

ENERGIA OCEANOS

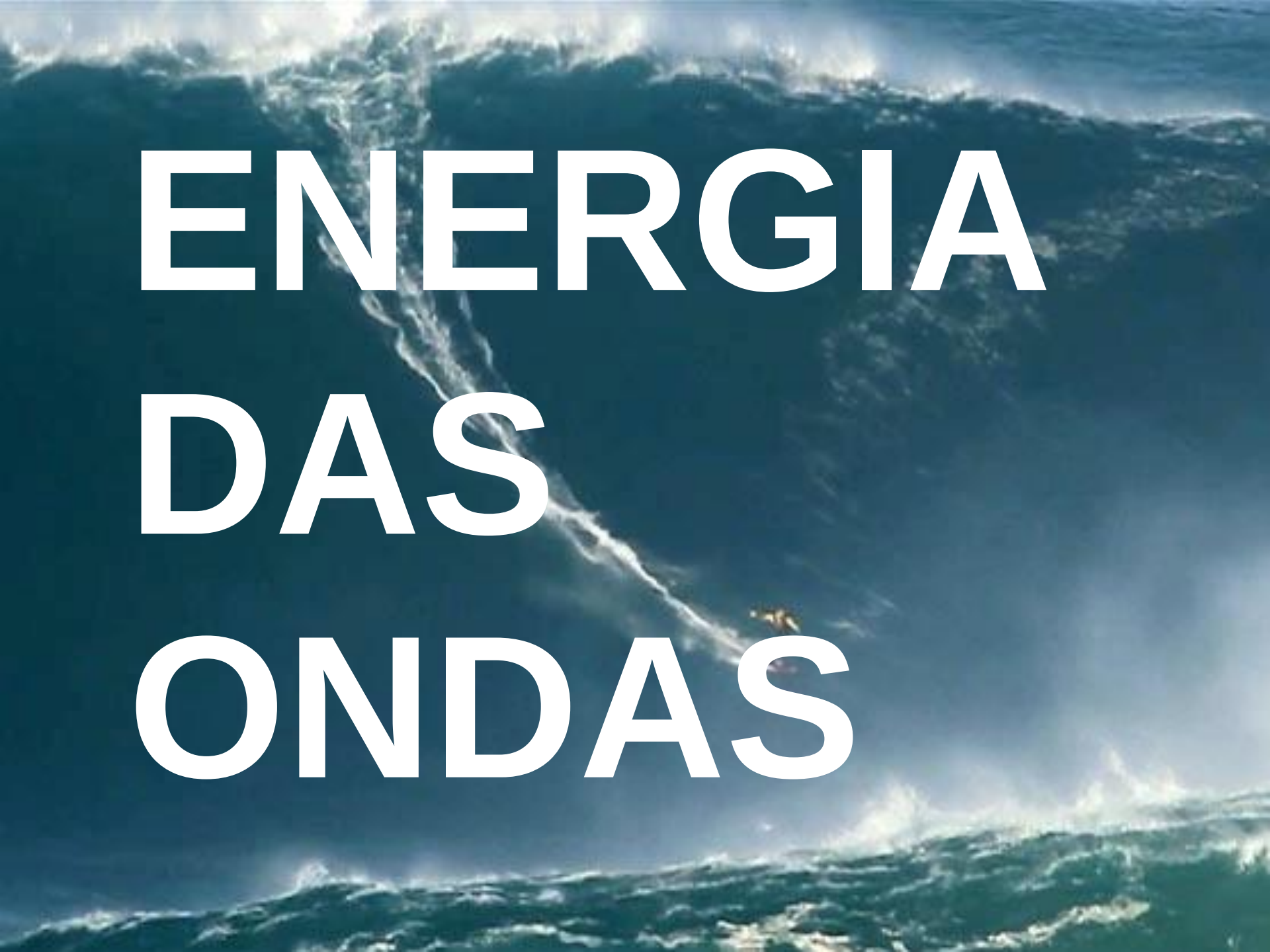
Energias renováveis

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

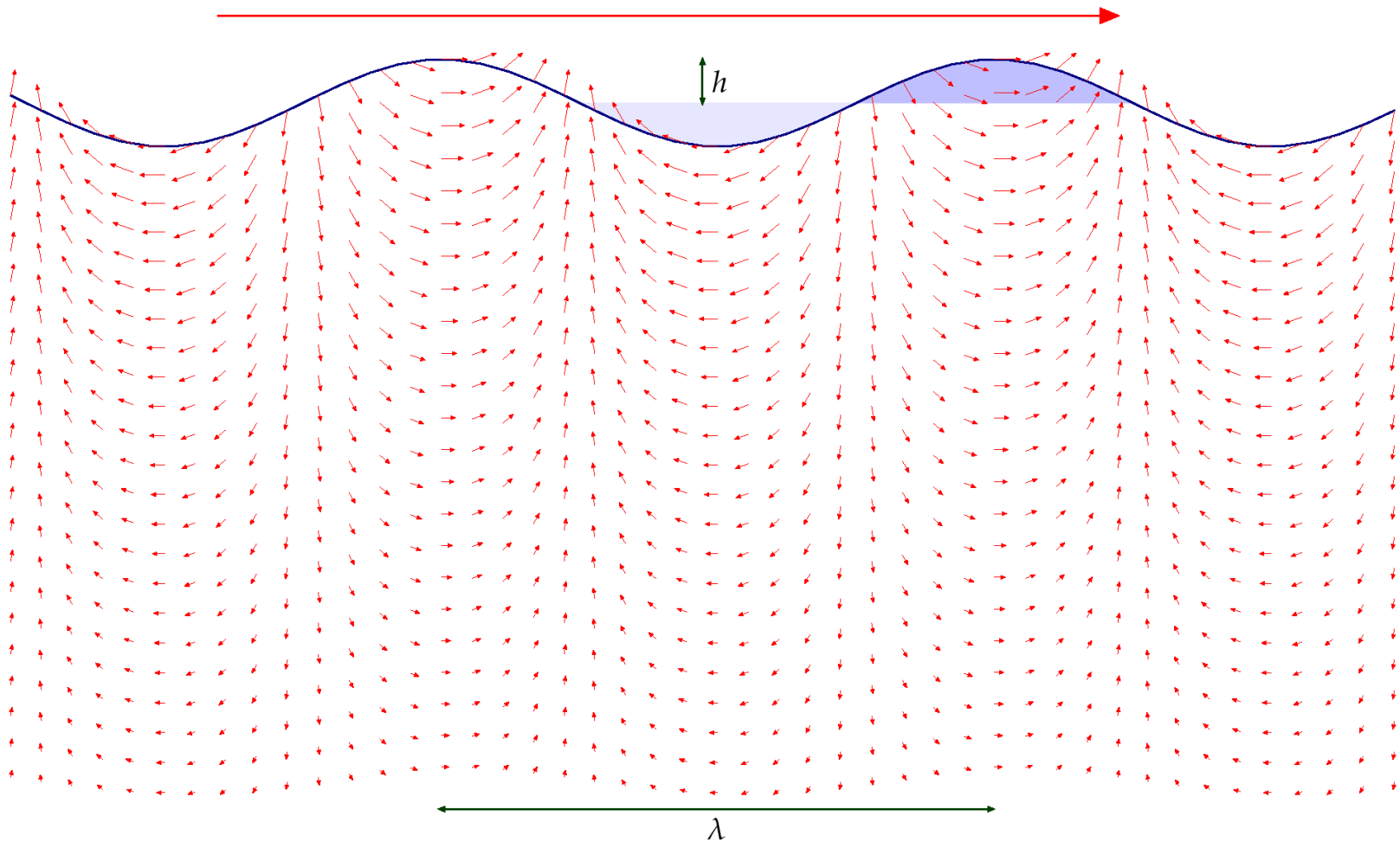
- radiação **solar** aquece superfície da Terra,
- cujas diferenças de temperatura causam **vento**,
- ventos sobre a superfície do oceano causam **ondas**

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

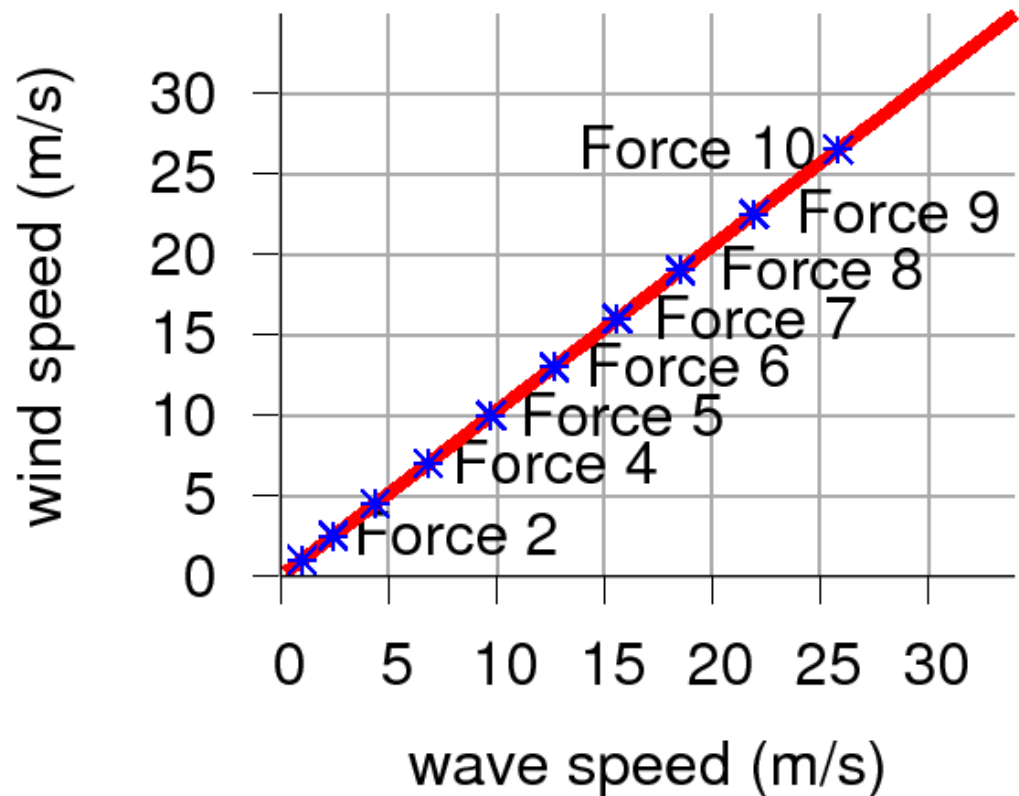
Energia das ondas = energia potencial + energia cinética



ENERGIA DAS ONDAS

Energia das ondas = energia potencial + energia cinética

Velocidade das ondas é proporcional à velocidade do vento.

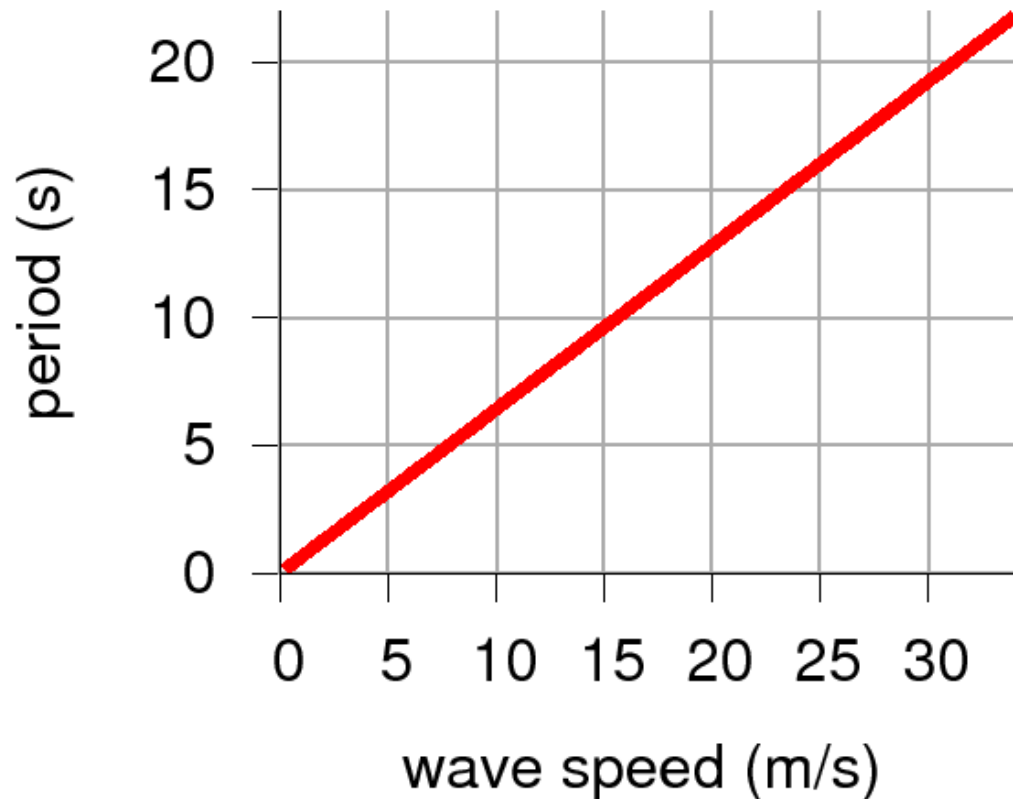


ENERGIA DAS ONDAS

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

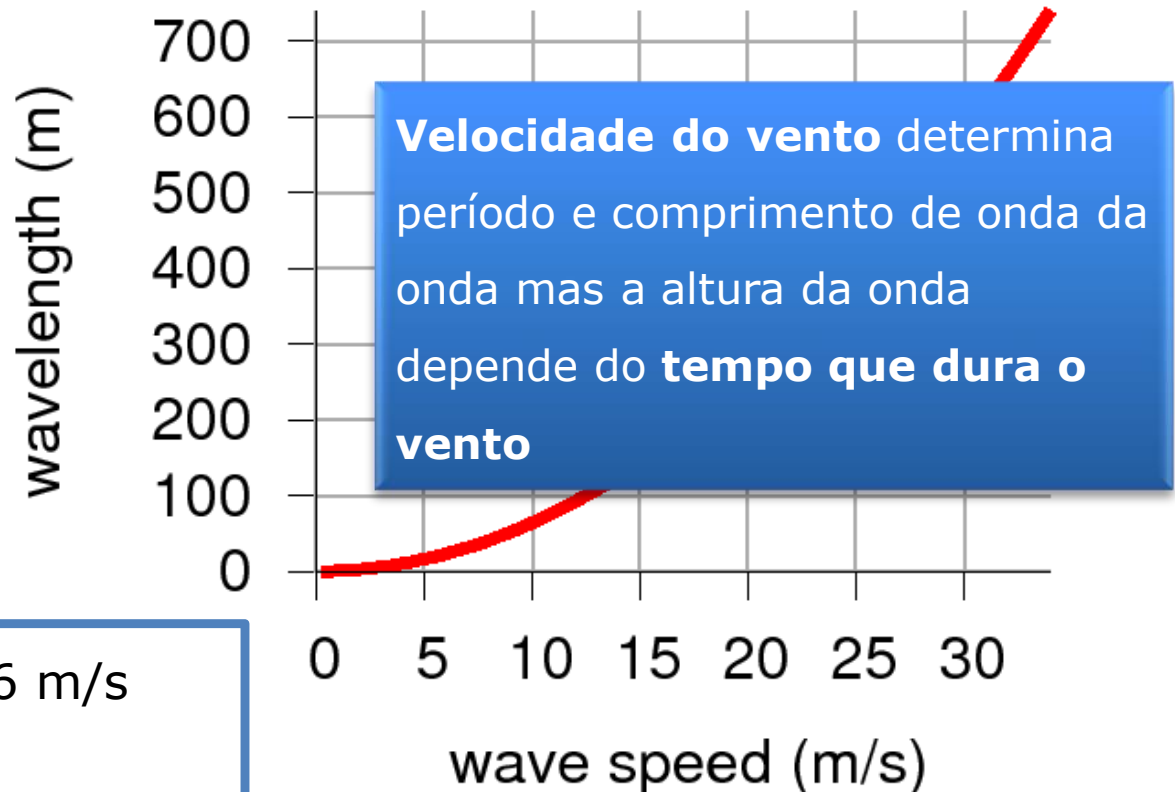
O comprimento de onda das ondas aumenta com o quadrado da velocidade.

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

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

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

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



ENERGIA DAS ONDAS

Energia das ondas = energia potencial + energia cinética

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

$$P_{cinética} = P_{potencial}$$

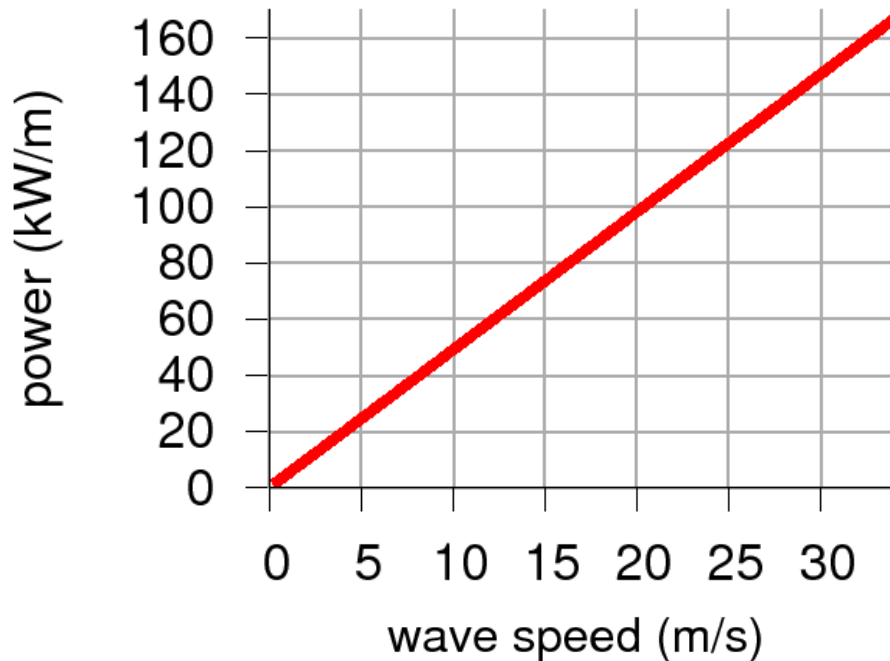
$$P_{total} = P_{potencial} + P_{cinética} = \frac{1}{2} \rho g h^2 v$$

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 cin



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).

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

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

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

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

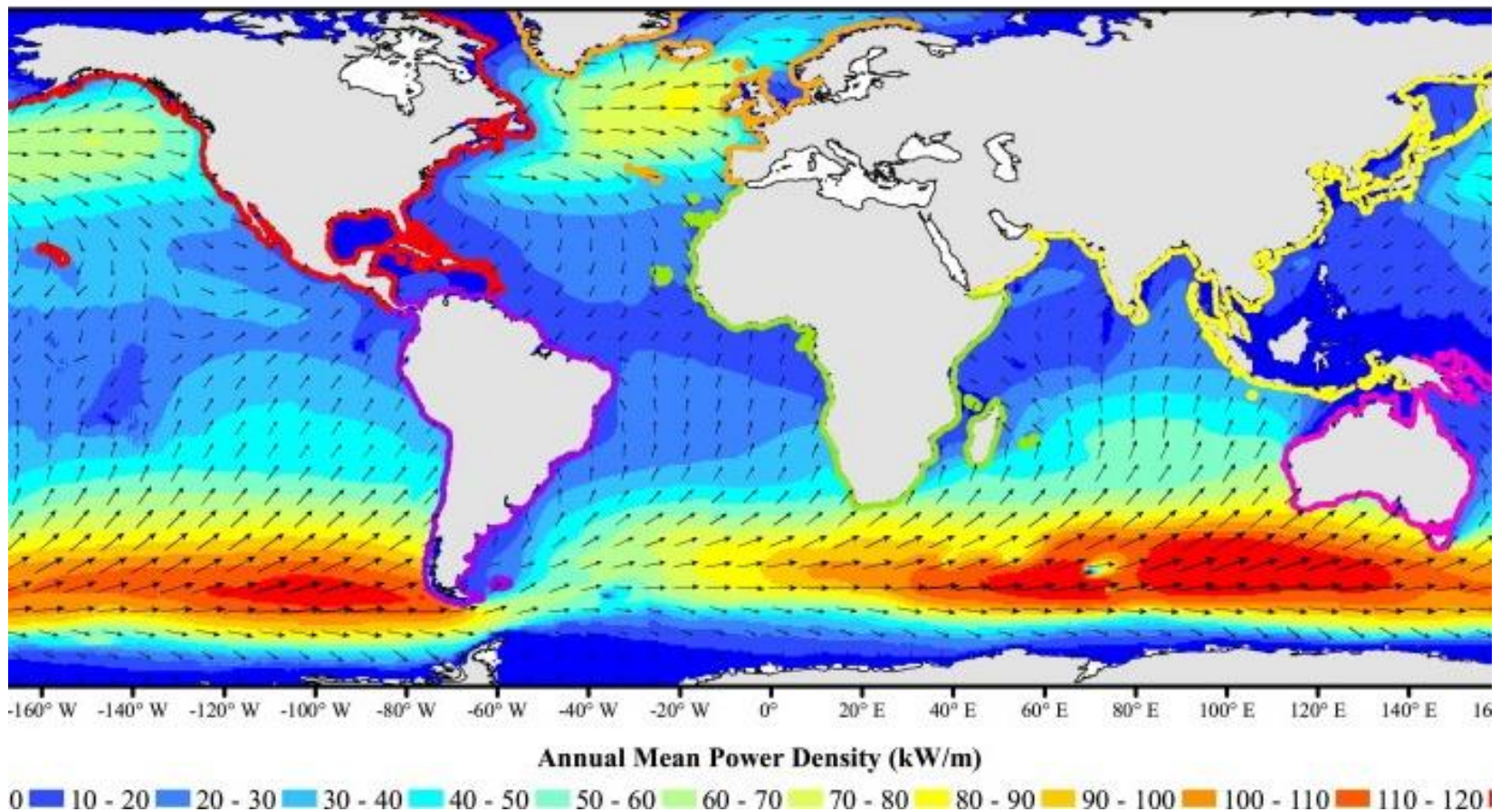
Na realidade a energia *viaja* à velocidade de grupo que é metade da velocidade da onda e por isso

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

ENERGIA DAS ONDAS

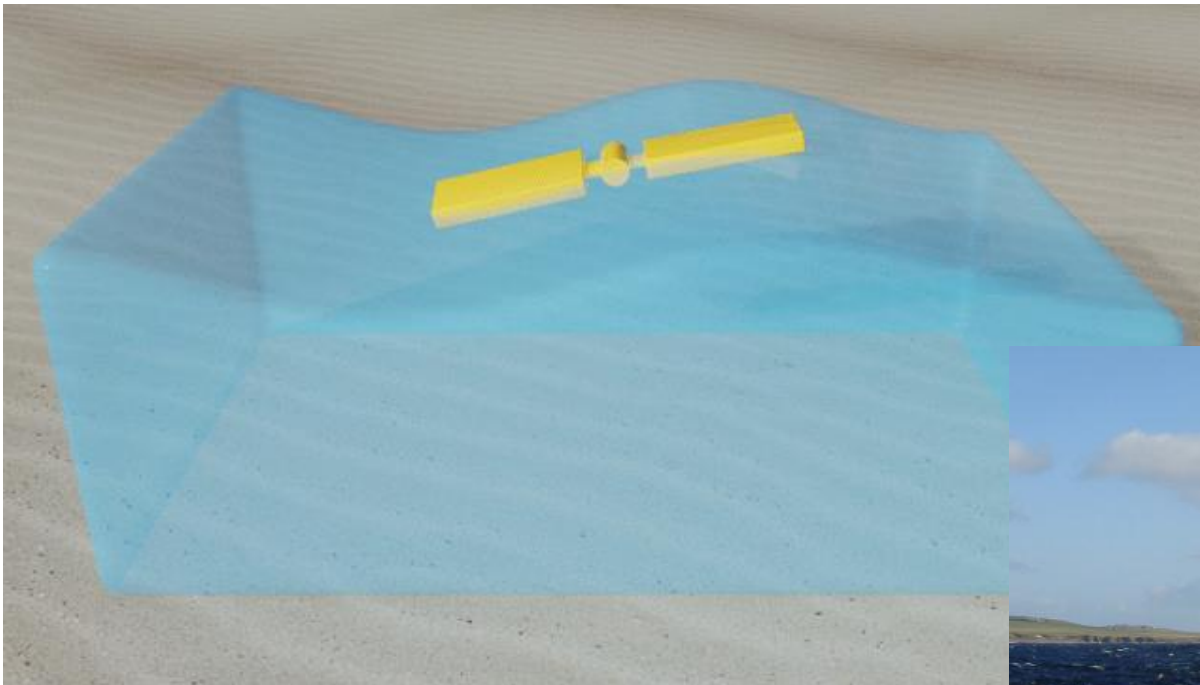
Potencial das energia das ondas

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



ENERGIA DAS ONDAS

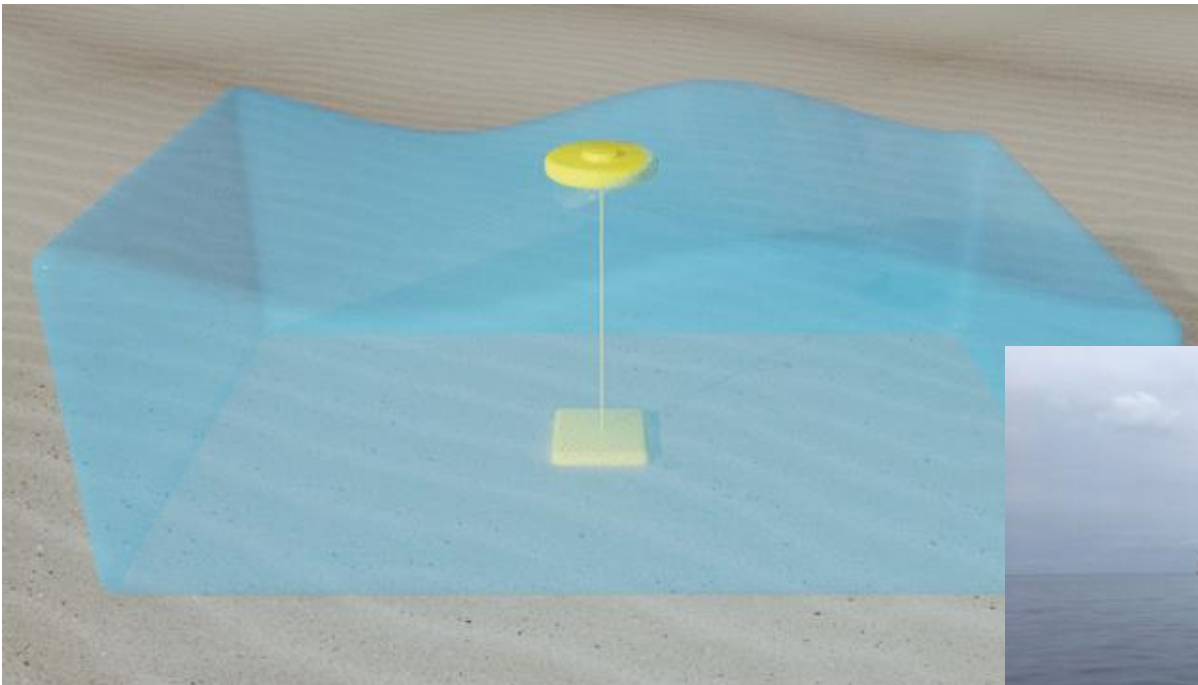
Atenuadores - Movimento relativo dos segmentos pode ser usado para atuar sobre bomba hidráulicas que geram eletricidade



Pelamis wave power

ENERGIA DAS ONDAS

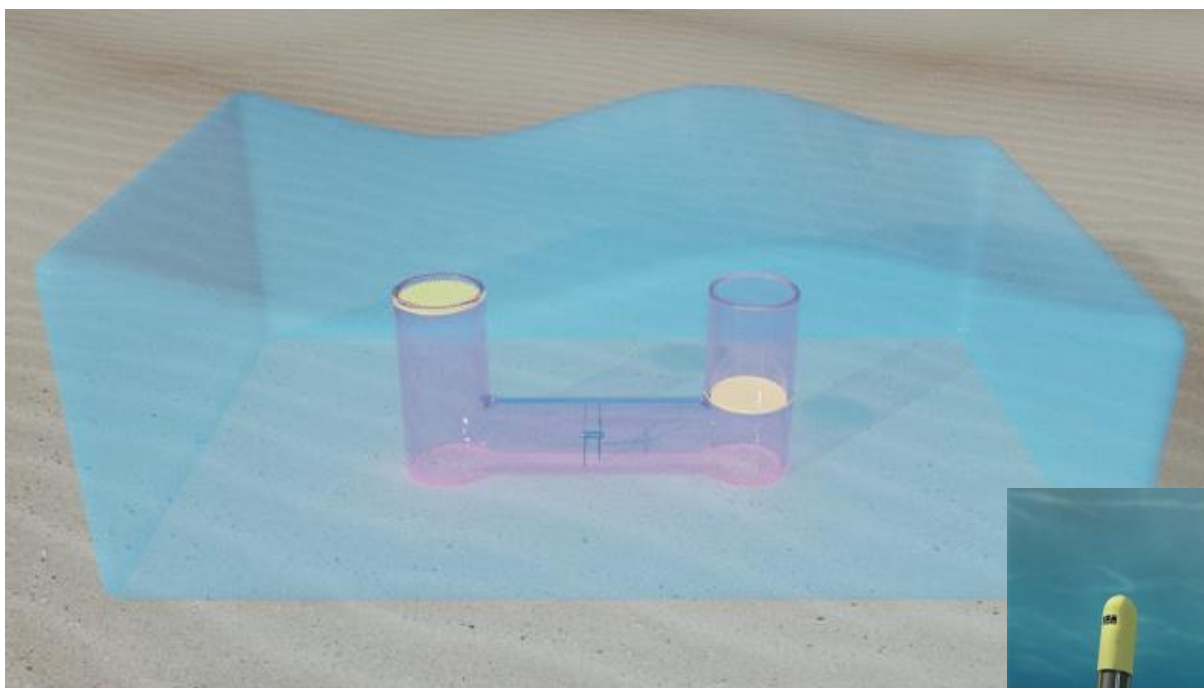
Absorção pontual - A eletricidade pode ser produzida usando um gerador linear ou rotativo, bombeando um fluido ou geração direta.



Wave power technologies

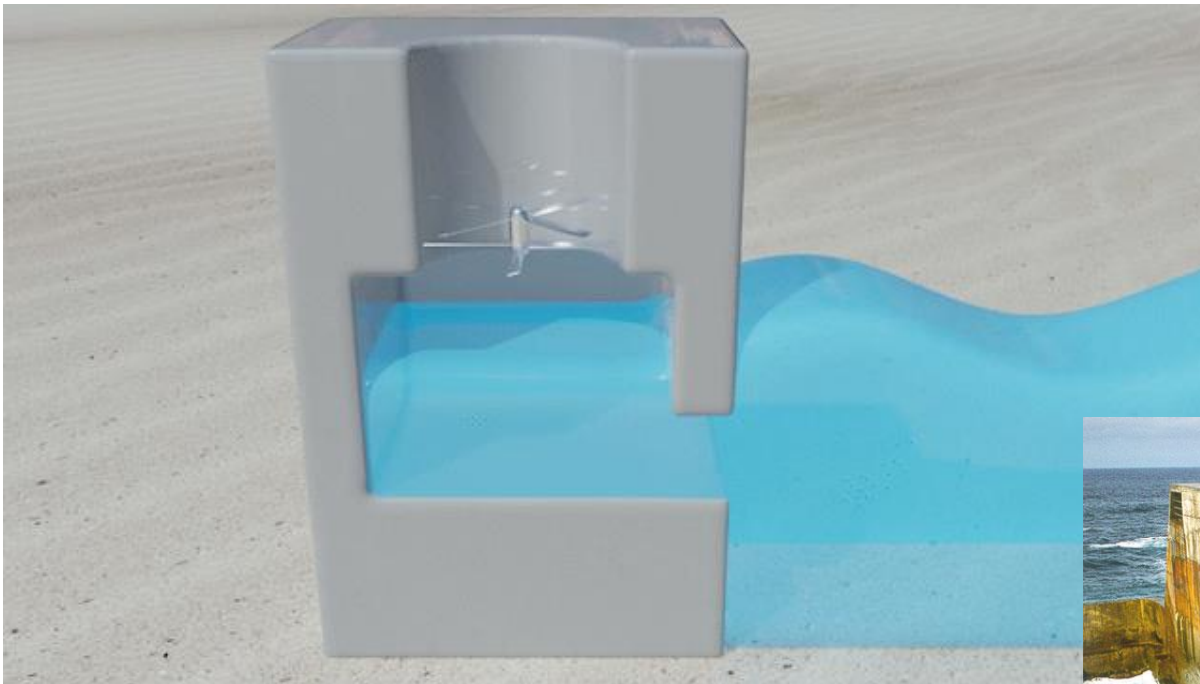
ENERGIA DAS ONDAS

Diferencial de pressão - A energia é extraída à medida que o ar flui entre as câmaras



ENERGIA DAS ONDAS

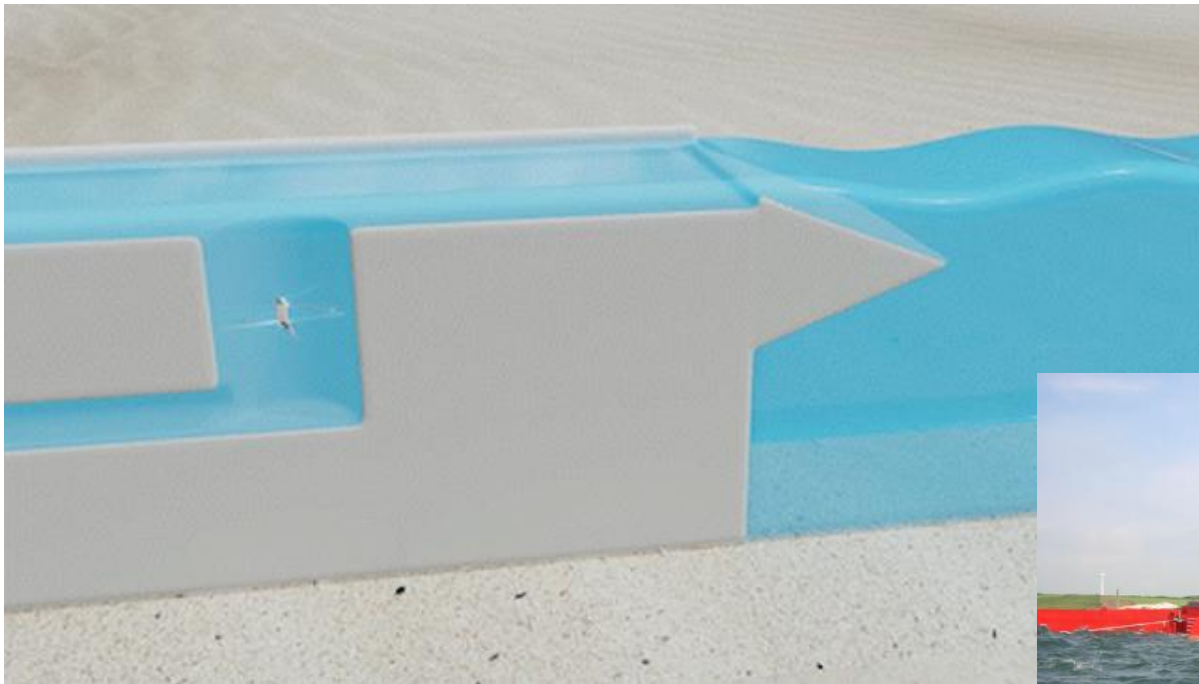
Coluna de ar oscilante - Pressão de ar que acciona turbina



Central da Ilha do Pico

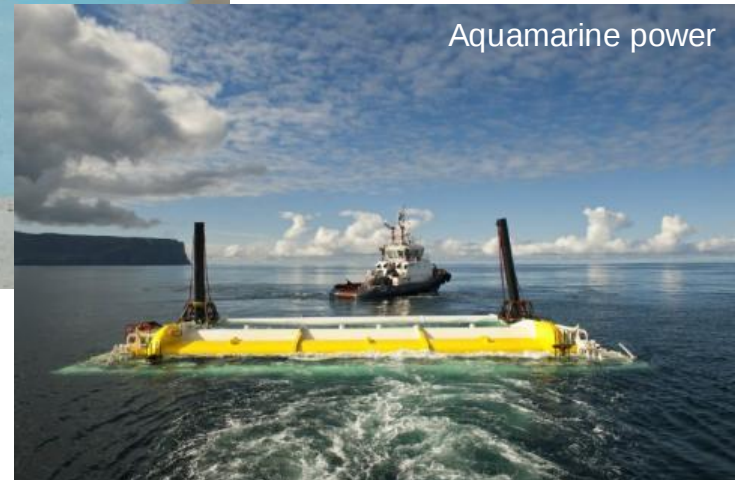
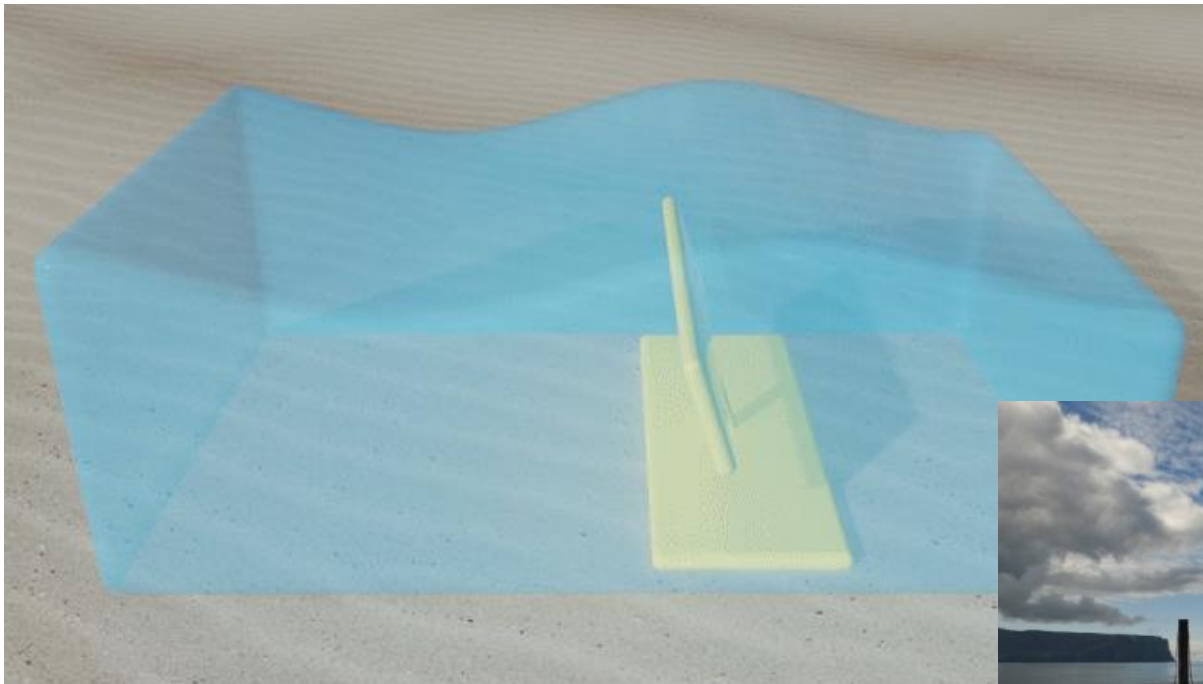
ENERGIA DAS ONDAS

Dispositivos de galgamento - são estruturas longas que permitem que o movimento das ondas encha um reservatório a um nível de água mais elevado



ENERGIA DAS ONDAS

Conversores de onda oscilante - movimento aciona gerador para produzir eletricidade ou pode ser usado para pressurizar um fluido.



ENERGIA DAS ONDAS

Potencial das energia das ondas

40 kW/m

Eficiência: 50%

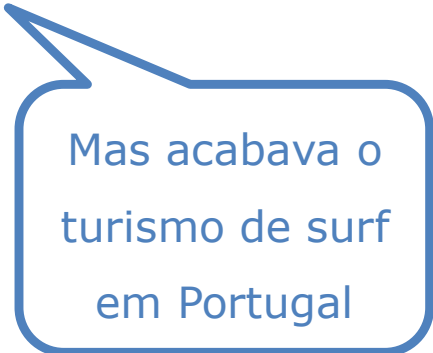
Comprimento costa nacional: 500 km

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

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

Zonas não elegíveis

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**

[illegible]

ENERGIA DAS ONDAS

Potencial das energia das ondas

40 kW/m

Eficiência: 50%

Comprimento costa nacional: 500 km

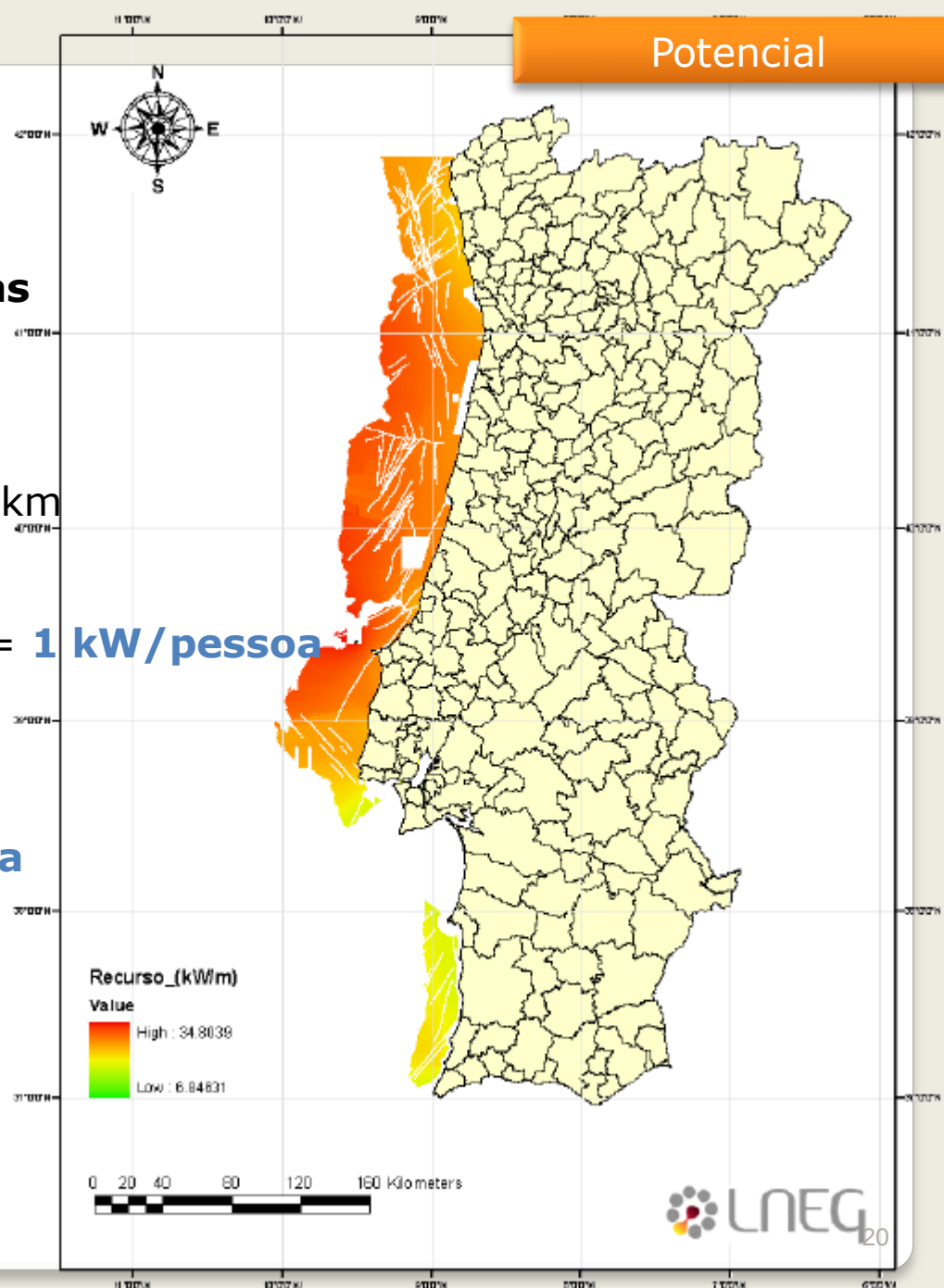
$$40 \times 0.5 \times 500\,000 = 10\text{ GW}$$

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

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

Potencial das energia das ondas

40 kW/m

Eficiência: 50%

Comprimento costa nacional: 500 km

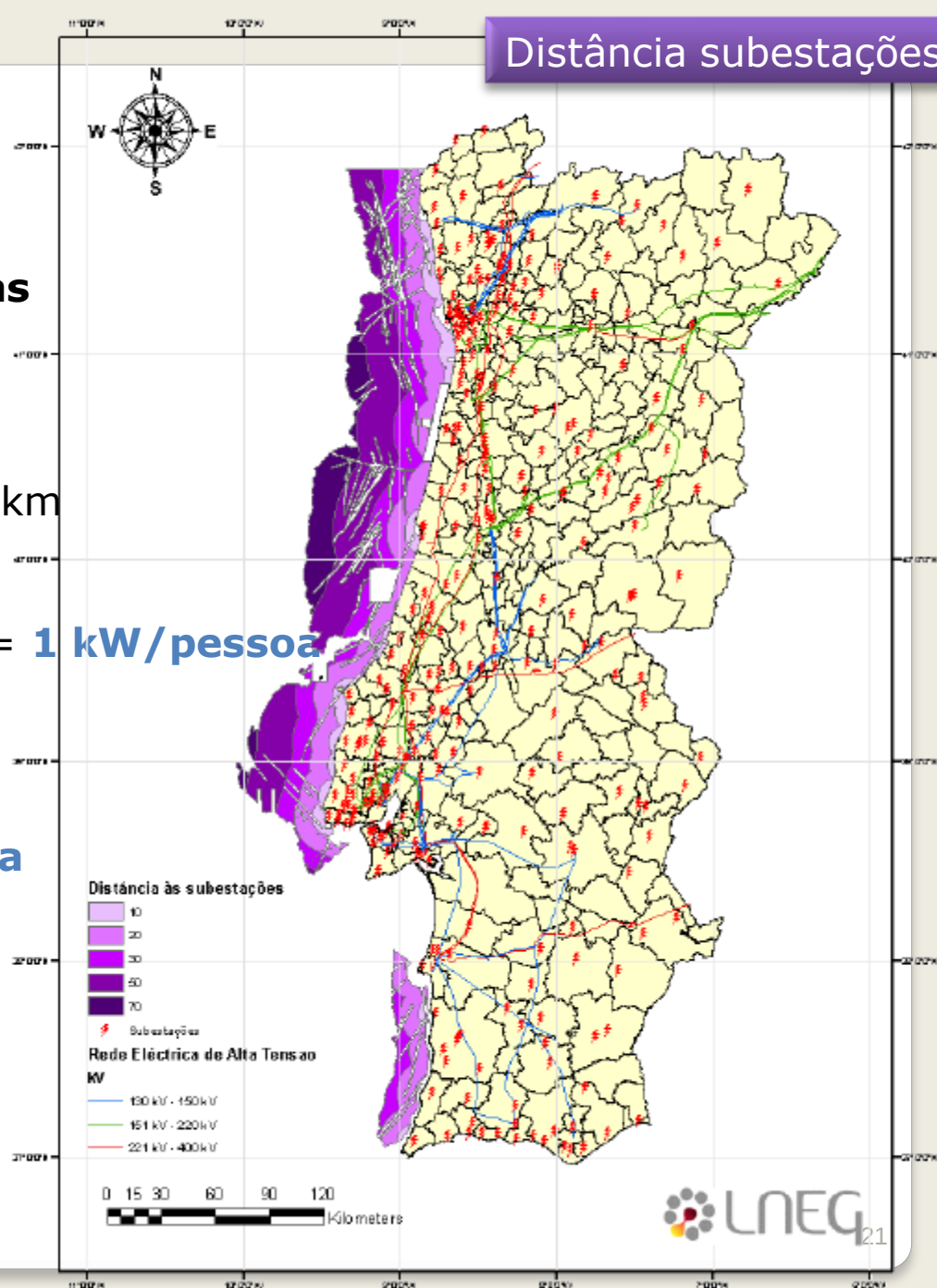
$40 \times 0.5 \times 500\,000 = 10\text{ GW}$

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

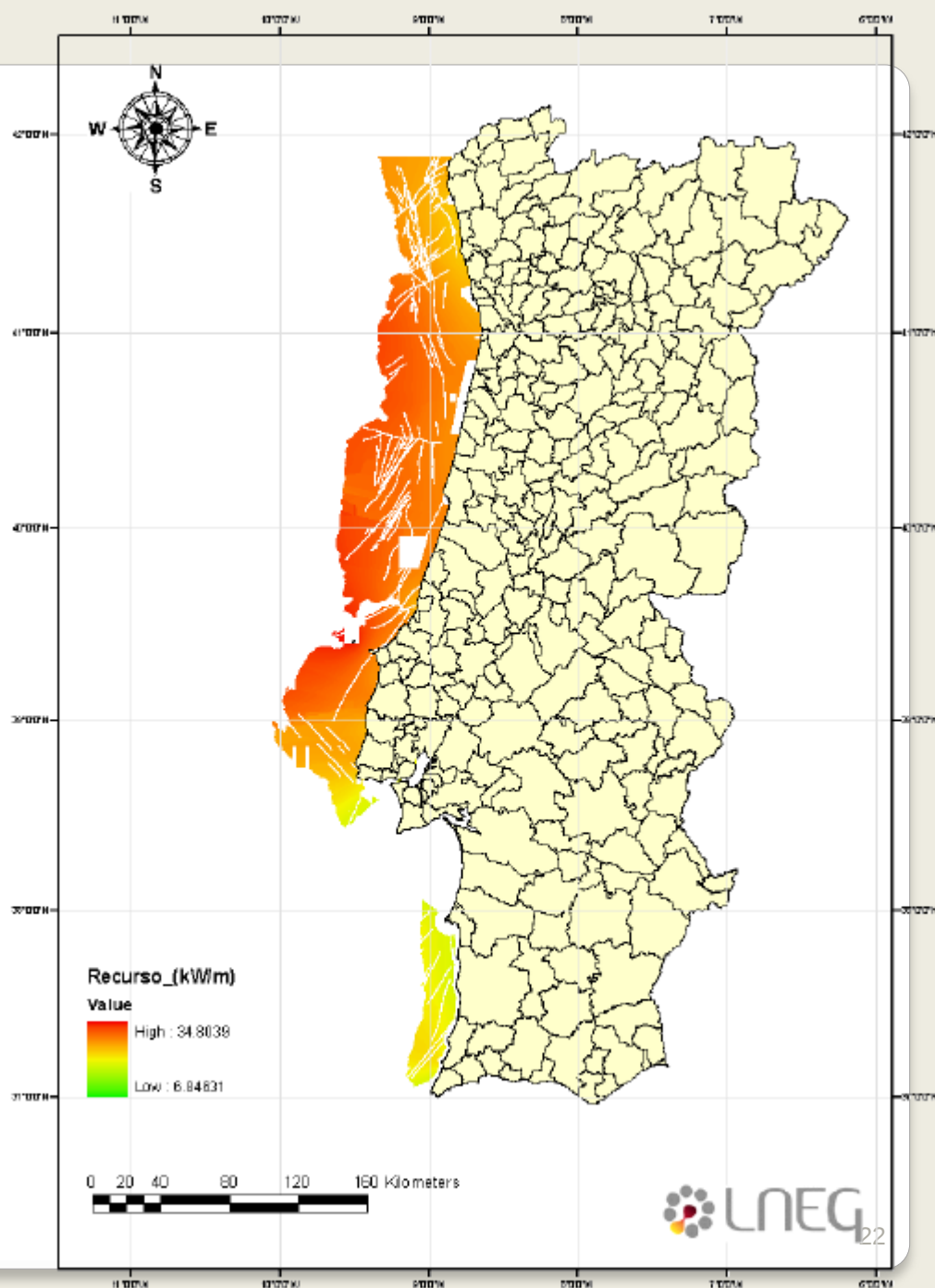
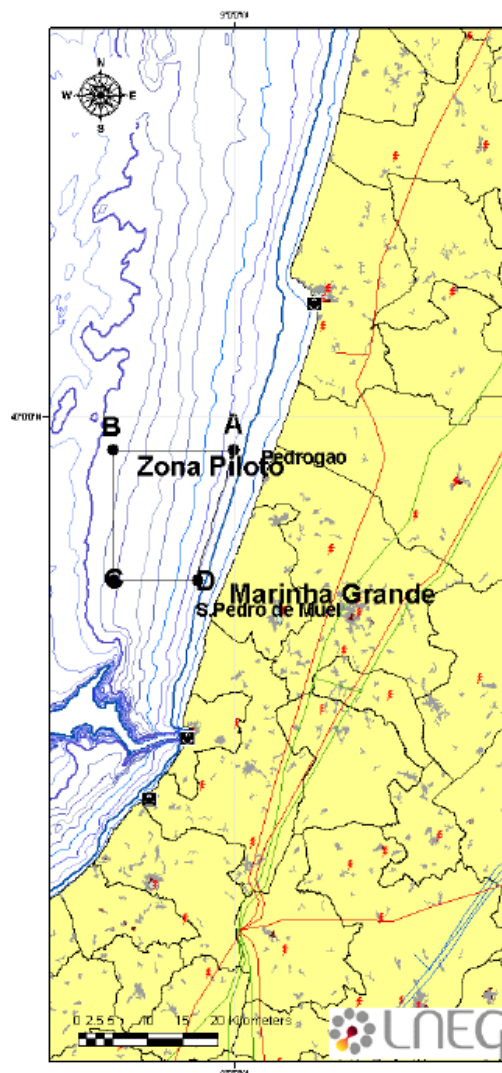
Com uma eficiência mais realista:

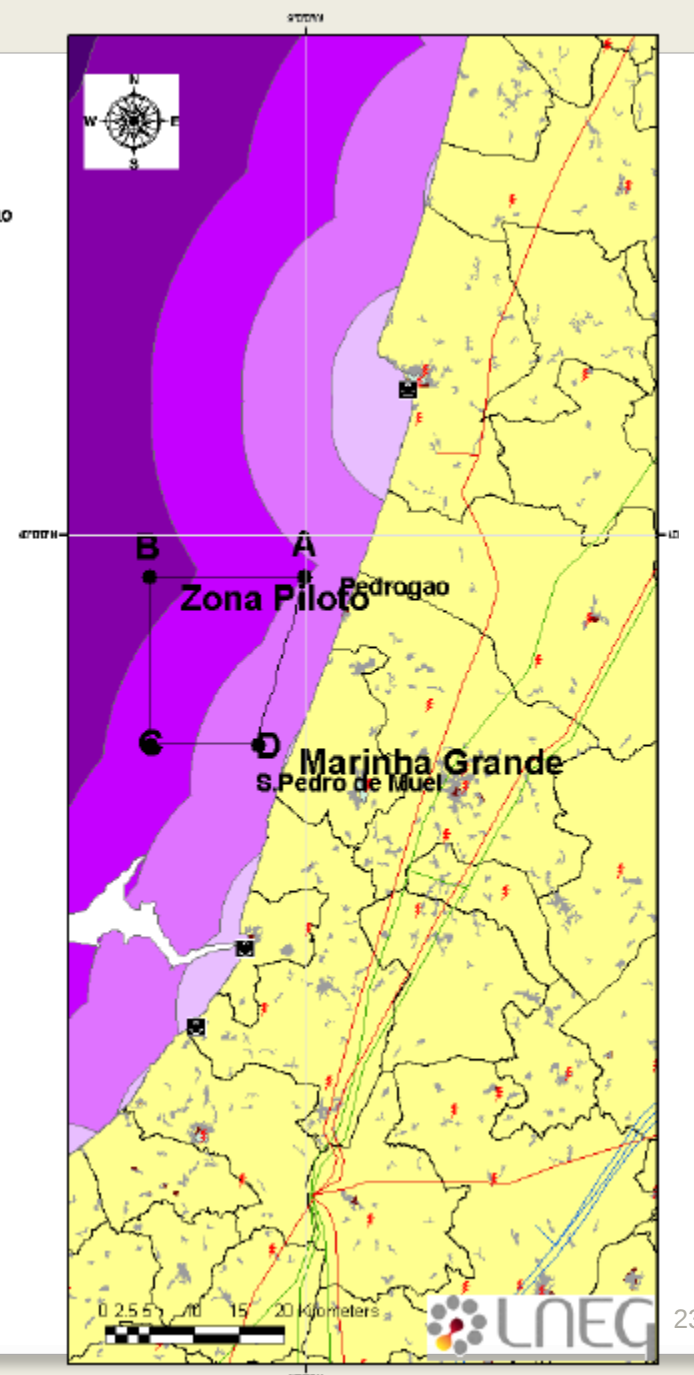
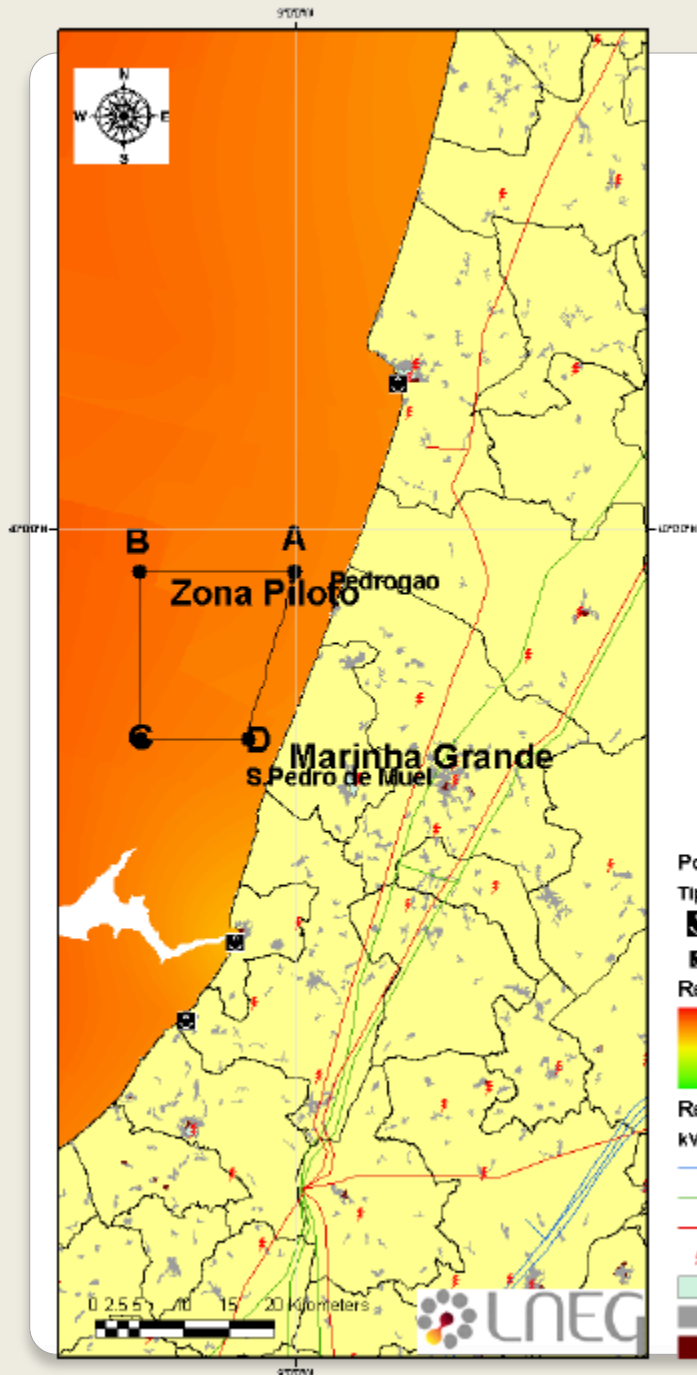
Pelamis: $6\text{ kW/m} : 300\text{ W/pessoa}$

“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





Energia das ondas em Portugal

Projetos atuais:

HiWave5 – Aguçadoura (1MW) – 2023

Absorção pontual (300 kW/dispositivo)

<https://www.corpowerocean.com>

Barra do Douro (1 MW) – data?

Atenuador (12.5 kW/dispositivo)

<https://www.ecowavepower.com/>

Waveroller – Peniche (300 kW) - 2020

Projetado: Swell – Peniche (5.6 MW) – data?

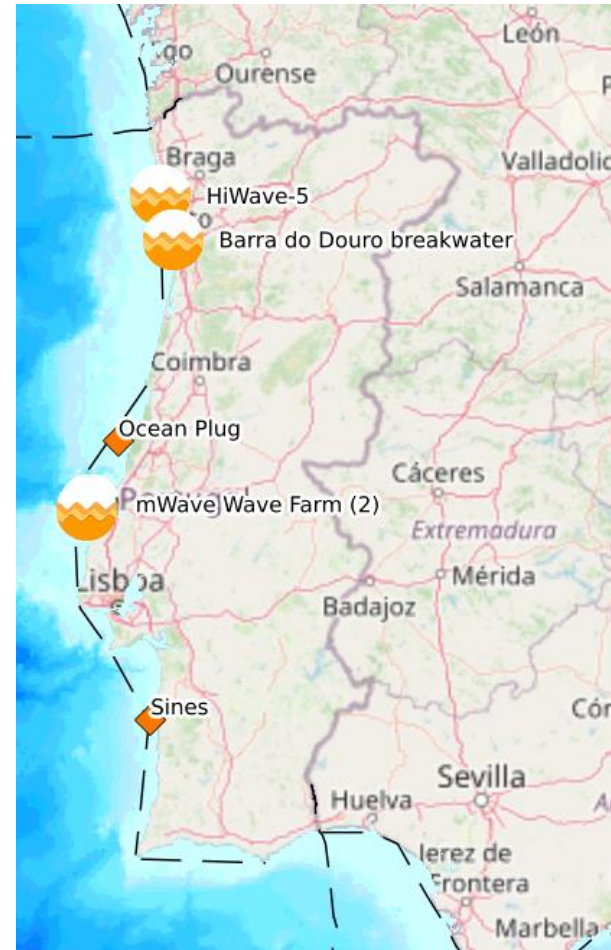
Galgamento (100 kW/dispositivo)

<http://aw-energy.com/>

mWave – Peniche (64 MW) – data?

Diferencial pressão (1.5 MW/dispositivo)

<http://www.bomborawave.com/projects>



HiWave5 – Aguçadoura (1MW) – 2023 | Absorção pontual (300 kW/dispositivo)

EXCLUSIVOS SEMANÁRIO

Expresso50

ÚLTIMAS

OPINIÃO

ECONOMIA

PODCASTS

TRIBUNA

BLITZ

JOGOS

EXPRESSO 50 ANOS

CLUBE EXPRESSO

ECONOMIA

Corpower instala âncora para a sua primeira unidade de energia das ondas em Portugal

A sueca Corpower já lançou ao mar, a 4 quilómetros da costa portuguesa, a âncora para a primeira unidade do projeto HiWave 5, que vai testar o aproveitamento de energia das ondas



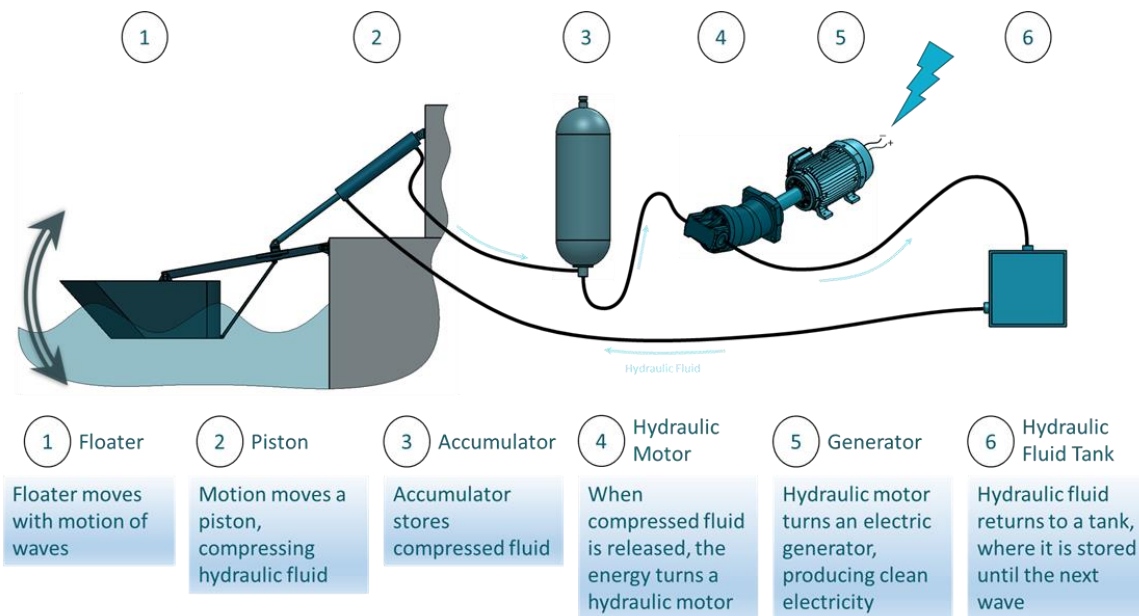


Barra do rio Douro terá flutuadores para produção de energia a partir das ondas

Projeto-piloto de 10 anos será desenvolvido pela empresa EW Portugal a partir do molhe norte da barra do Douro, concelho do Porto.

Dinheiro
Vivo/Lusa

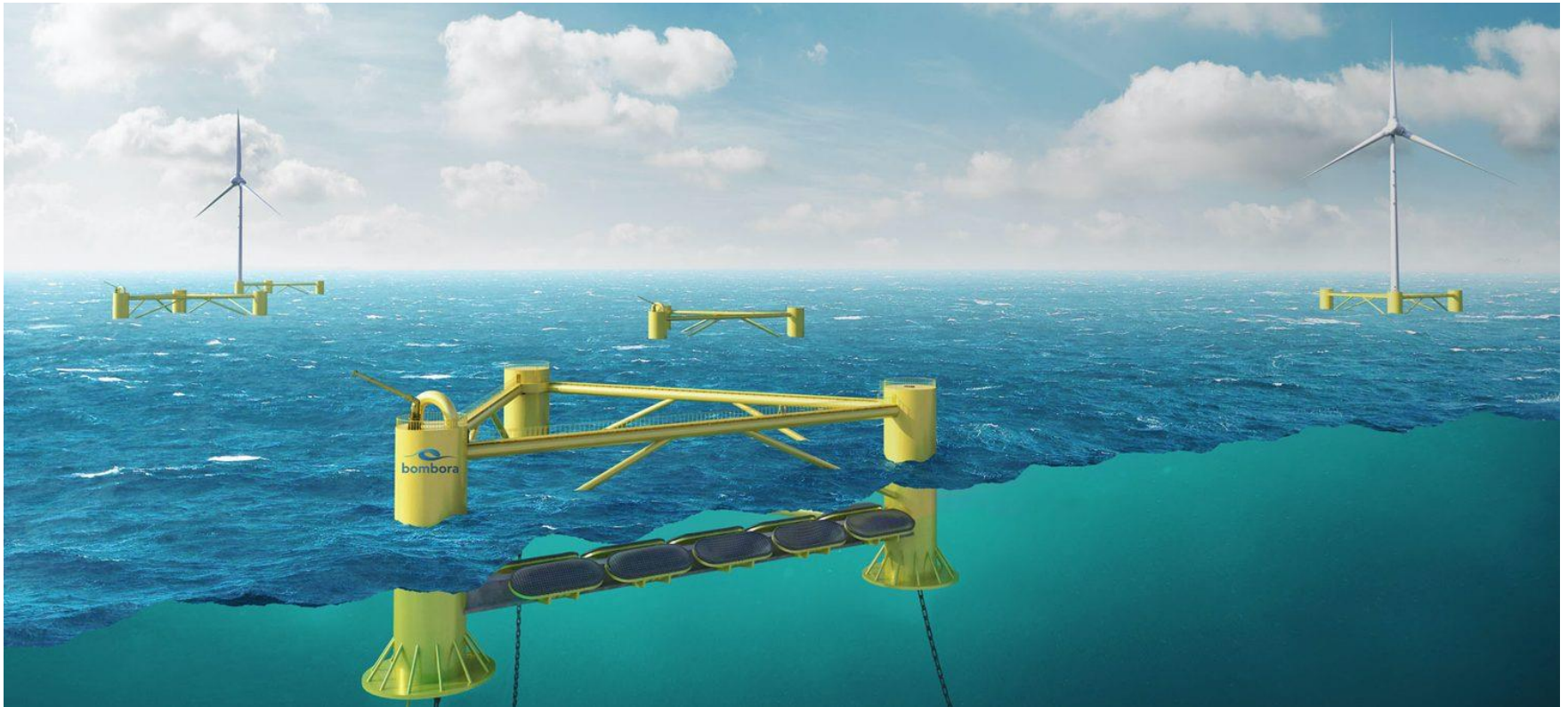
14 Fevereiro, 2022 • 11:56



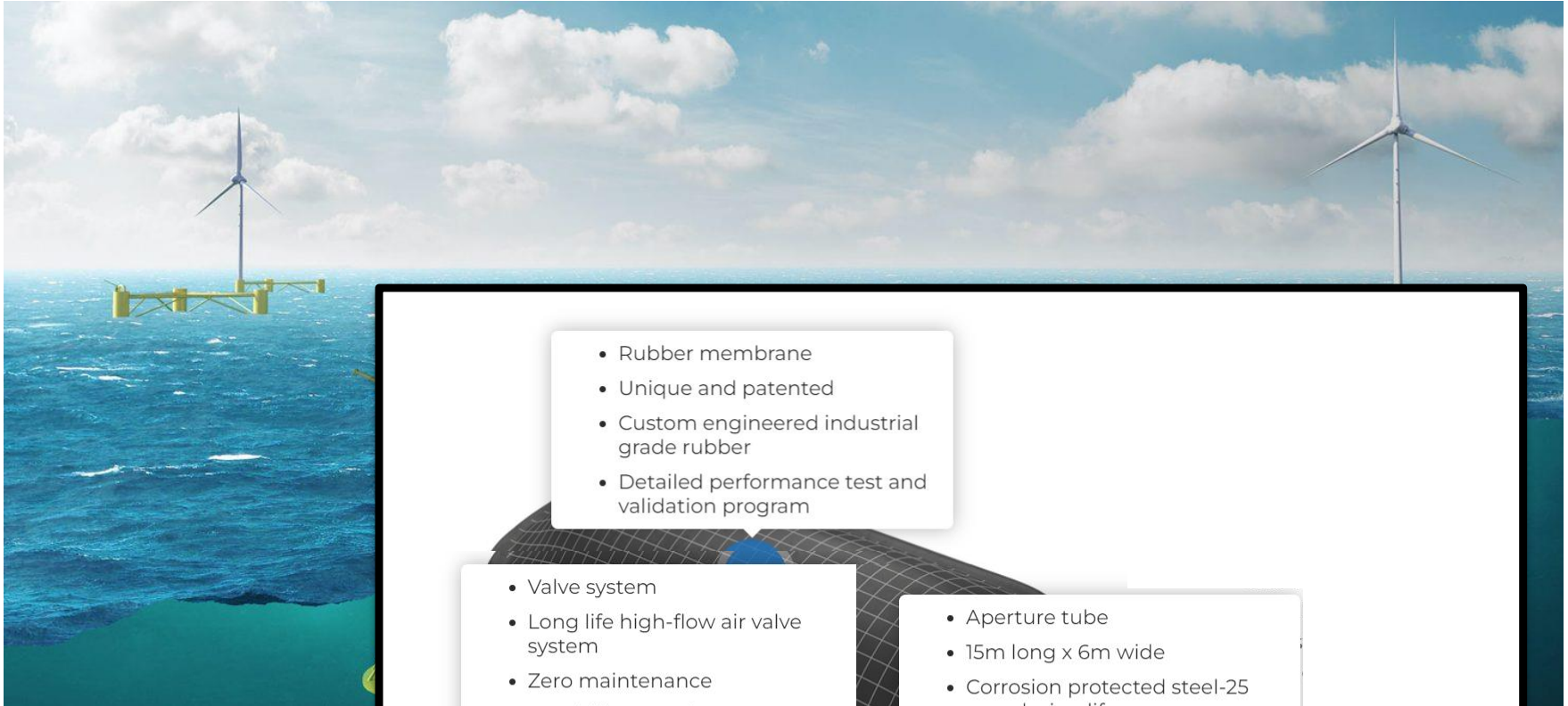
Waveroller – Peniche (300 kW) - 2020



mWave – Peniche (64 MW) | Diferencial pressão (1.5 MW/dispositivo)



mWave – Peniche (64 MW) | Diferencial pressão (1.5 MW/dispositivo)



- Rubber membrane
- Unique and patented
- Custom engineered industrial grade rubber
- Detailed performance test and validation program

- Valve system
- Long life high-flow air valve system
- Zero maintenance
- Durability tested

- Aperture tube
- 15m long x 6m wide
- Corrosion protected steel-25 year design life

Energia das ondas em Portugal

Dispositivos descontinuados



Pelamis
2,25 MW
2008-2008



AWS
2 MW
2004-2004



SURGE - WaveRoller
0,3 MW
2012-2014

Central de Ondas do Pico
(Arquipélago dos Açores)
0,4 MW
1999-2018

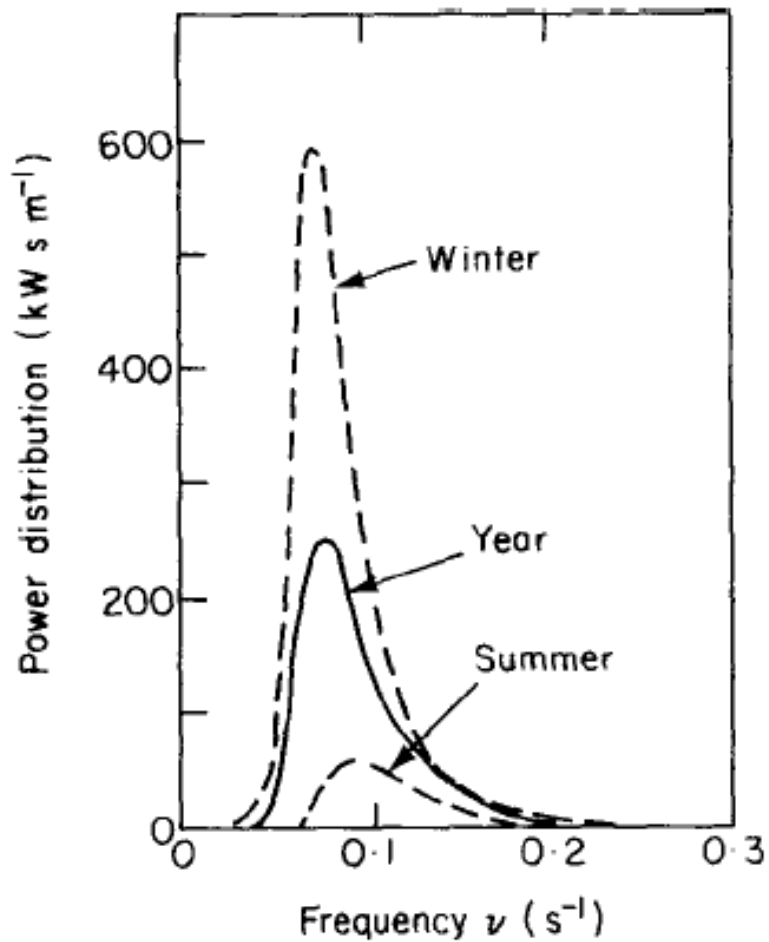


Evopod1
0,1 MW
2017-2019



ENERGIA DAS ONDAS

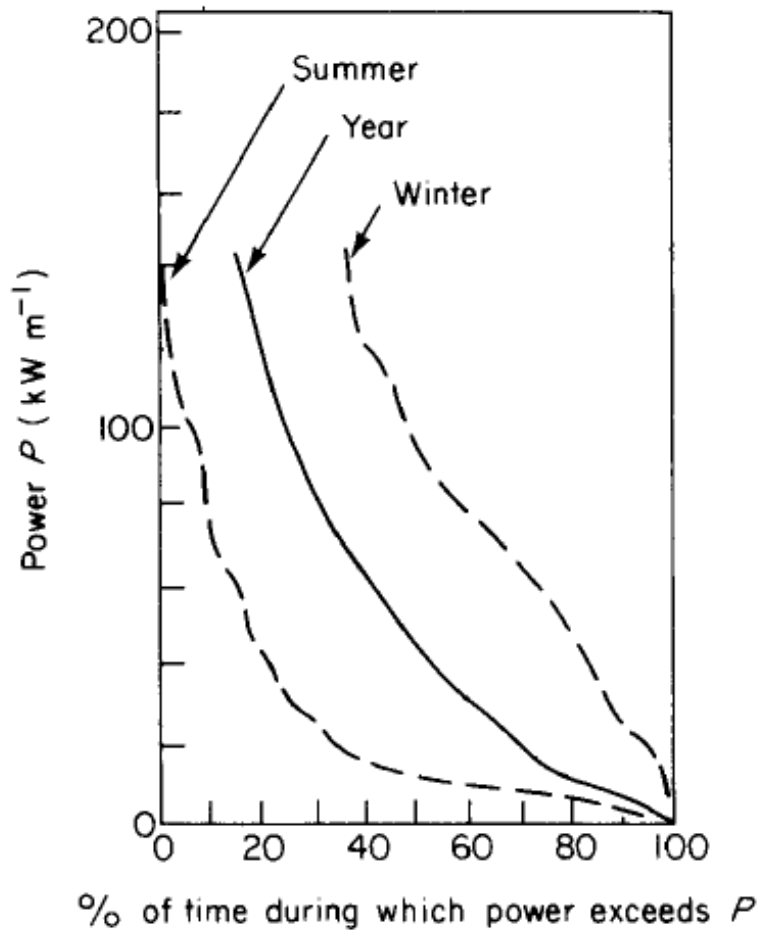
Variabilidade sazonal



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

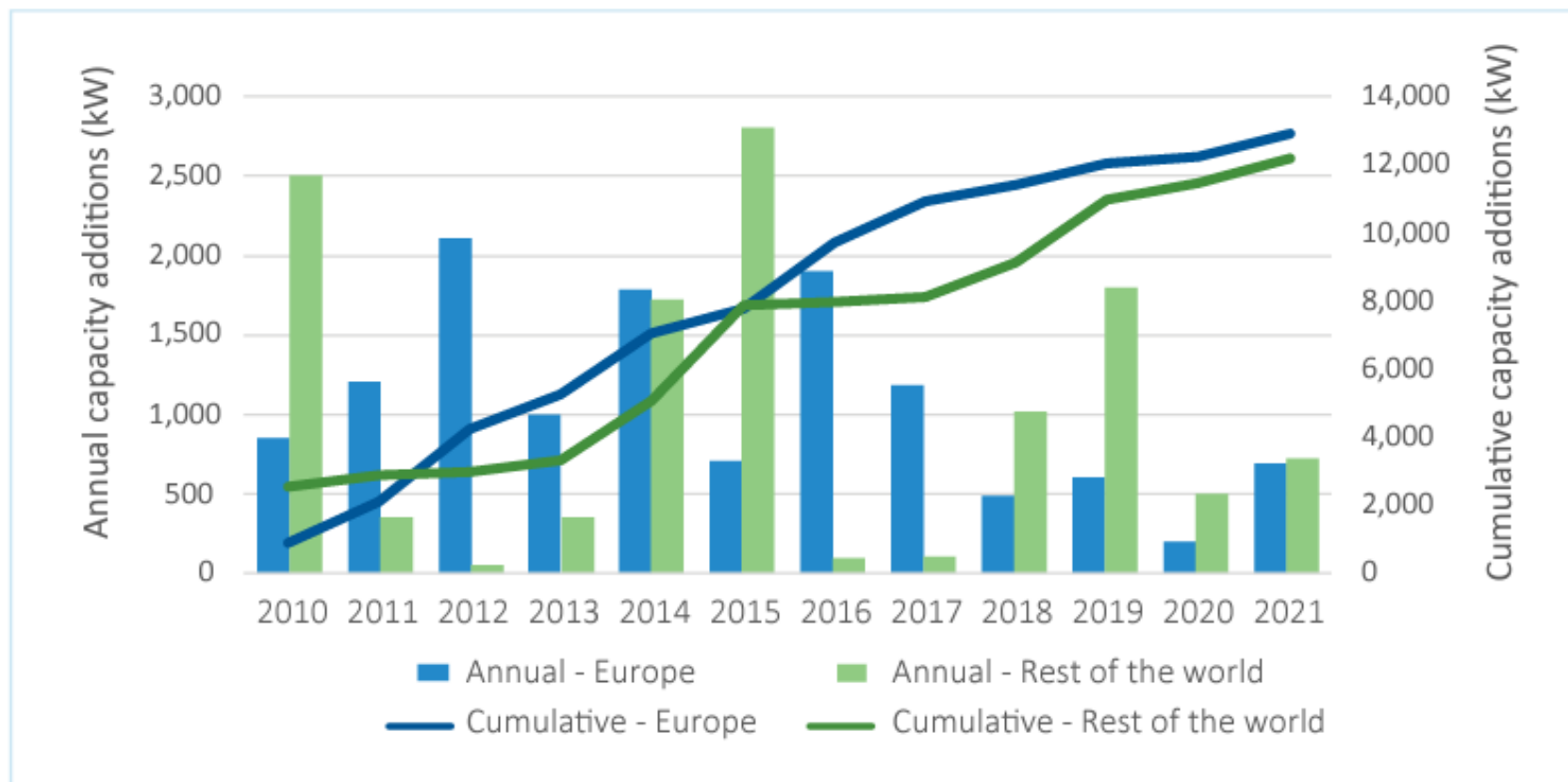


Figure 10: Installed global wave energy capacity

Source: Ocean Energy Europe

ENERGIA DAS ONDAS

Recurso potencial **abundante**, com sazonalidade mas variabilidade inter-diária pouco significativa e previsível.

Mas...

Complexidade da tecnologia (dezenas de anos de desenvolvimento e nenhuma solução é reconhecida como capaz)

Custos de instalação (e.g. conversores, amarras, ligação elétrica submarina, etc.) e manutenção são muito elevados

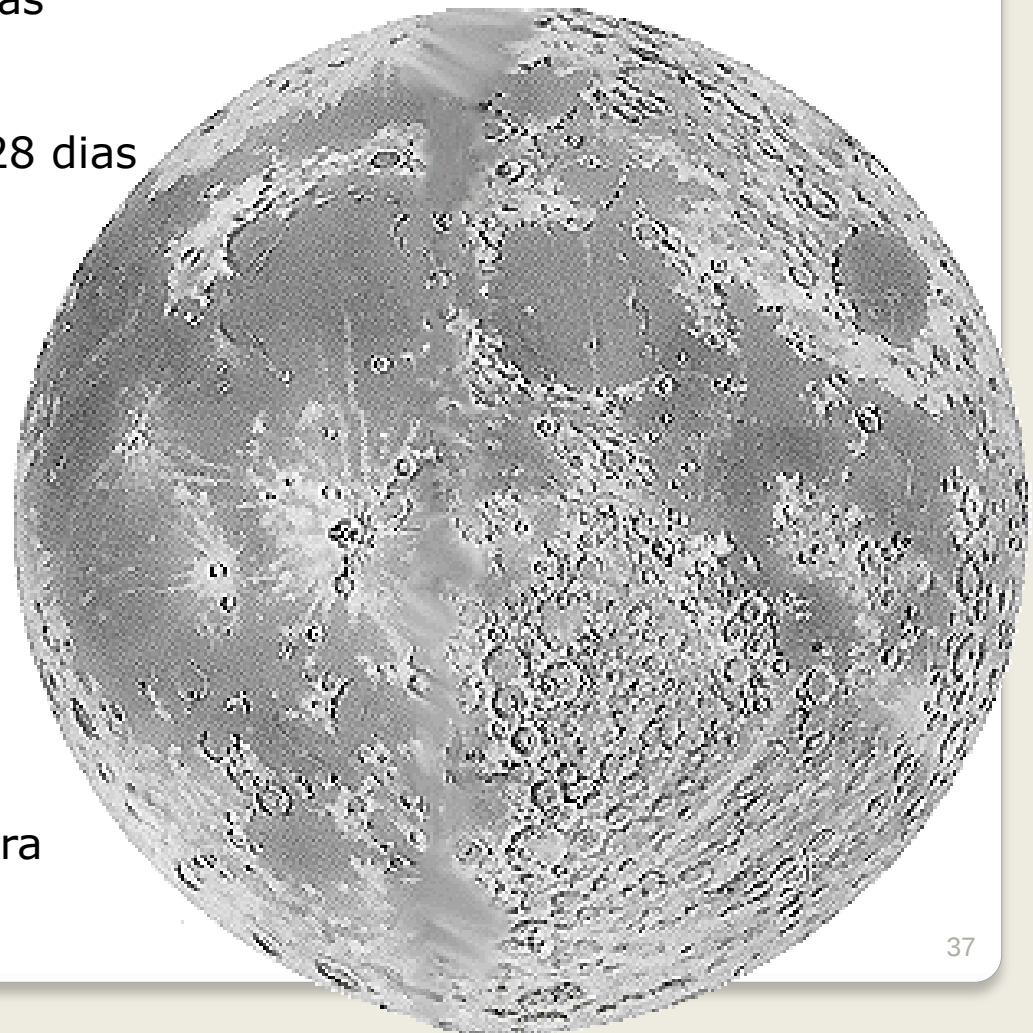
ENERGIA DAS MARÉS

An aerial photograph of the Mont Saint-Michel area in France. The iconic Mont Saint-Michel, a rocky island topped with a large Gothic abbey, is visible in the lower-left corner. A long, modern bridge, the Normandie Bridge, stretches across the English Channel from the island towards the right. The water is a greyish-blue, and the surrounding landscape is a mix of green fields and brownish soil, typical of a tidal flat area. The text 'ENERGIA DAS MARÉS' is overlaid in large, white, sans-serif capital letters across the center of the image.

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

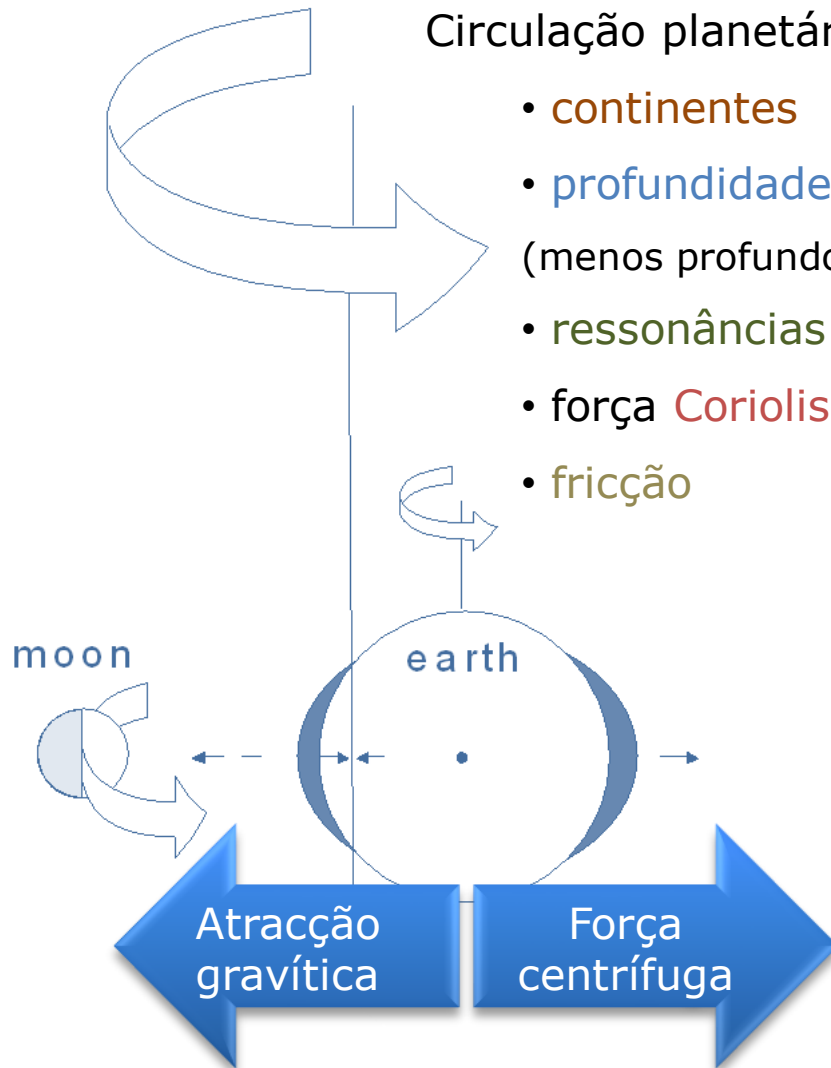


A face da Lua que *olha* para a Terra
é sempre a mesma!

ENERGIA DAS MARÉS

Circulação planetária da água constrangida por:

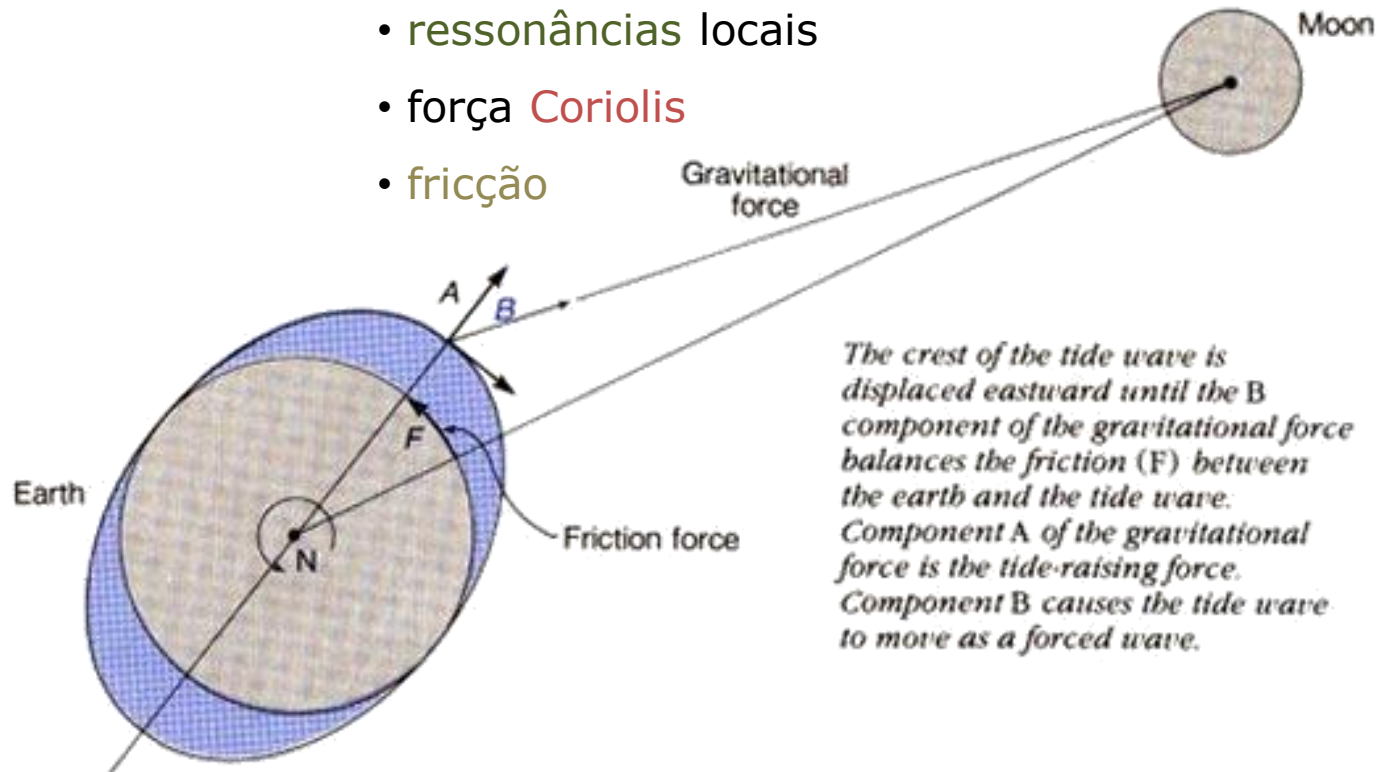
- continentes
- profundidade
(menos profundo → menor velocidade mas maior amplitude)
- ressonâncias locais
- força Coriolis
- fricção



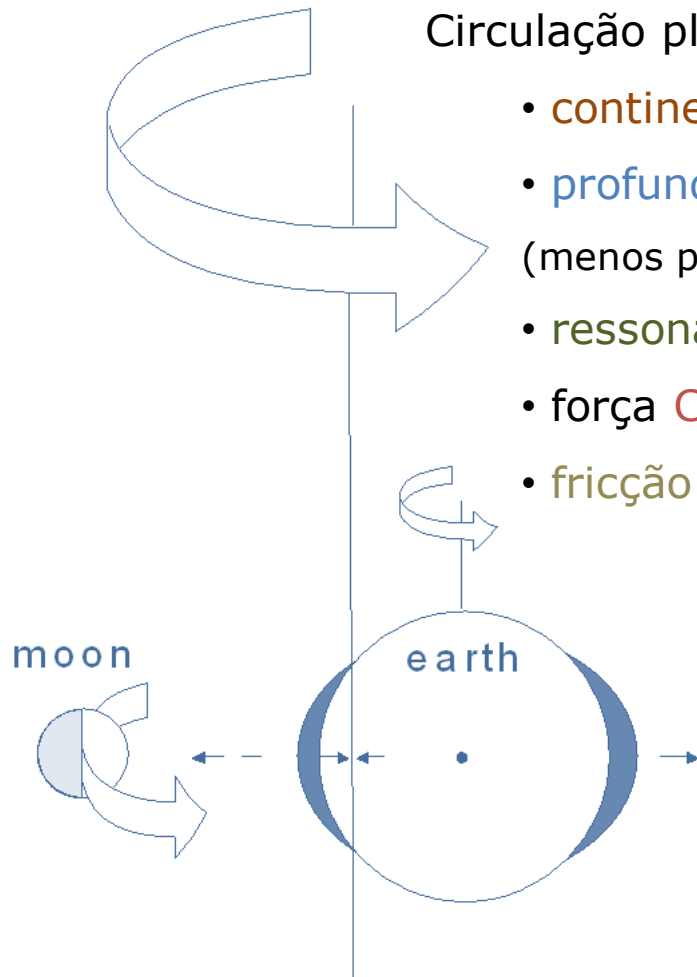
ENERGIA DAS MARÉS

Circulação planetária da água constrangida por:

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



ENERGIA DAS MARÉS



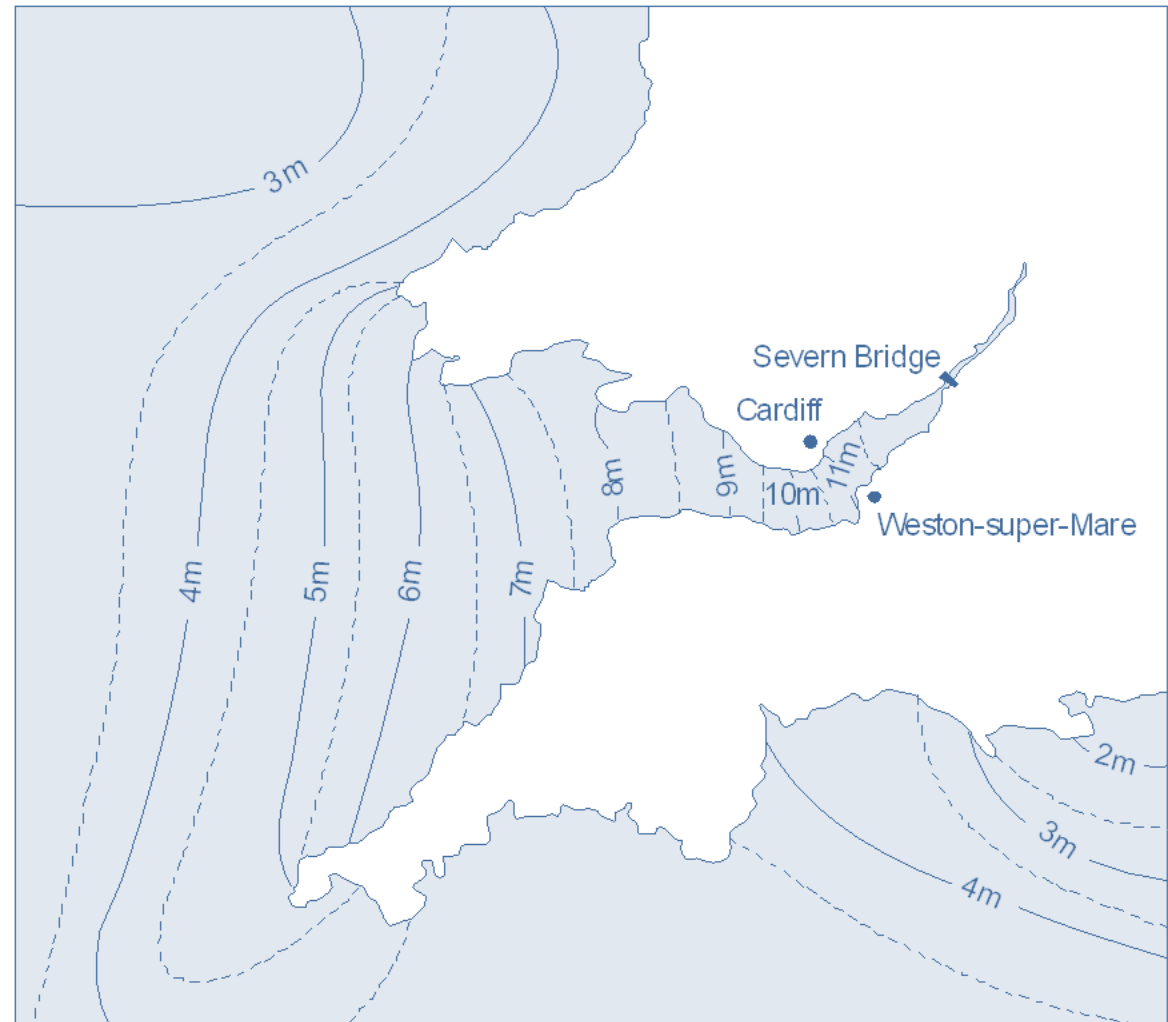
Circulação planetária da água constrangida por:

- 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.)

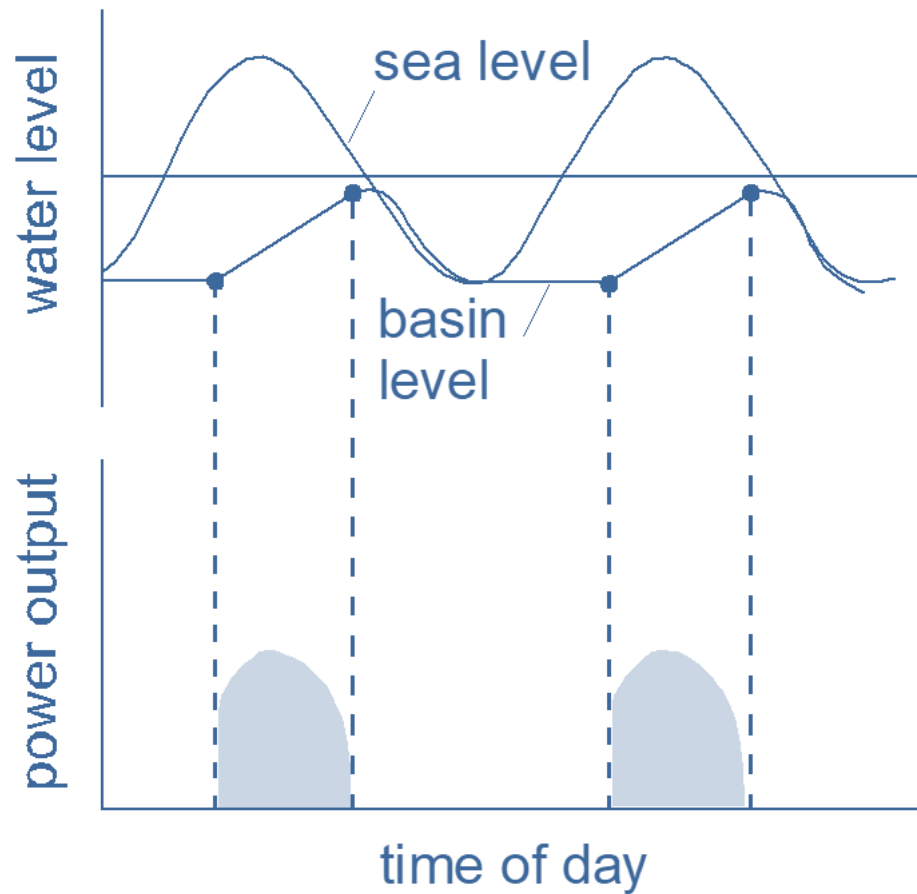
ENERGIA DAS MARÉS



Estuário de Svern, UK

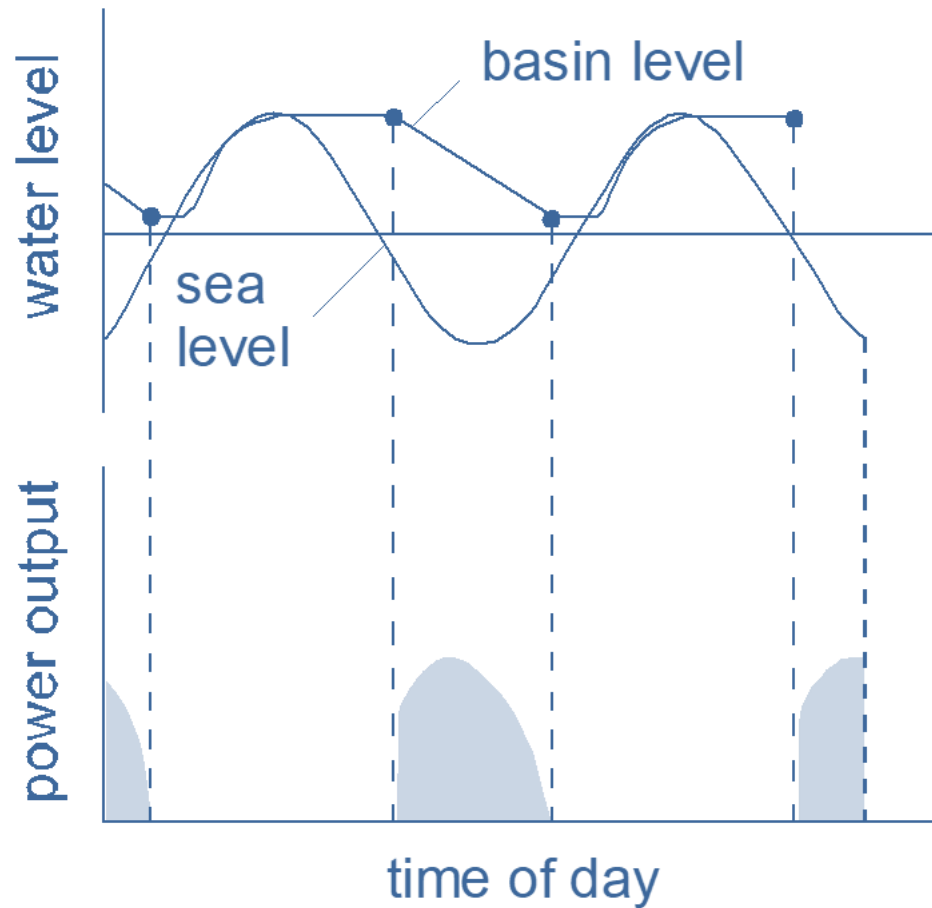
ENERGIA DAS MARÉS

Aproveitando a subida da maré



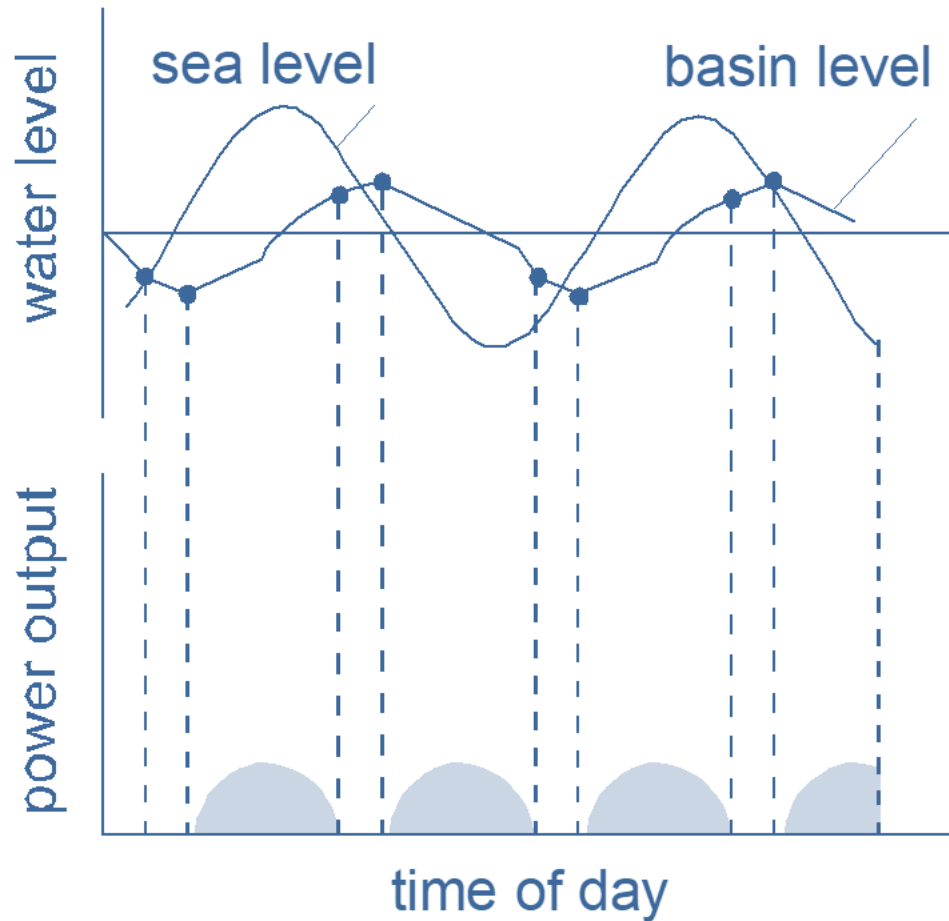
ENERGIA DAS MARÉS

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:

$$m = 2h\rho$$

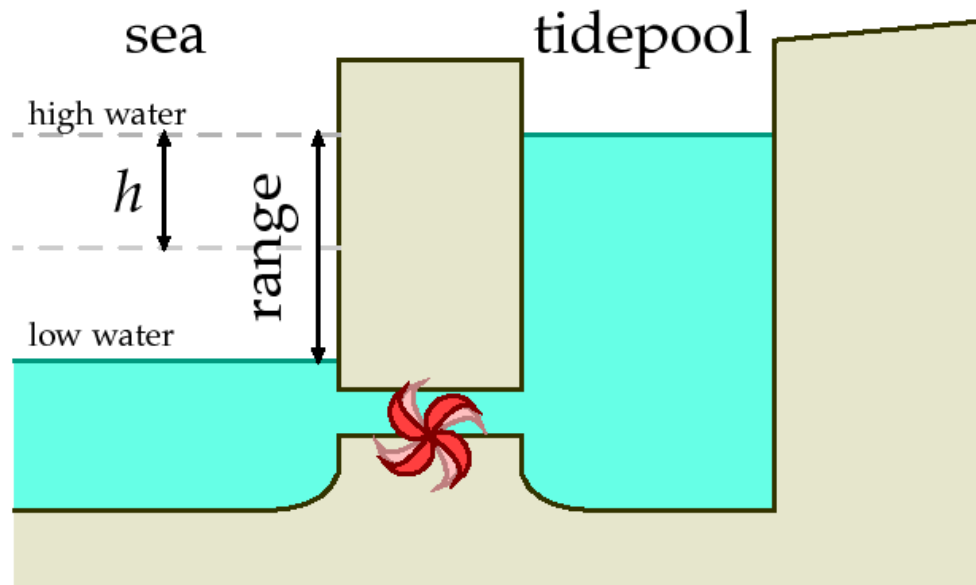
Potência disponível:

$$P = \frac{(2h\rho)gh}{T}$$

6 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

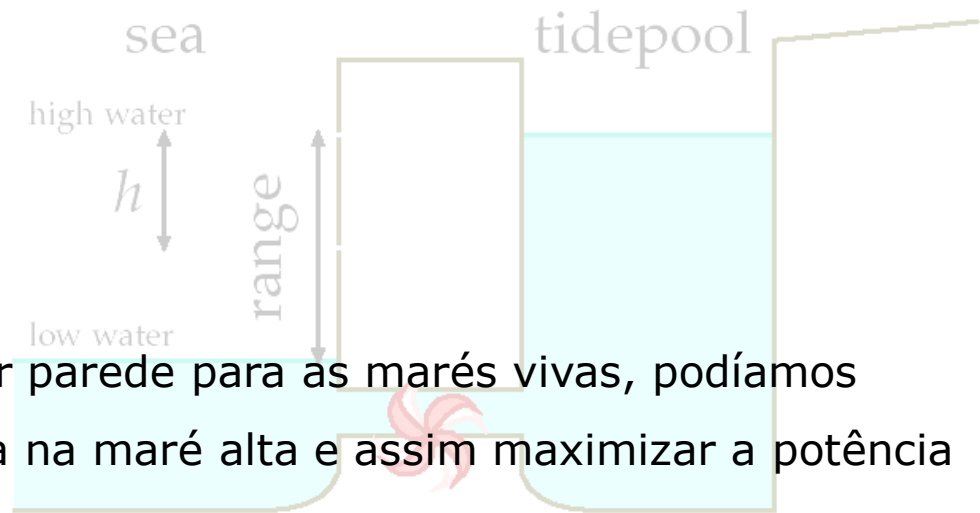
ENERGIA DAS MARÉS

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?

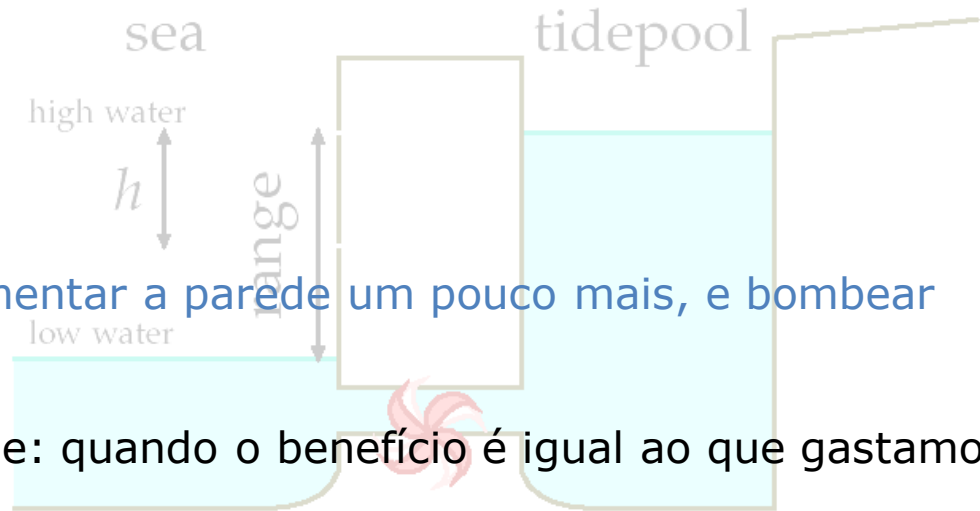


ENERGIA DAS MARÉS

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

custo marginal da bombagem

$$\begin{aligned}\varepsilon_g &= 0.90 && \text{geração} \\ \varepsilon_p &= 0.85 && \text{bombagem} \\ \varepsilon_g \times \varepsilon_p &\approx 0.75 && \text{global}\end{aligned}$$

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

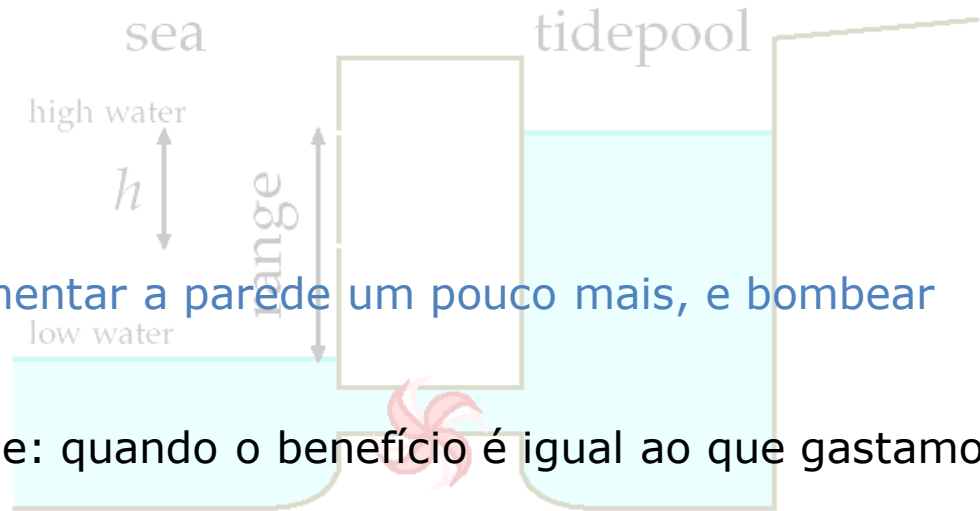
Se $h=2\text{m}$, parede tem $2h=4\text{m}$ então $b=13\text{m}$ (4x mais alto)

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

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

Com bombagem

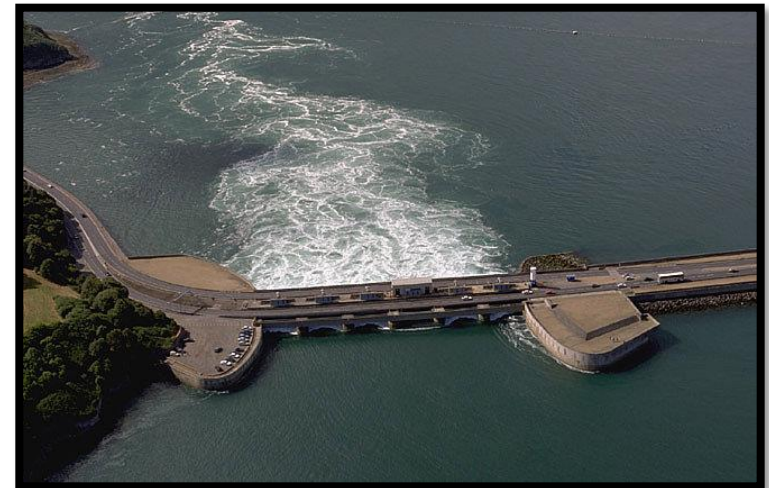
$$E = \frac{1}{2} \varepsilon_g g\rho (b+2h)^2 - \frac{1}{2} g\rho \frac{1}{\varepsilon_p} b^2 = \varepsilon_g 2g\rho h^2 \left(\frac{1}{1-\varepsilon} \right)$$
$$= \frac{1}{1-\varepsilon} E_t$$

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

Parede 4x mais alta, 4x mais energia, mas custos aumentam com h^2 e portanto não é viável; seria melhor alargar a barragem horizontalmente!

ENERGIA DAS MARÉS

Station Name	La Rance[7]	Kislaya Guba[9]	Jiangxia[10]	Annapolis[11]	Sihwa[8]
Country	France	Russia	China	Canada	South Korea
Capacity(MW)	240	1.7	3.9	20	254
Ann. Output(GWh)	540		6.5	30	553
Year	1966	1968	1980	1984	2015
Turbine Number	24	1	6	1	10
Turbine Type	Bulb	Savonius	Bulb	Rim	Bulb
Basin Area(km ²)	22	1.1	1.4	15	56
Mean Tide/m	8.5	2.3	5.1	6.4	5.6



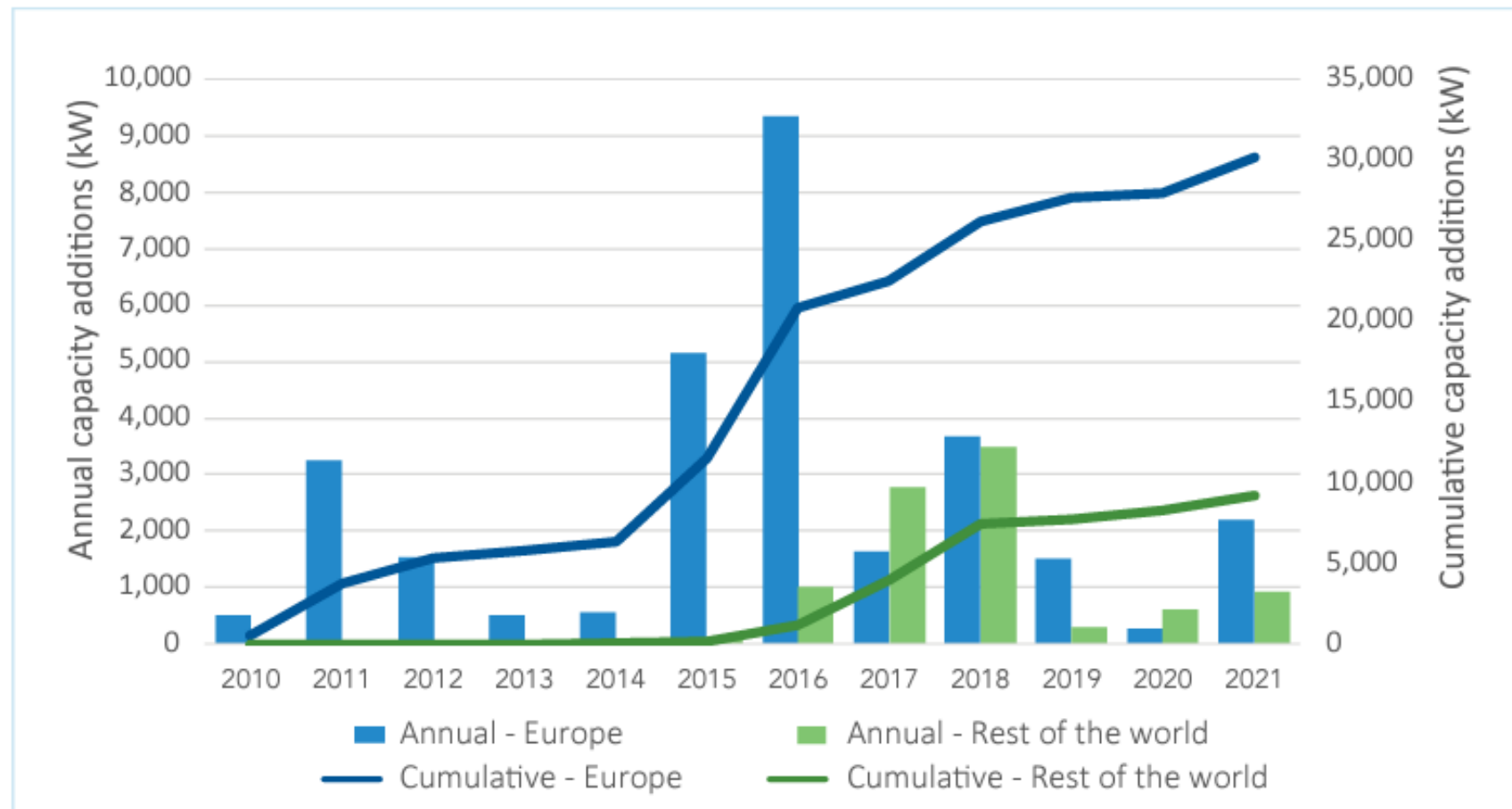
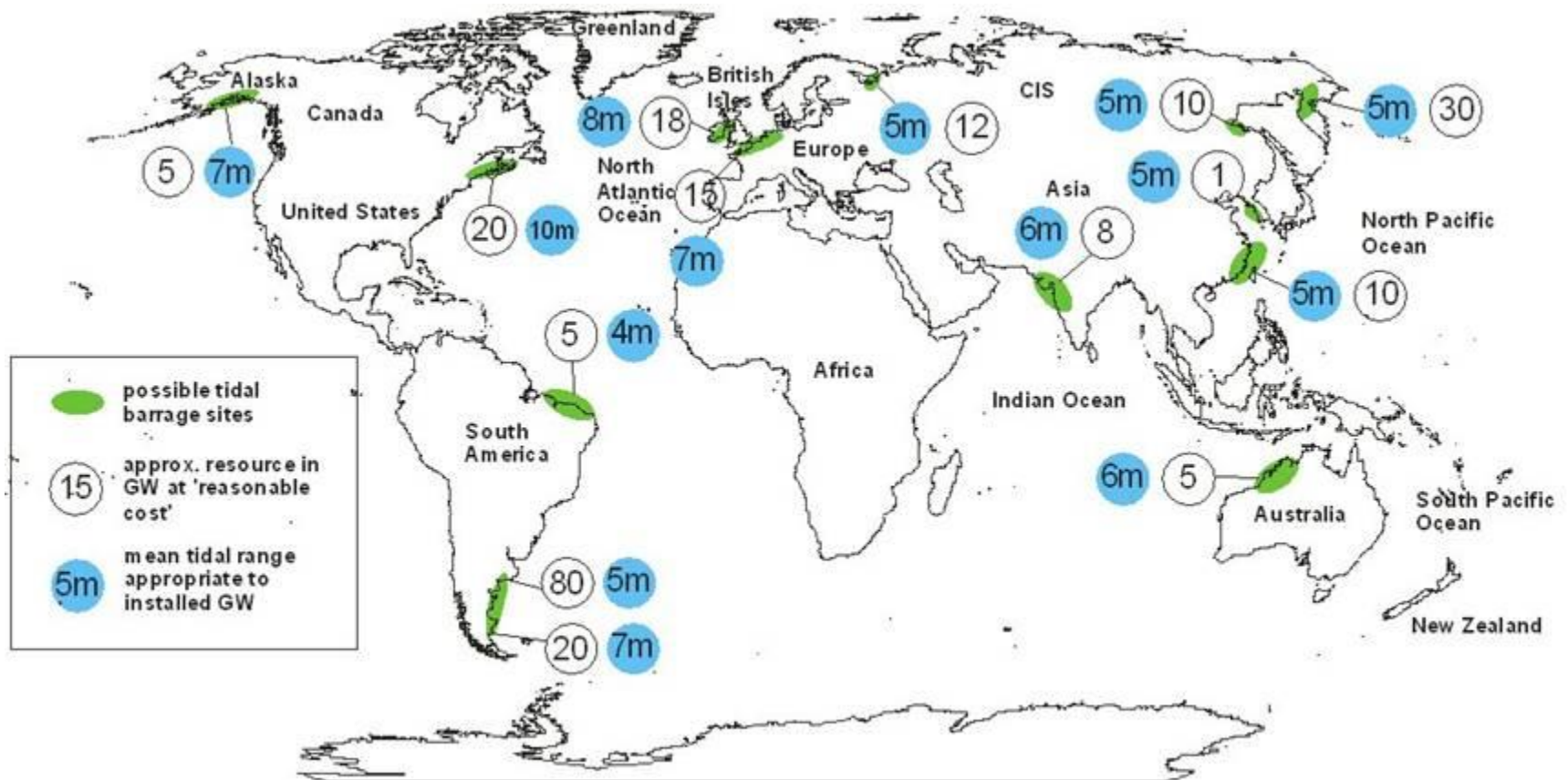


Figure 8: Installed global tidal stream energy capacity

Source: Ocean Energy Europe

ENERGIA DAS MARÉS

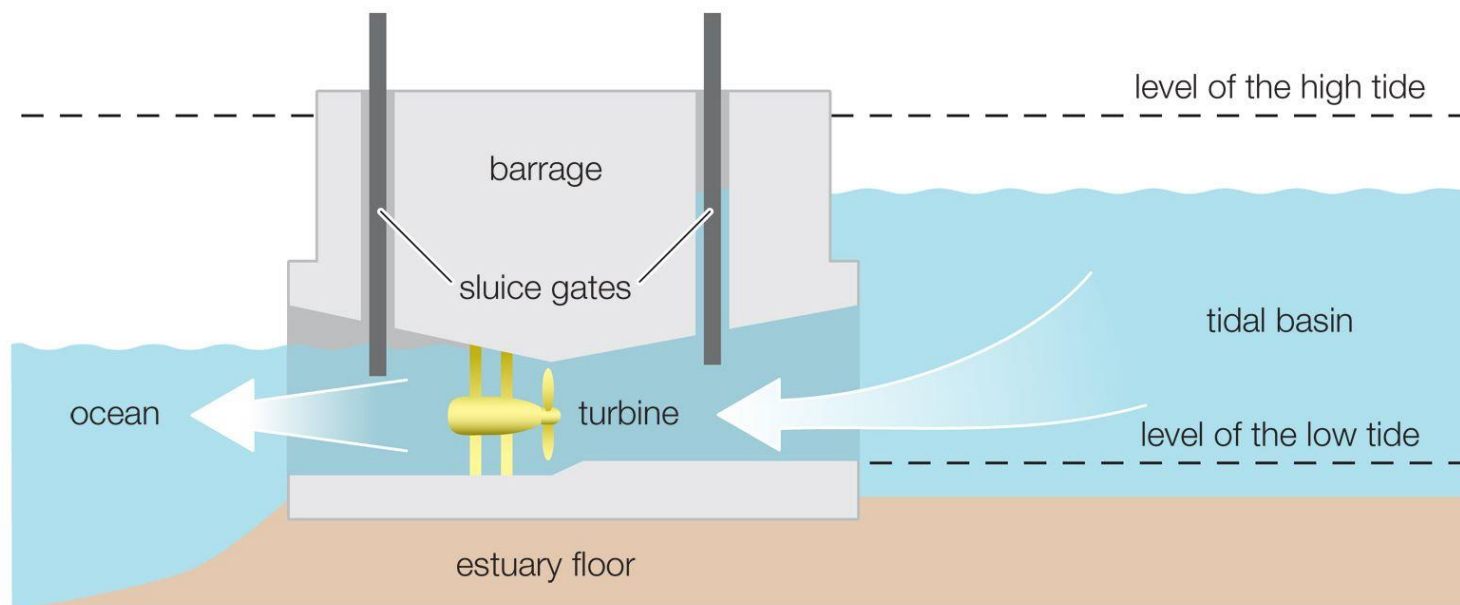
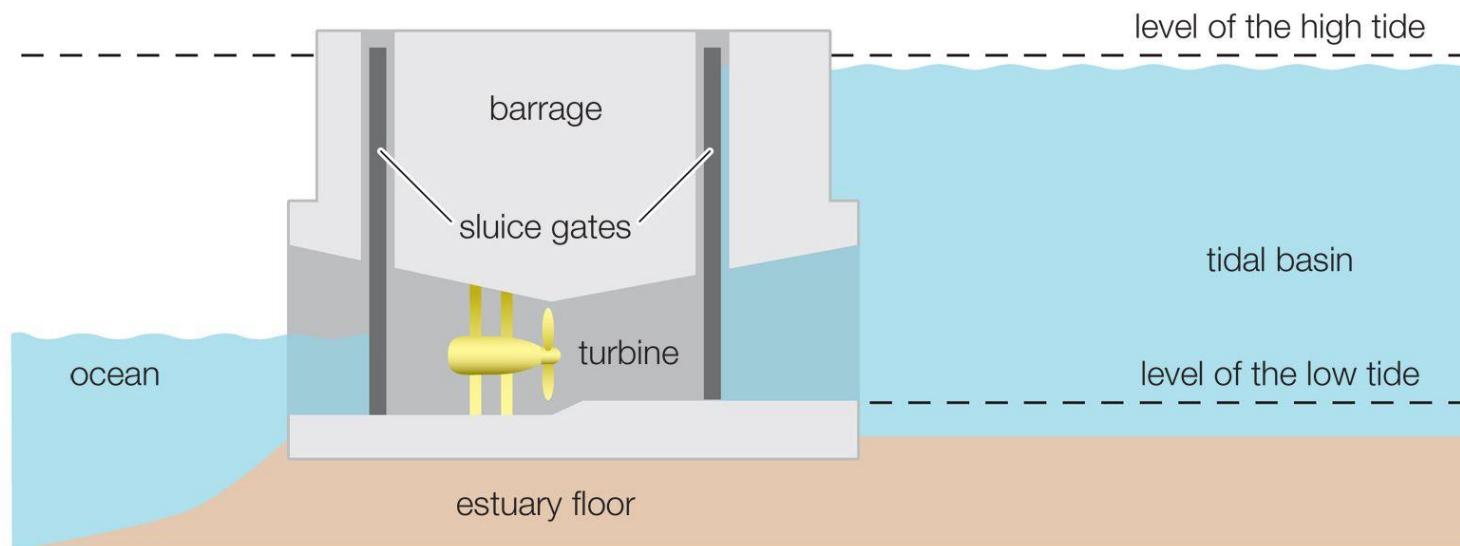
Amplitude maré (m) e potencial energético (GW)



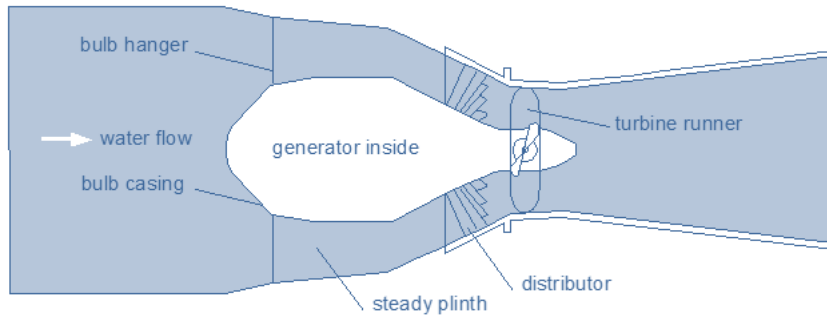
ENERGIA DAS MARÉS

Impactos ambientais

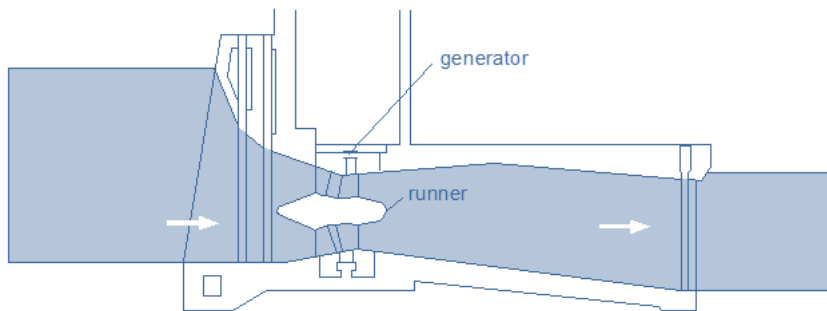
- redução **variação do nível de água** pode afectar mobilidade espécies marinhas, com potencial impacto nas **populações de aves aquáticas** e/ou migratórias
- redução da **salinidade** no reservatório estuário
- menor transporte de **sedimentos** pode provocar águas mais cristalinas, e portanto maior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



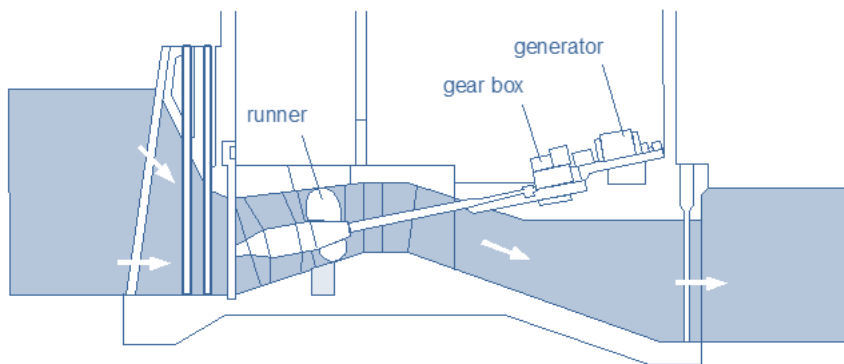
ENERGIA DAS MARÉS



Turbina de maré 'Bulb'



Turbina de maré 'Stratflow'

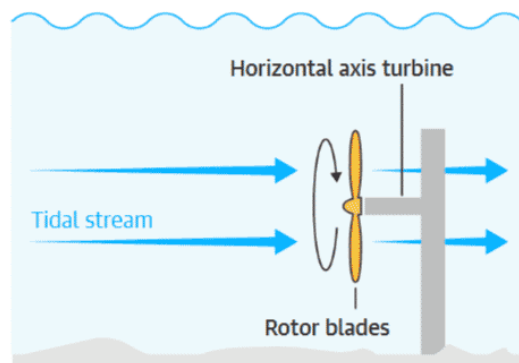


Turbina de maré 'tubular'

How tidal power generators capture energy from the natural ebb and flow of the oceans

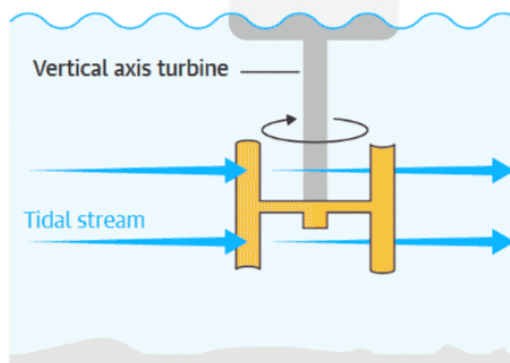
Tidal stream: horizontal axis device

Similar to a wind turbine. The tidal stream turns rotor blades to generate power



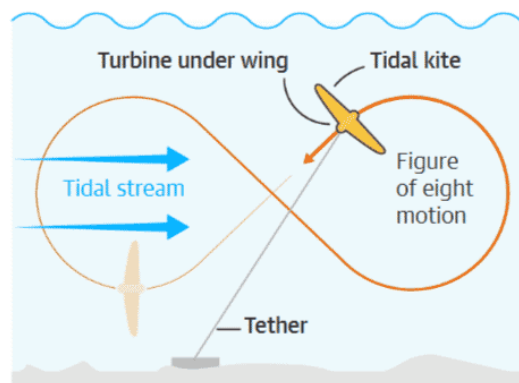
Tidal stream: vertical axis turbine

Uses two scoop-shaped blades rotating on a vertical axis to harness energy



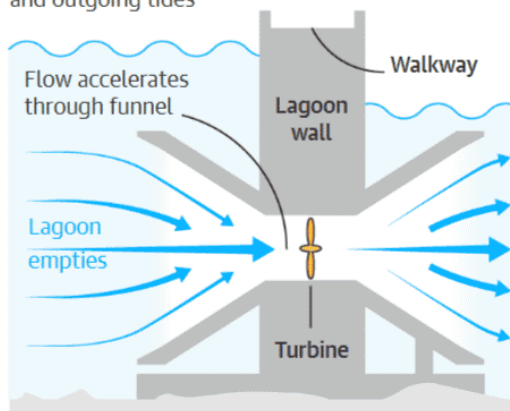
Tidal kite

Kite 'flies' at speed in the tidal stream forcing water through a turbine fixed under its wing



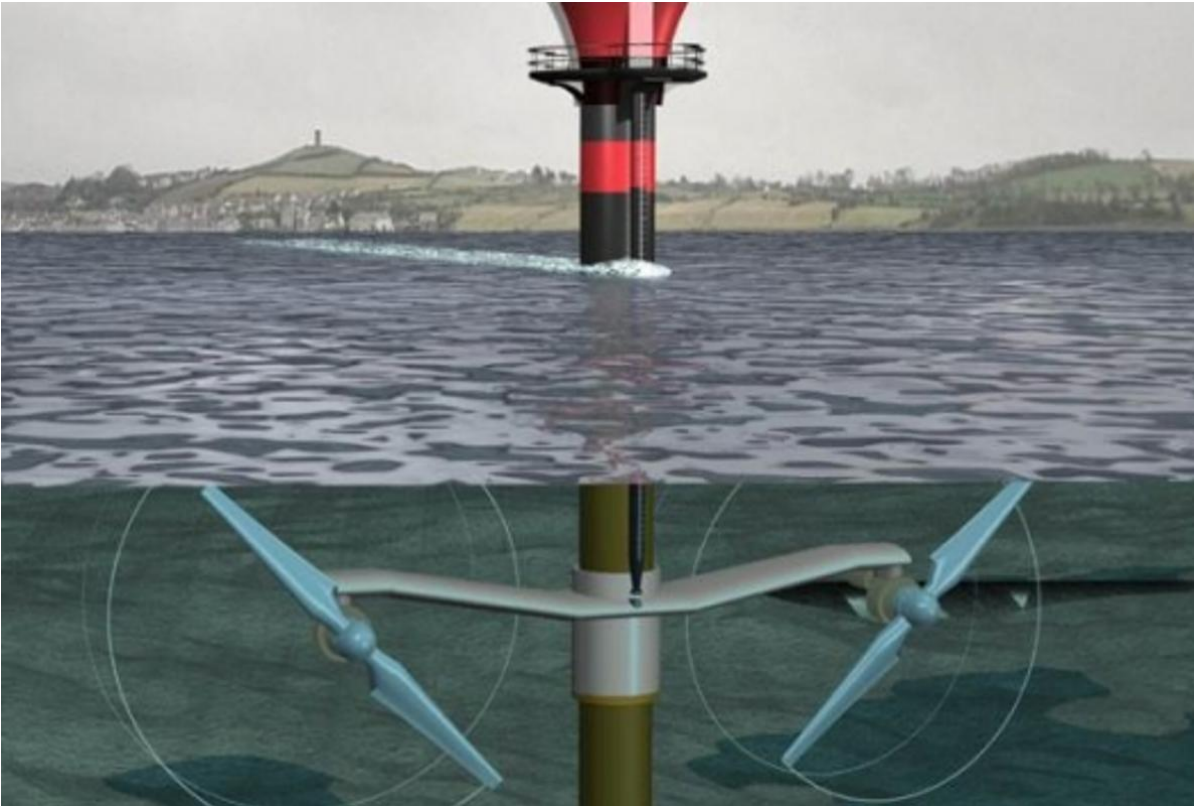
Tidal lagoons and barrage turbines

Installed in a sea-wall or tidal barrage, these can be reversible to generate power from incoming and outgoing tides



ENERGIA DAS ONDAS

Correntes oceânicas ou de maré



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

Turbina Ø10-15m
pode produzir
200-700kW

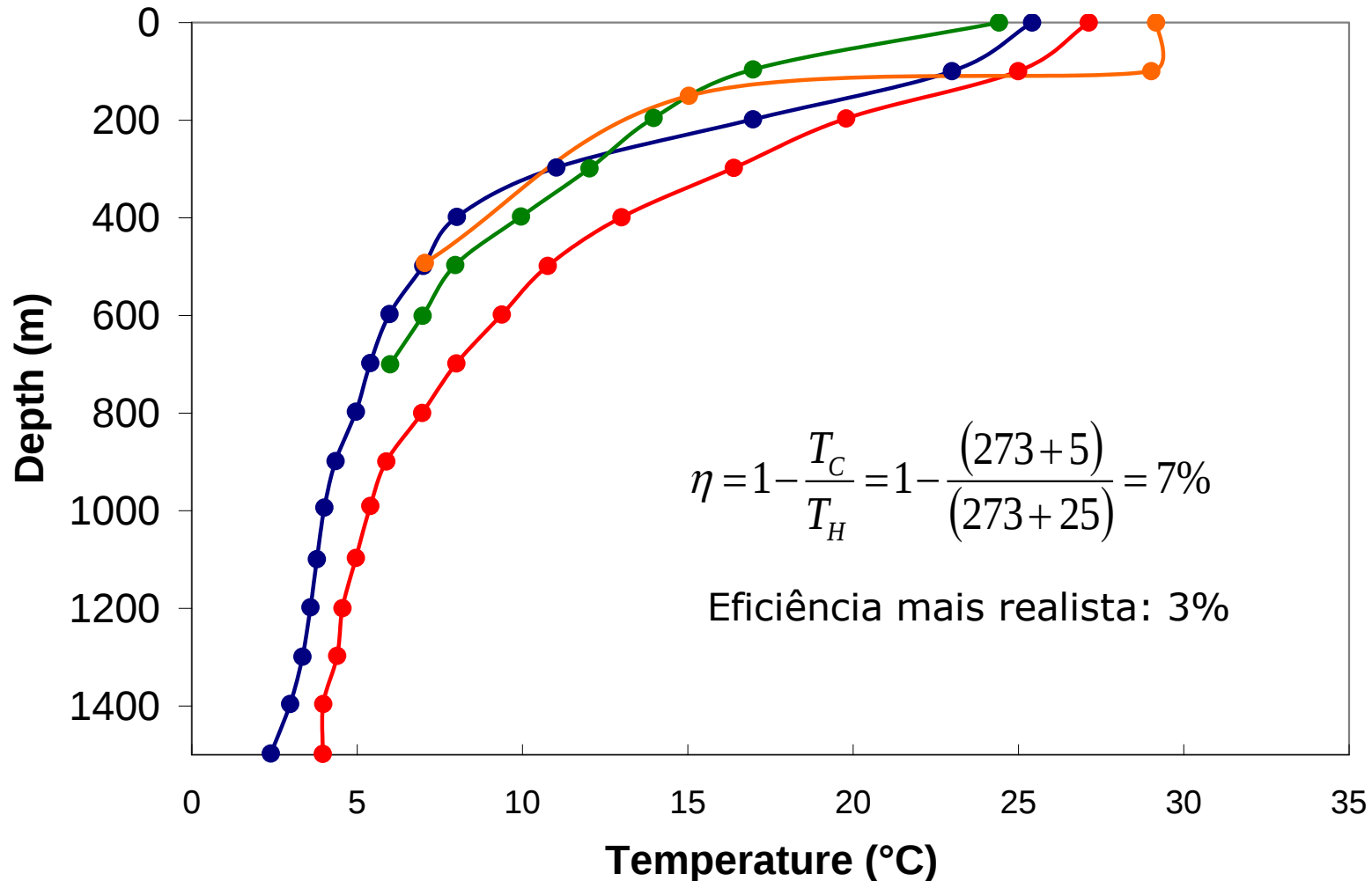


Seagen – 1.2 MW (2008-2019)



GRADIENTE TÉRMICO

OTEC – Ocean thermal energy conversion



GRADIENTE TÉRMICO

OTEC – Ocean thermal energy conversion

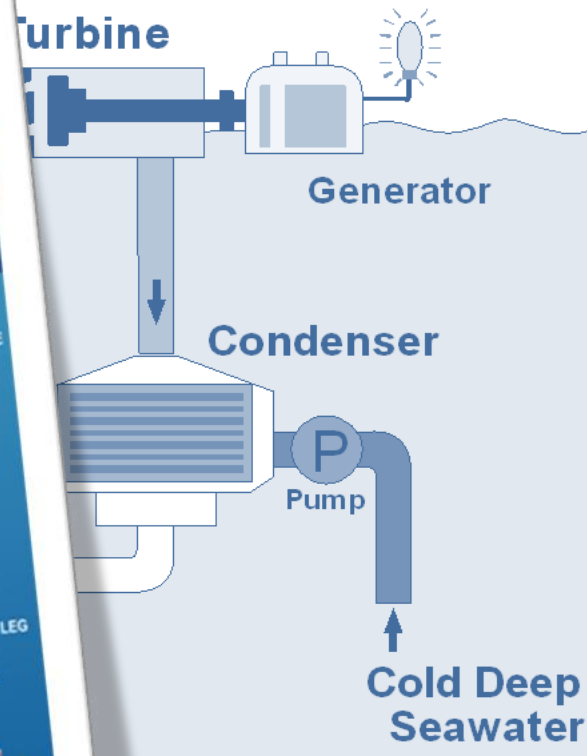
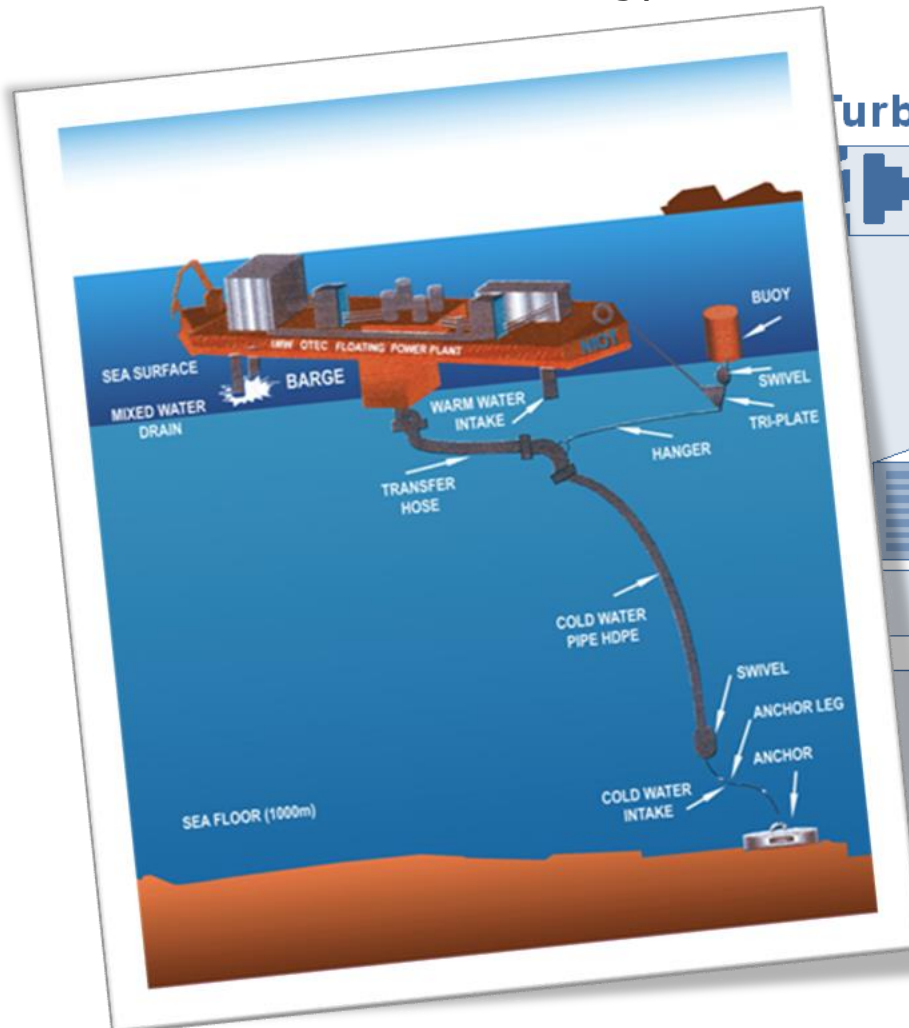


Para aumentar a eficiência precisamos de
aumentar a diferença de temperatura, e.g.

- 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

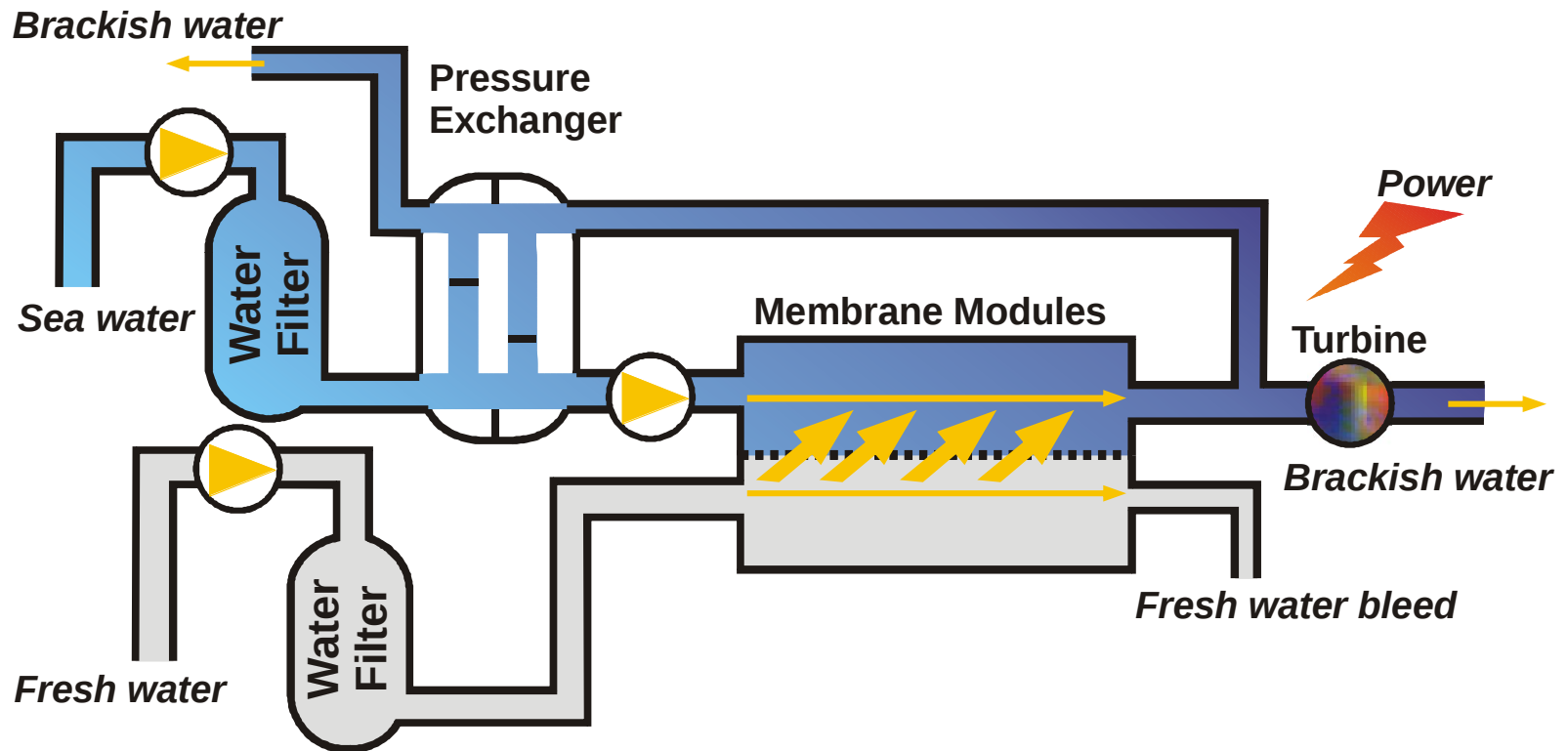
Bombagem de água profunda (mais rica em nutrientes) para a superfície

- 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.