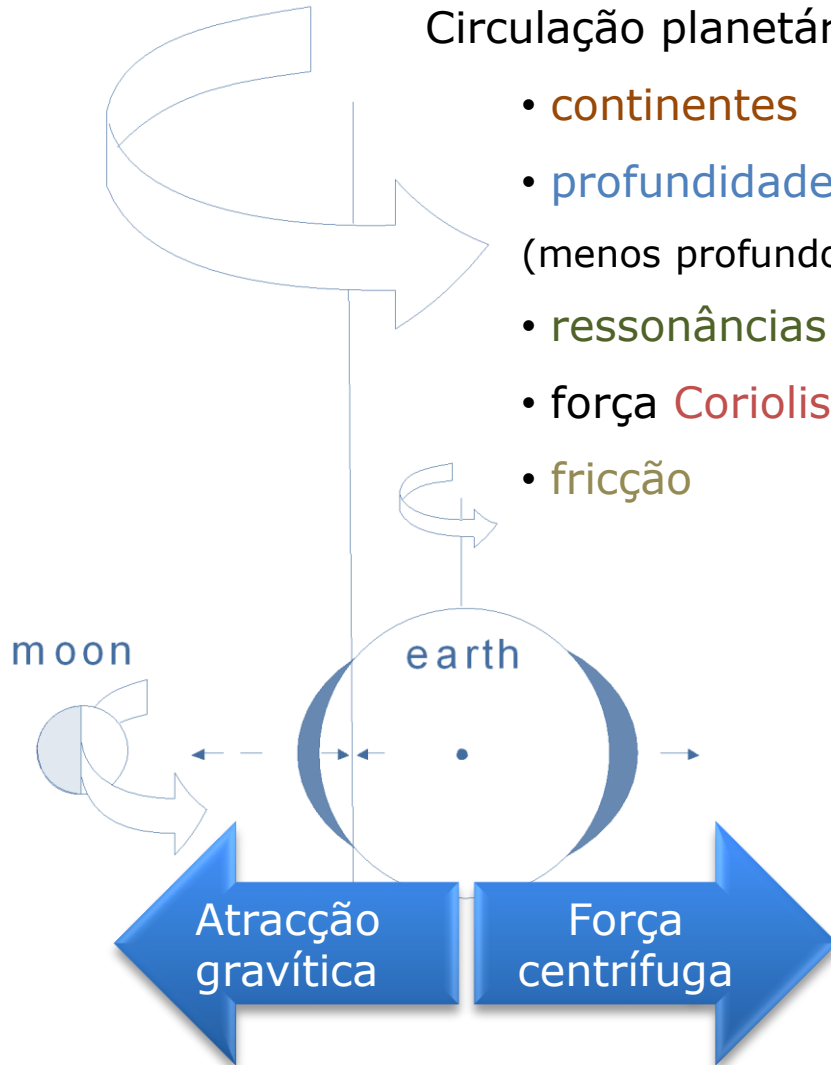


A face da Lua que *olha* para a Terra
é sempre a mesma!

ENERGIA DAS MARÉS

Circulação planetária da água constrangida por:

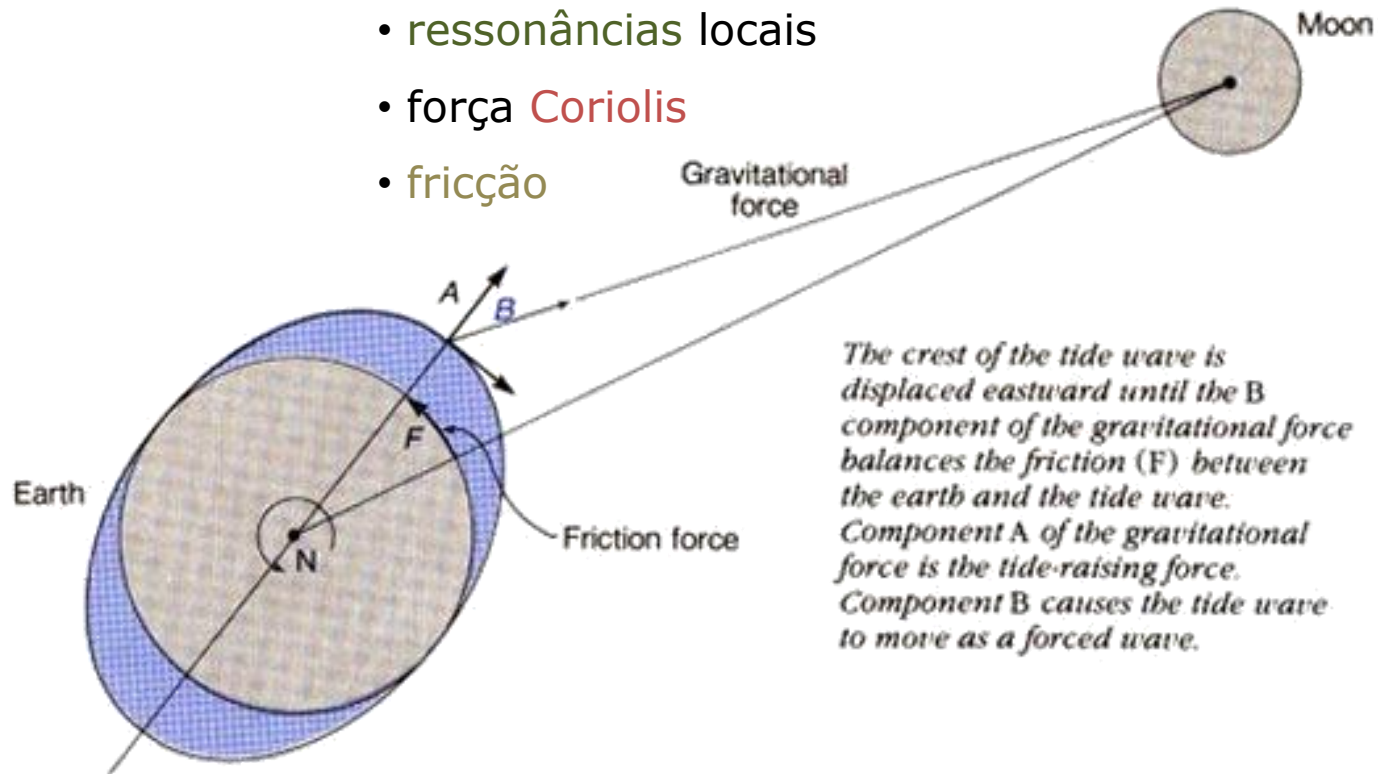
- continentes
- profundidade
(menos profundo → menor velocidade mas maior amplitude)
- ressonâncias locais
- força Coriolis
- fricção



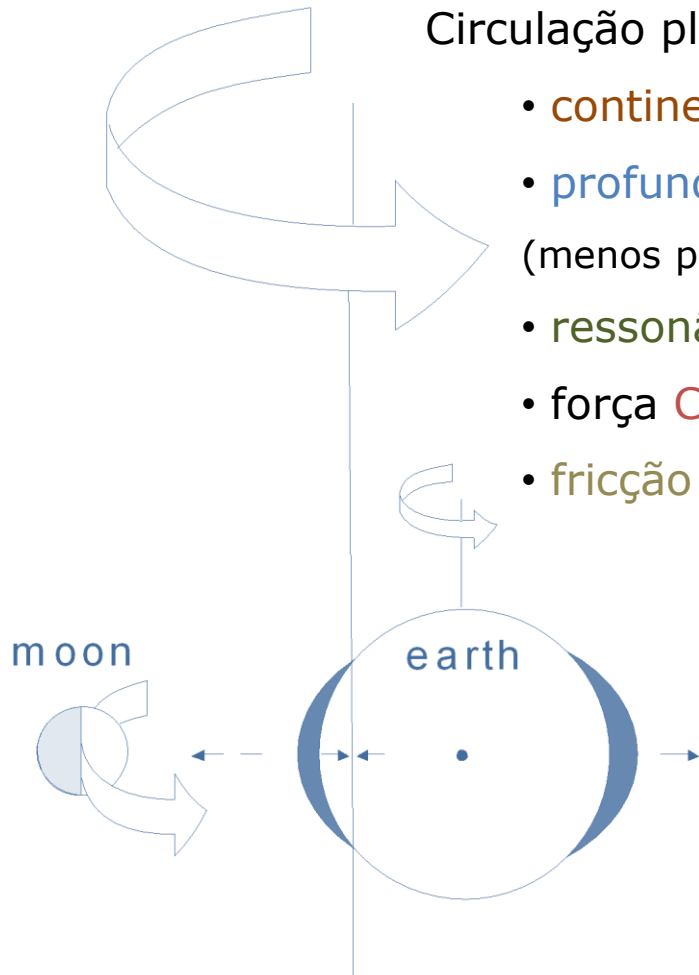
ENERGIA DAS MARÉS

Circulação planetária da água constrangida por:

- continentes
- profundidade
(menos profundo → menor velocidade mas maior amplitude)
- ressonâncias locais
- força Coriolis
- fricção



ENERGIA DAS MARÉS



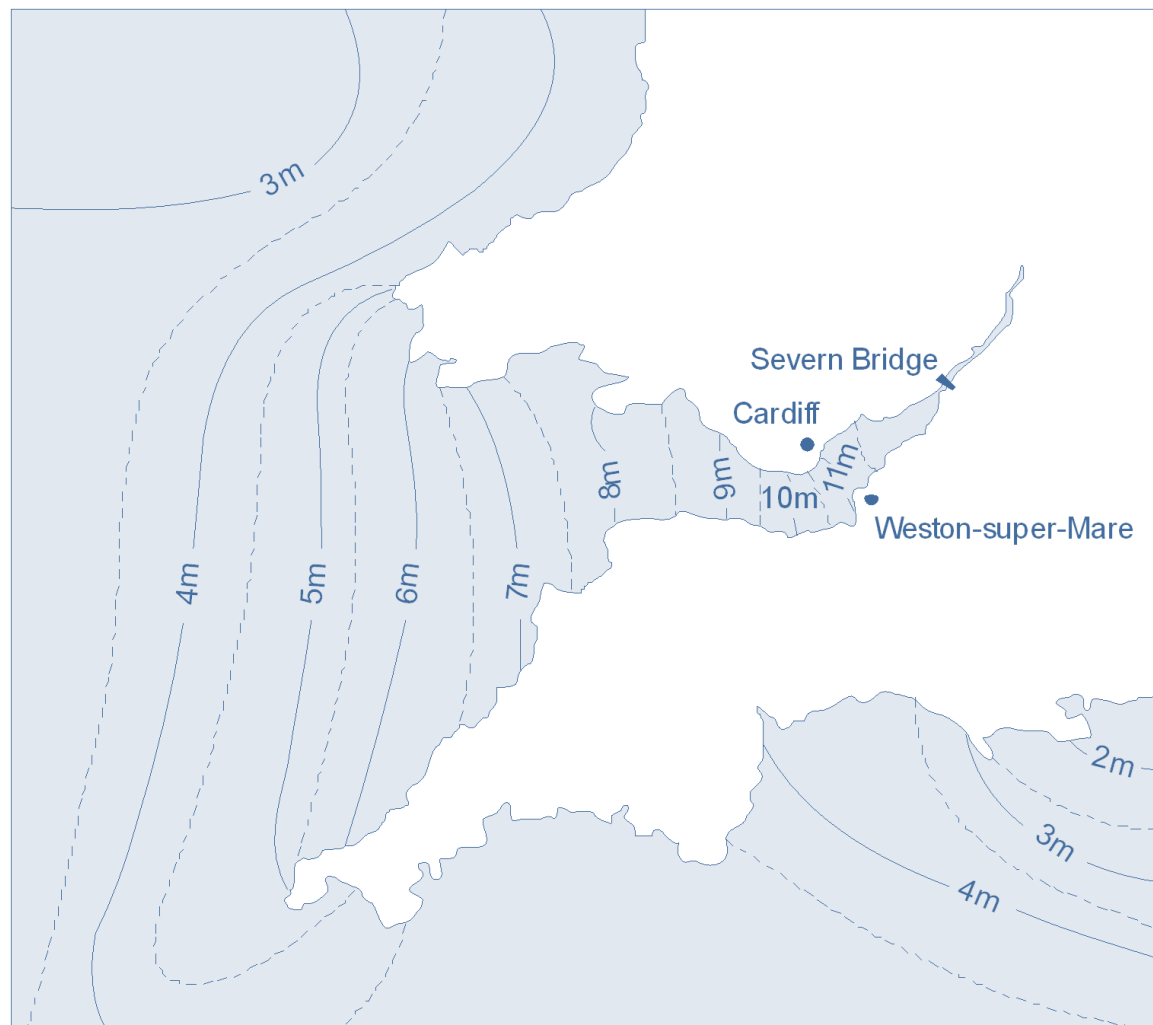
Circulação planetária da água constrangida por:

- continentes
- profundidade
(menos profundo → menor velocidade mas maior amplitude)
- ressonâncias locais
- força Coriolis
- fricção

Atracção gravítica do Sol é muito maior mas efeito nas marés quase irrelevante porque distância ao Sol é muito maior do que o diâmetro do Terra.

As marés vivas resultam do alinhamento regular entre a Lua-Terra e o Sol (na lua cheia e lua nova.)

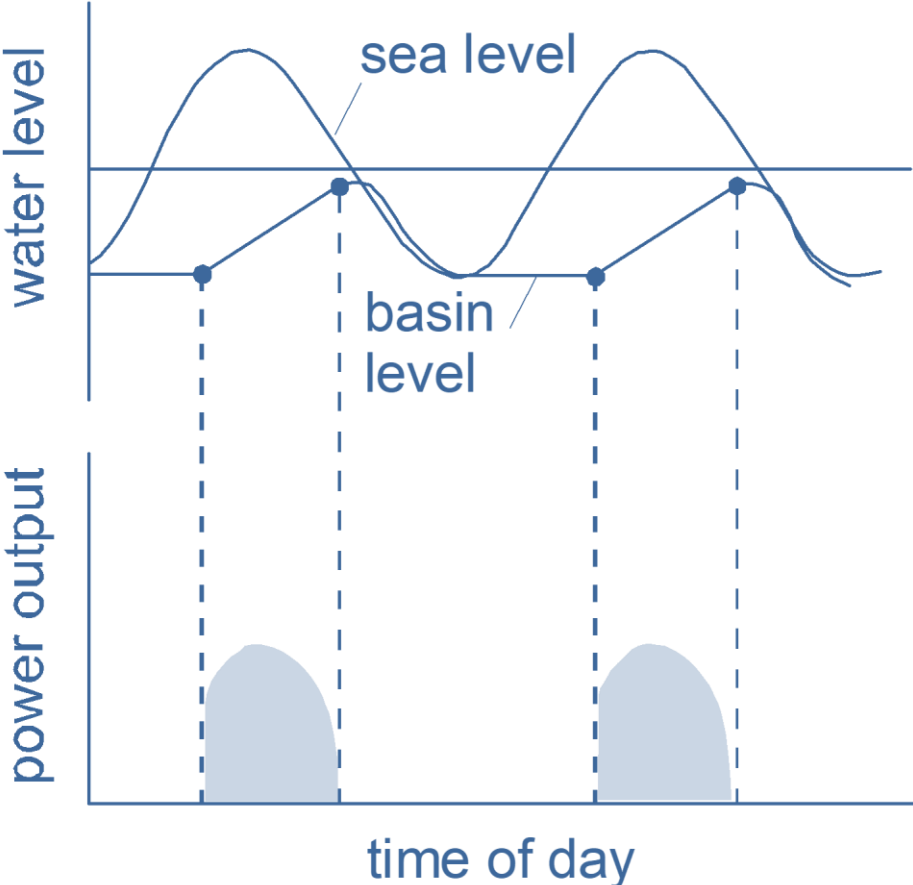
ENERGIA DAS MARÉS



Estuário de Svern, UK

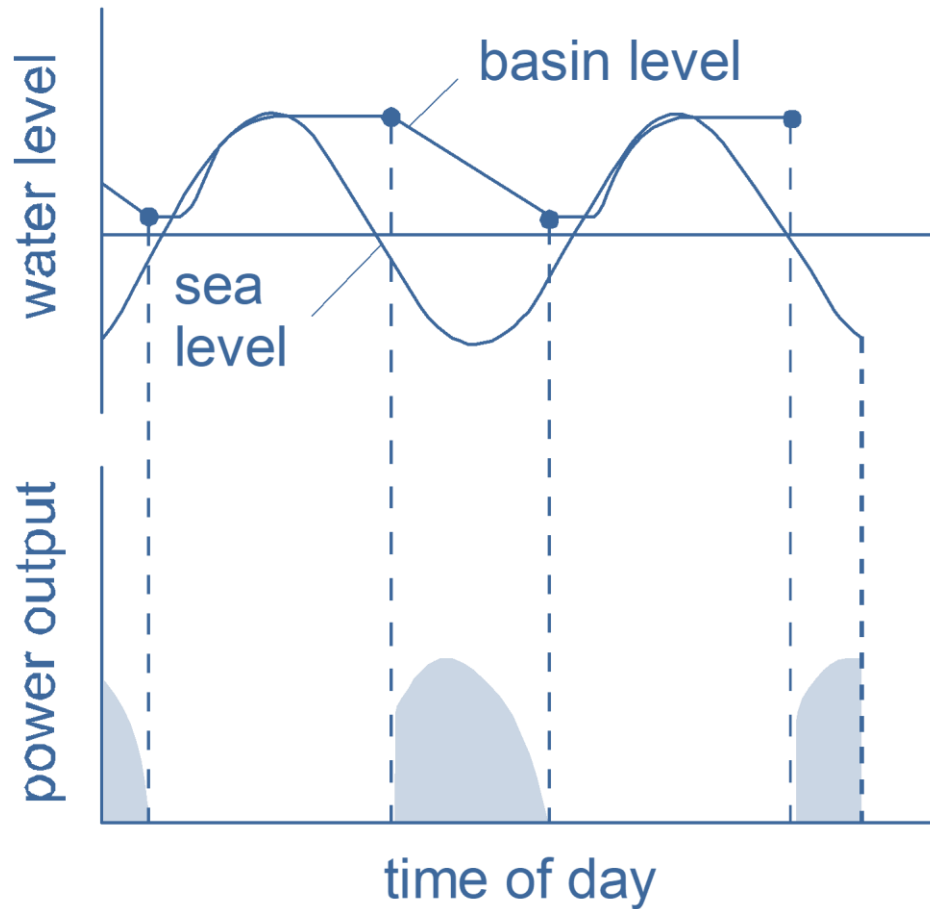
ENERGIA DAS MARÉS

Aproveitando a subida da maré



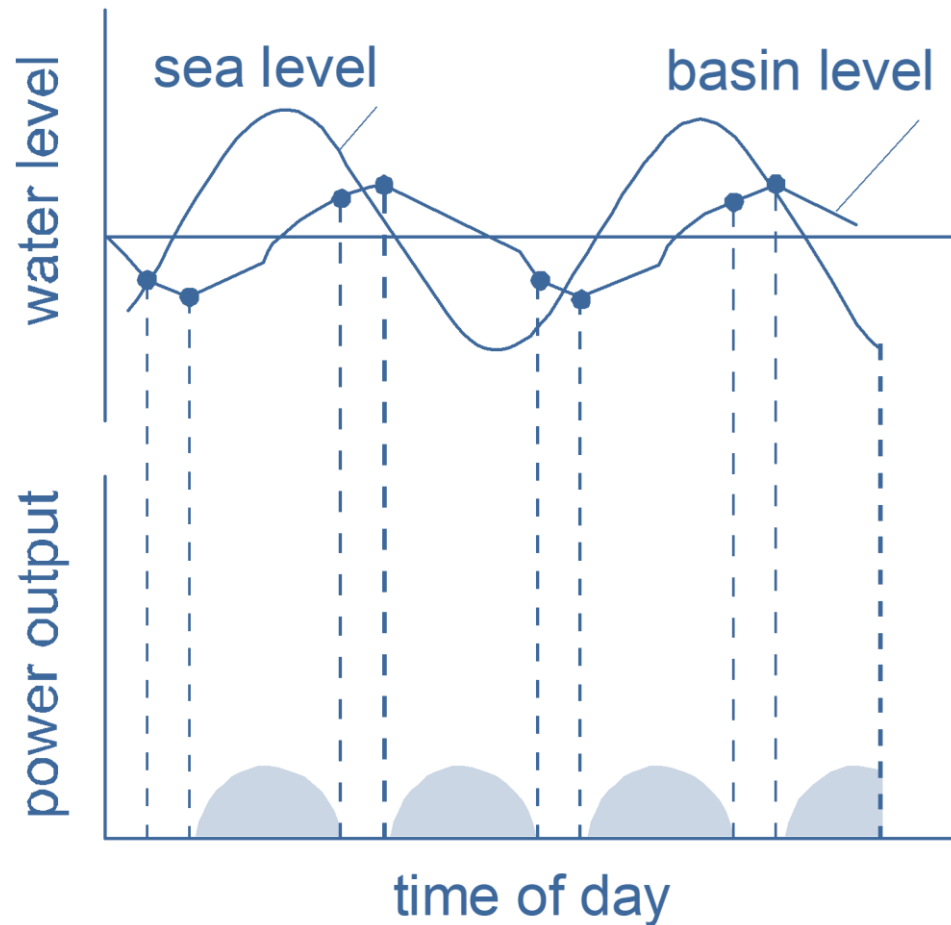
ENERGIA DAS MARÉS

Aproveitando a descida da maré



ENERGIA DAS MARÉS

Aproveitando a subida e a descida da maré



ENERGIA DAS MARÉS

Recurso

$$E = mgh$$

½ amplitude de maré

Por unidade de área:

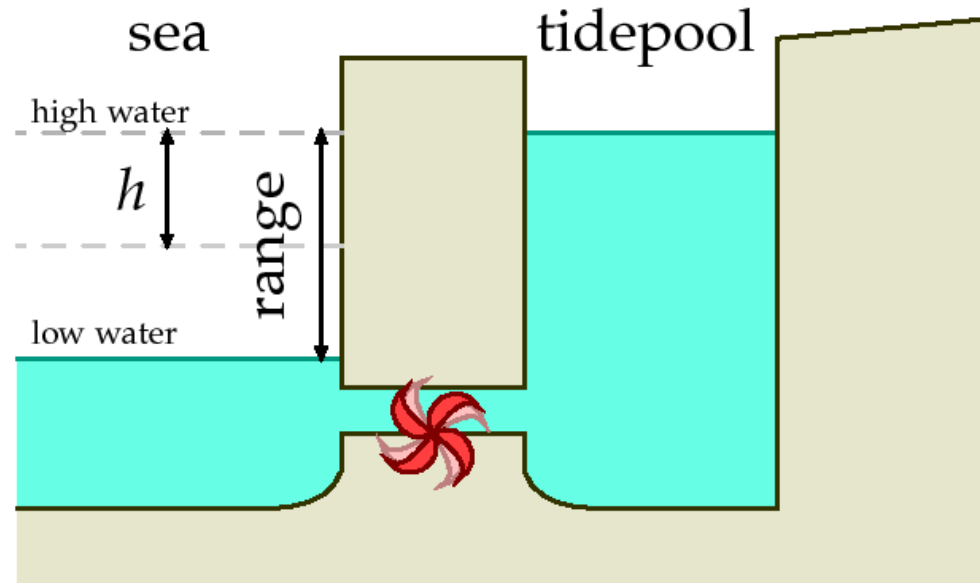
$$m = 2h\rho$$

Potência disponível:

$$P = \frac{(2h\rho)gh}{T} \quad 6 \text{ horas!}$$

$$@ h = 2 \Rightarrow P = 3.6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

1 GW: 300 km², i.e. diâmetro 20 km



$$E = \varepsilon_g 2g\rho h^2$$

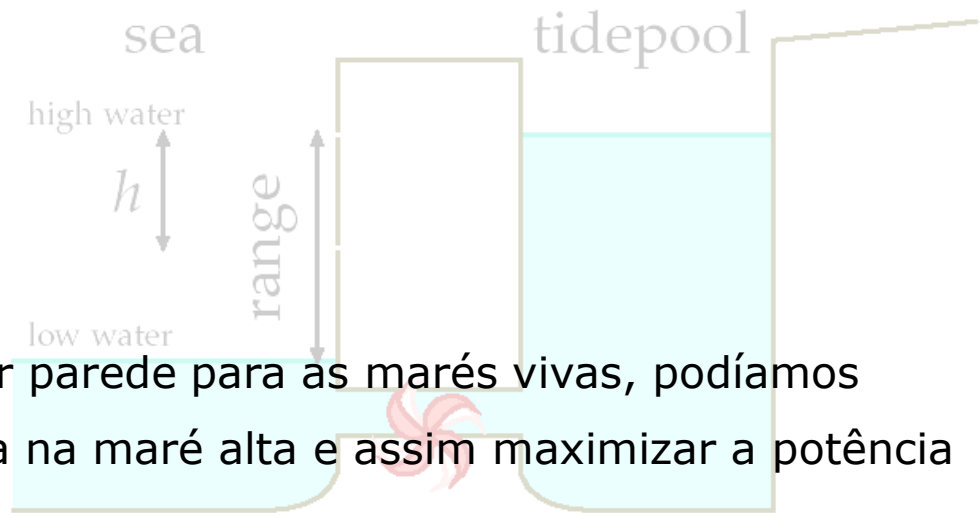
Eficiência de geração = 0.90

ENERGIA DAS MARÉS

Recurso

Uma ideia:

Se vamos ter que dimensionar parede para as marés vivas, podíamos aproveitar para bombear água na maré alta e assim maximizar a potência instalada.



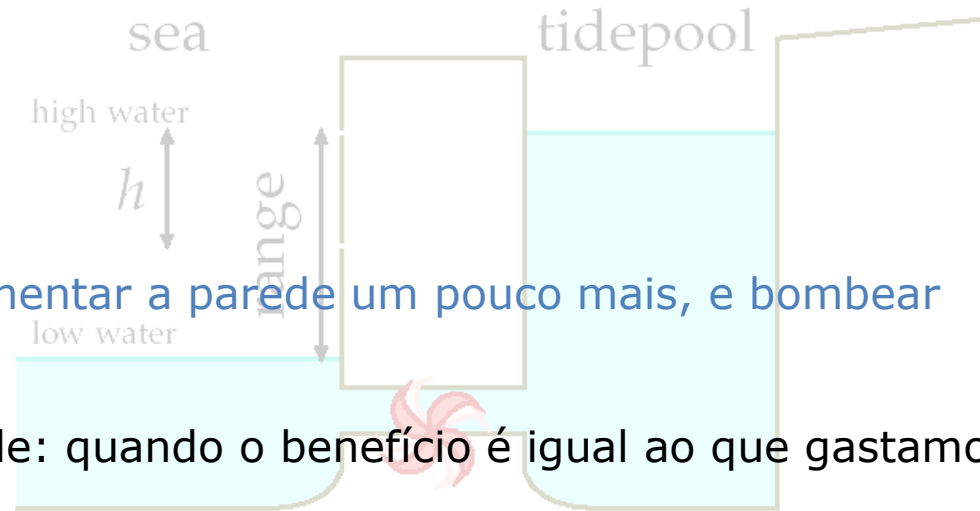
Melhor ainda, porque não aumentar a parede um pouco mais, e bombear mais água na maré alta?

ENERGIA DAS MARÉS

Recurso

Melhor ainda, porque não aumentar a parede um pouco mais, e bombear mais água na maré alta?

Qual a altura óptima da parede: quando o benefício é igual ao que gastamos em bombagem...



$$\frac{b}{\varepsilon_p} = \varepsilon_g (b + 2h)$$

retorno marginal da água extra

$\varepsilon_g = 0.90$ geração
 $\varepsilon_p = 0.85$ bombagem
 $\varepsilon_g \times \varepsilon_p \approx 0.75$ global

custo marginal da bombagem

$$b = \frac{2\varepsilon}{1-\varepsilon} h$$

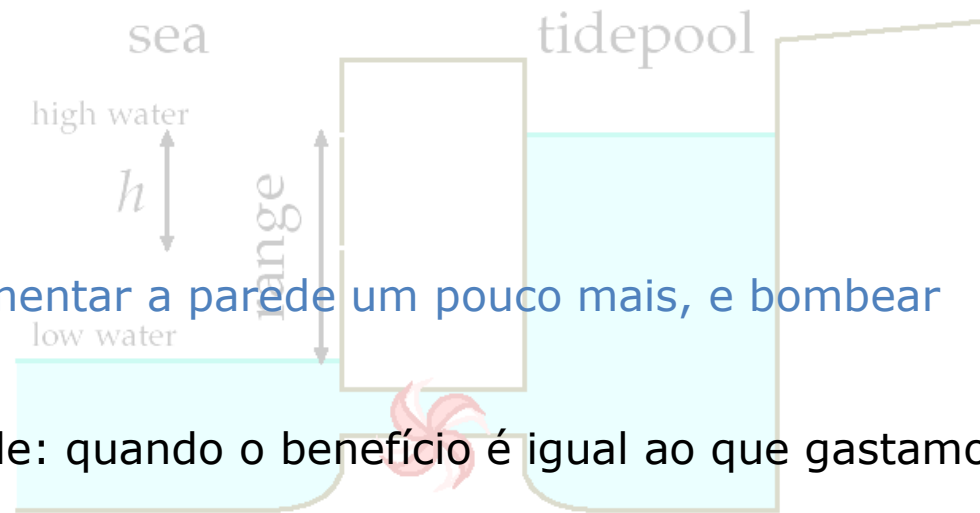
Se $h=2\text{m}$, parede tem $2h=4\text{m}$ então $b=13\text{m}$ (4x mais alto)

ENERGIA DAS MARÉS

Recurso

Melhor ainda, porque não aumentar a parede um pouco mais, e bombear mais água na maré alta?

Qual a altura óptima da parede: quando o benefício é igual ao que gastamos em bombagem...



Sem bombagem

$$E_t = \varepsilon_g 2g \rho h^2$$

$\varepsilon_g = 0.90$ geração

$\varepsilon_p = 0.85$ bombagem

$\varepsilon_g \times \varepsilon_p \approx 0.75$ global

energia, mas custos aumentam
seria melhor alargar a

barragem horizontalmente!

ENERGIA DAS MARÉS

Uma única aplicação de larga escala:

La Rance (França) – em operação há cerca de 30 anos

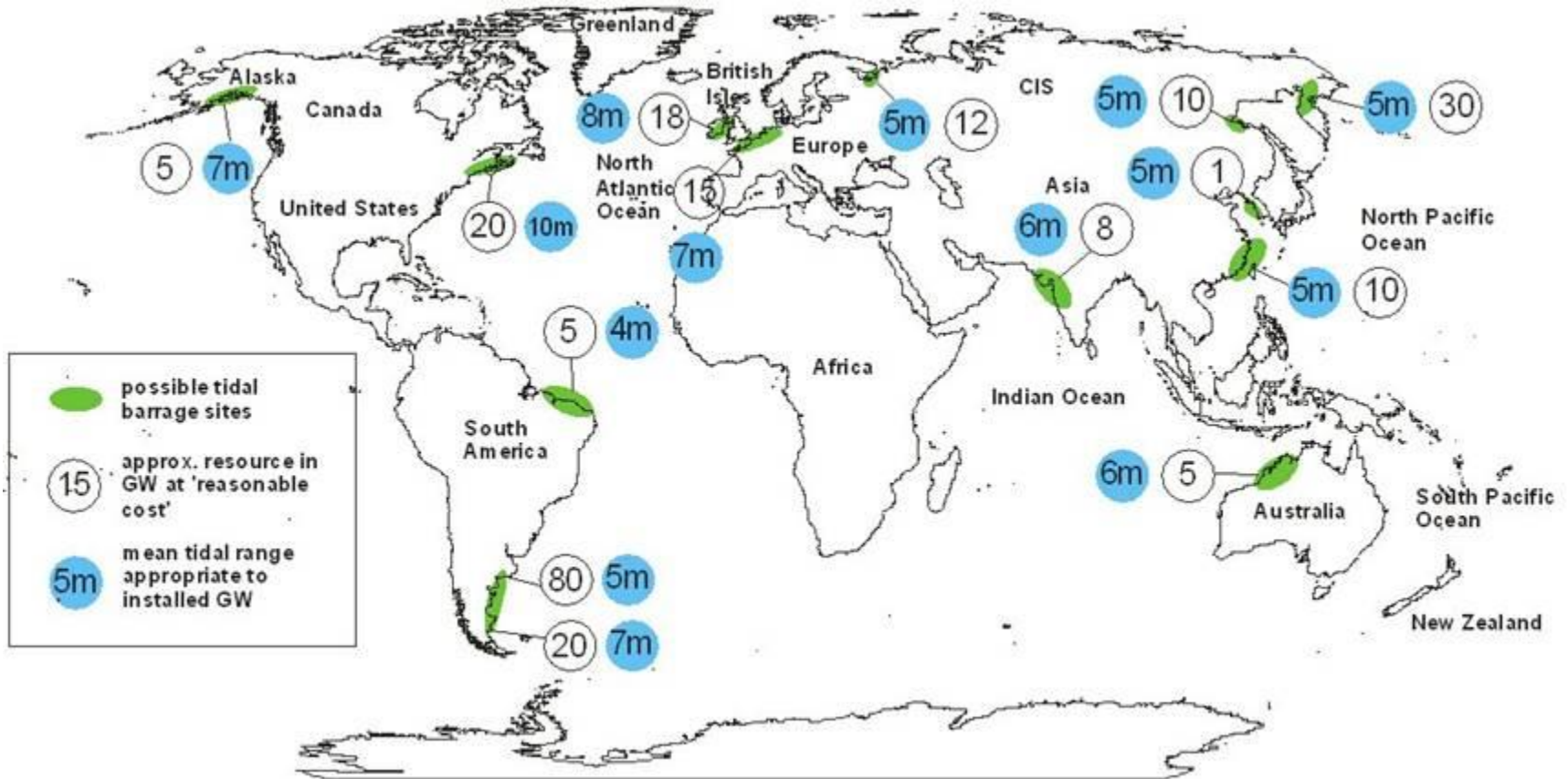
altura maré: até 13.5m; área: 22km²; energia produzida: 16TWh/ano

densidade média de produção: 2.7 W/m²



ENERGIA DAS MARÉS

Amplitude maré (m) e potencial energético (GW)

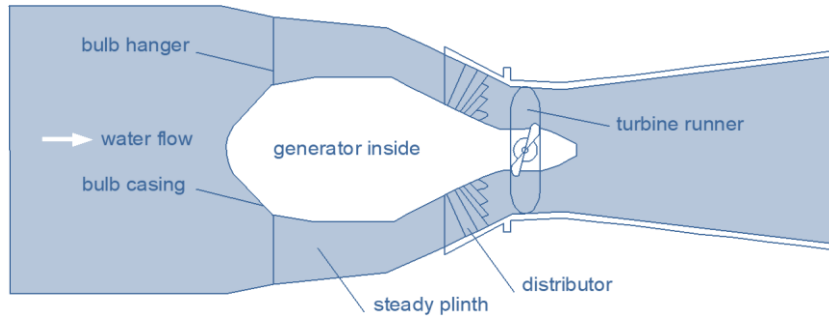


ENERGIA DAS MARÉS

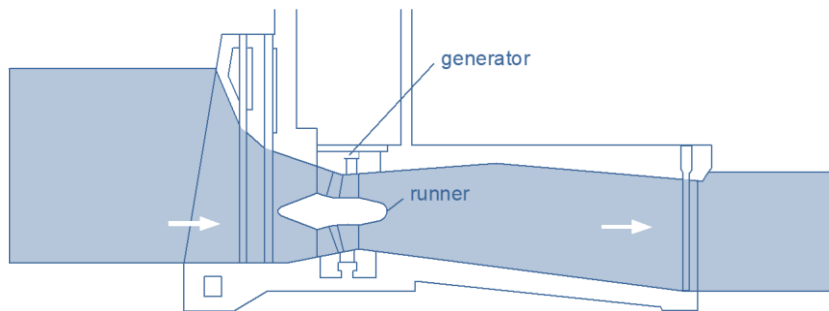
Impactos ambientais

- redução **variação do nível de água** pode afectar mobilidade espécies marinhas, com potencial impacto nas **populações de aves aquáticas** e/ou migratórias
- redução da **salinidade** no reservatório estuário
- menor transporte de **sedimentos** pode provocar águas mais cristalinas, e portanto maior **produtividade biológica** (alteração ecossistema) associada a mais radiação solar
- **sedimentos/nutrientes** podem ficar retidos na barragem, com potenciais impactos nas **zonas costeiras/praias**

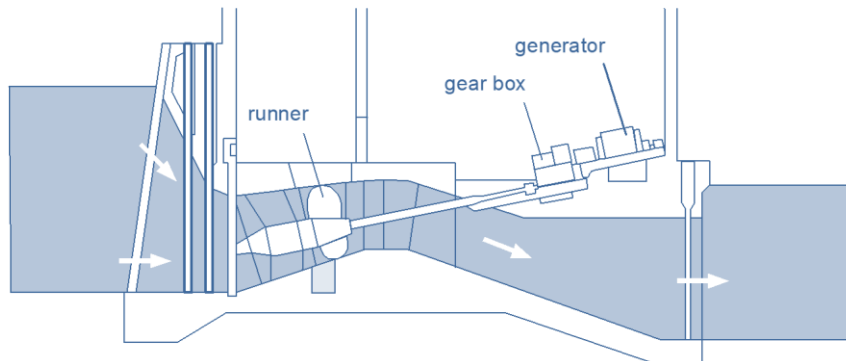
ENERGIA DAS MARÉS



Turbina de maré 'Bulb'



Turbina de maré 'Stratflow'



Turbina de maré 'tubular'

ENERGIA DAS ONDAS

Correntes oceânicas ou de maré

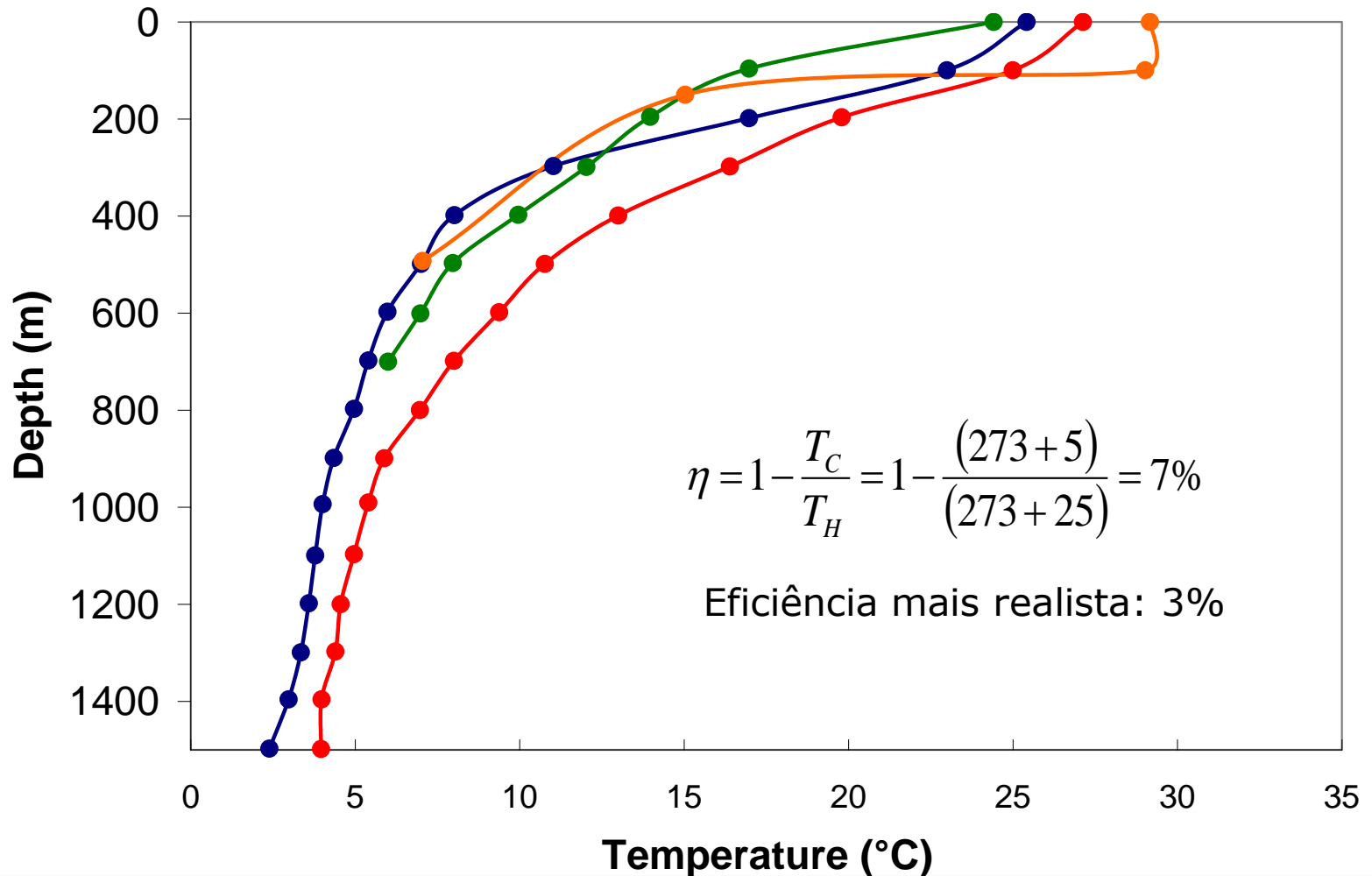


$$\rho_{\text{água}} \gg \rho_{\text{ar}}$$

Turbina \varnothing 10-15m
pode produzir
200-700kW

GRADIENTE TÉRMICO

OTEC – Ocean thermal energy conversion



GRADIENTE TÉRMICO

OTEC – Ocean thermal energy conversion

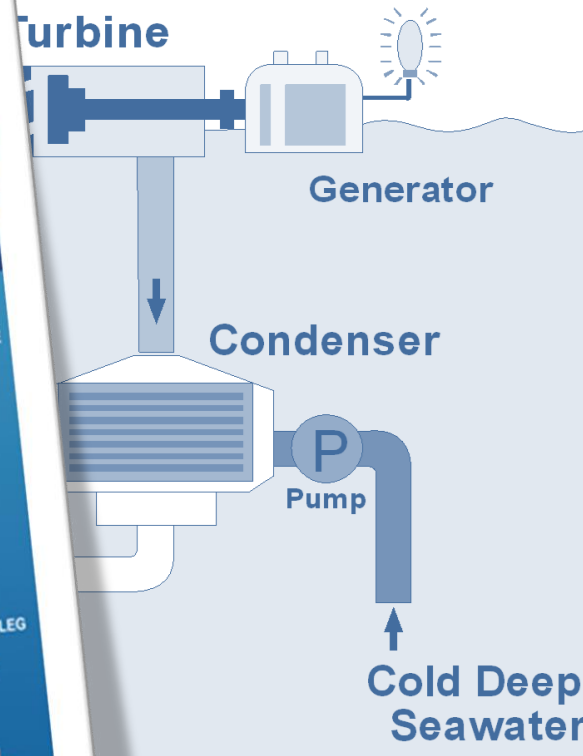
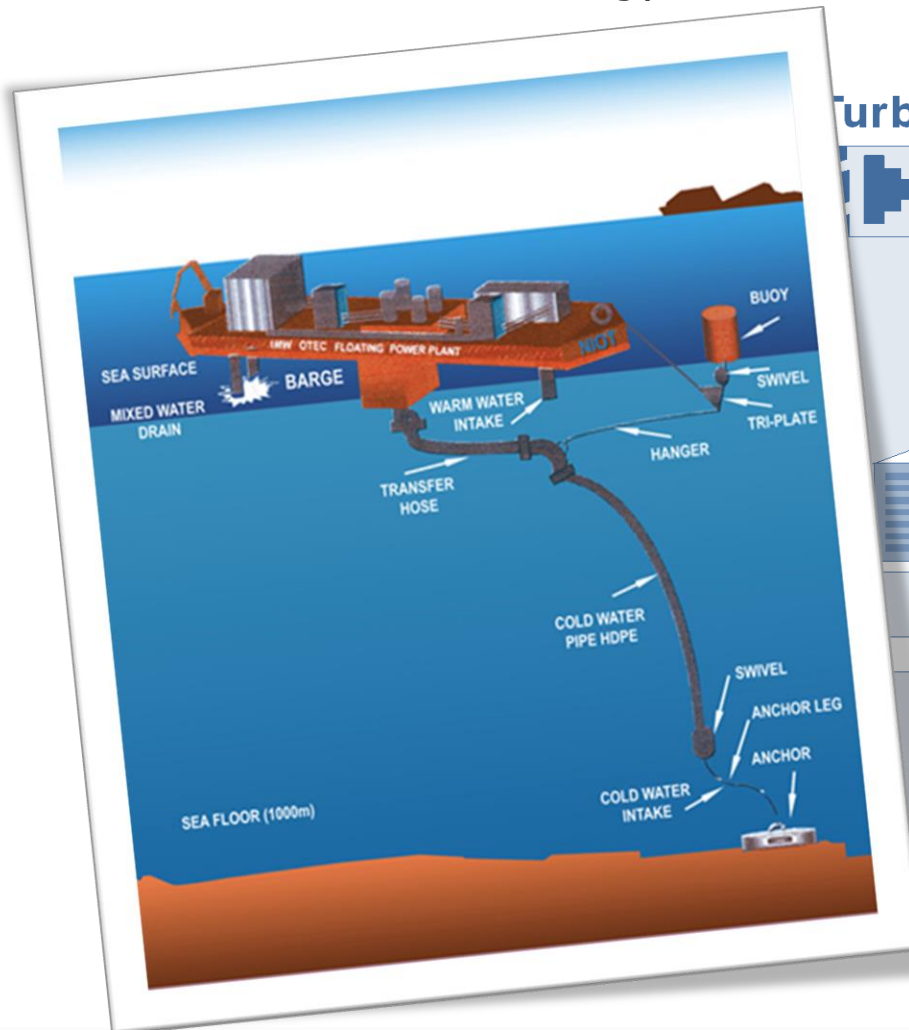


Para aumentar a eficiência precisamos de aumentar a diferença de temperatura, e.g.

- colector solar
- *solar pond*

GRADIENTE TÉRMICO

OTEC – Ocean thermal energy conversion



closed-cycle OTEC
process based on
the Rankine cycle

GRADIENTE TÉRMICO

OTEC – Ocean thermal energy conversion

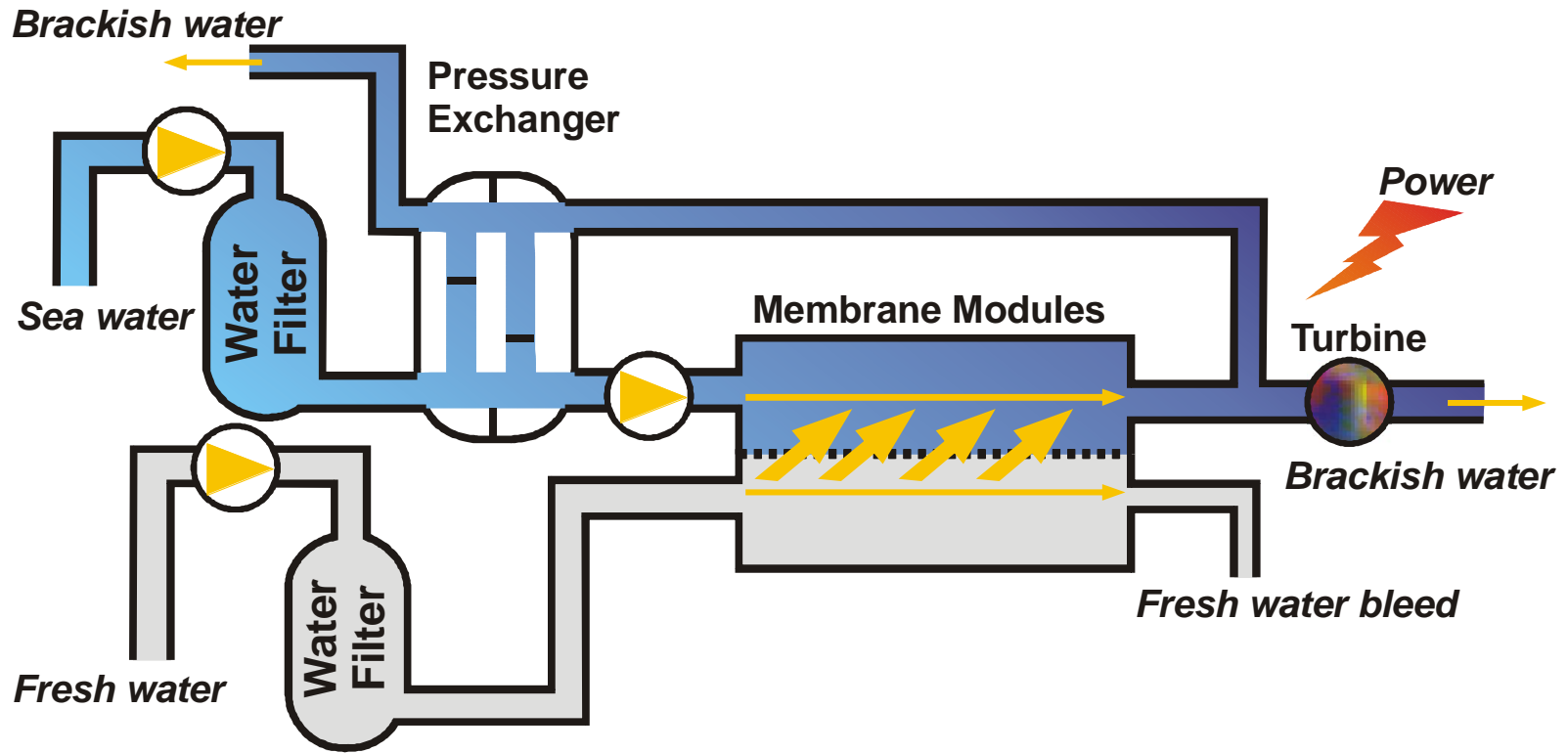
Bombagem de água profunda (mais rica em nutrientes) para a superfície

- aumenta produtividade biológica pelo que pode ser associada a produção de **aquacultura**
- permite **mineração** de elementos comercialmente interessantes e.g. lítio.

Custo **transporte** electricidade submarino pode ser proibitivamente caro pelo que electricidade produzida pode ser aproveitada para

- **dessalinização**
- produção **hidrogénio**.

GRADIENTE SALINIDADE



Processo de osmose para produção de electricidade a partir do gradiente de salinidade.