Sistemas Energéticos

3º ano 6º semestre

Aula 27

Aula 27: Energia das Ondas

Tópicos

1. Introdução
2. Formação e propagação das ondas
3. Física das ondas
4. Energia transportada pelas ondas
5. Tecnologias de conversão
6. Parques offshore
7. Desafios de engenharia
8. Aplicações em Moçambique

27.1 – Introdução

Porque é que o mar nunca pára?

- O Sol aquece a Terra;
- o aquecimento gera vento;
- o vento transfere energia para a superfície do mar;
- as ondas transportam essa energia ao longo de milhares de quilómetros.

Definição:

- **converter o movimento oscilatório das ondas em electricidade; é, indirectamente, energia solar.**

27.1 – Introdução



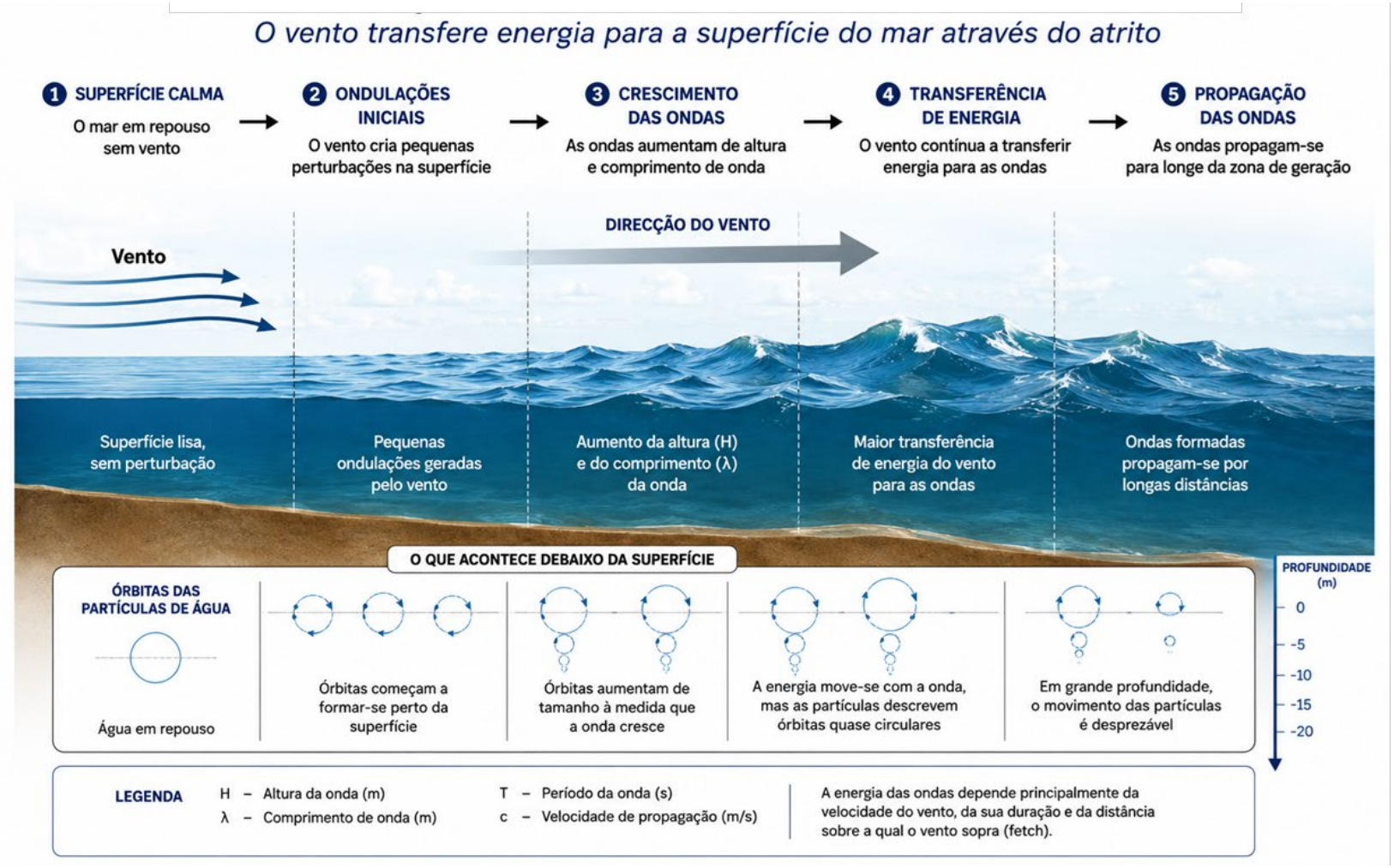
27.1 – Energia das ondas do mar



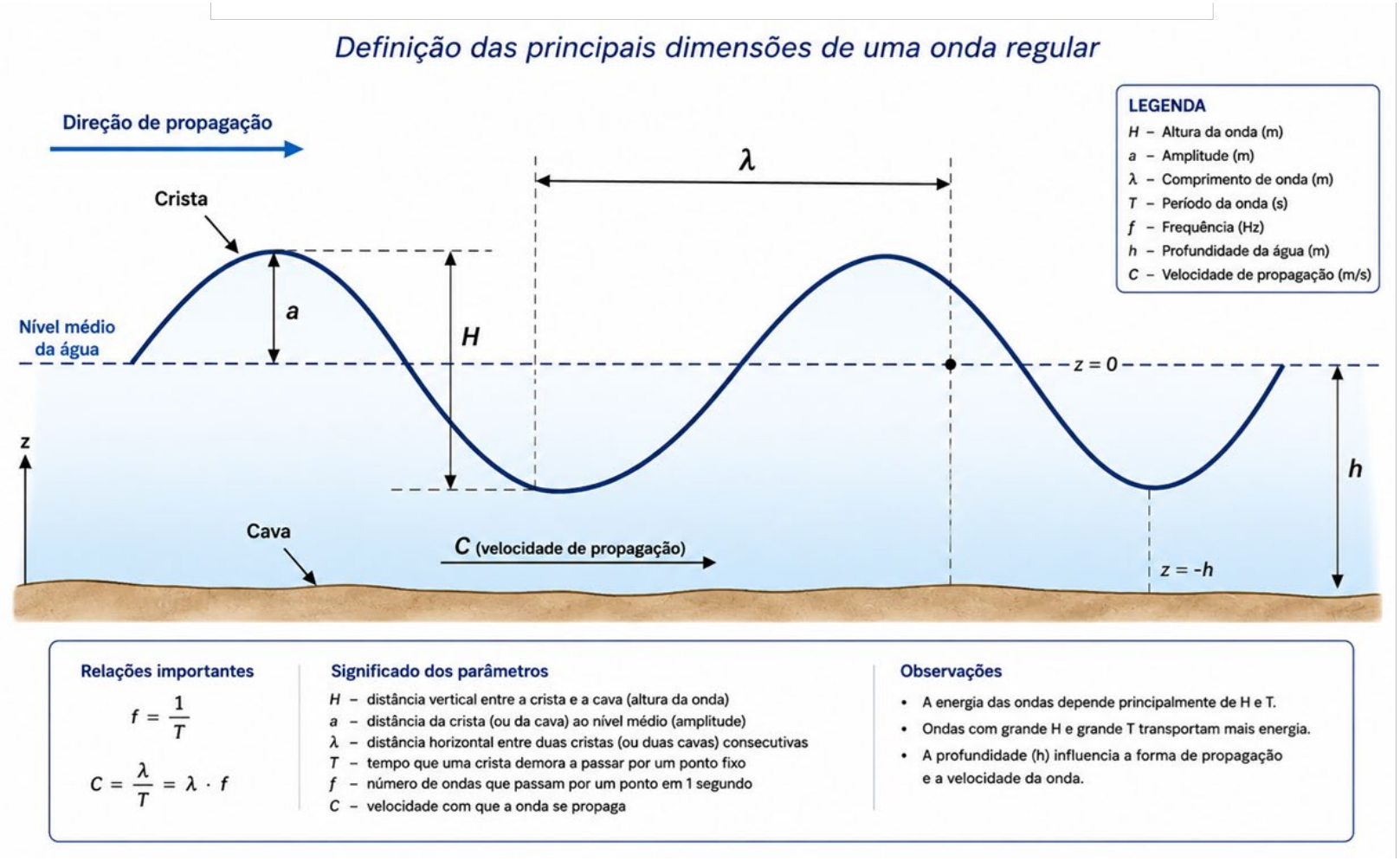
27.2 – Origem da energia das ondas

- O vento transfere energia para a superfície do mar por meio de tensões de atrito e de pressão.
- As pequenas perturbações superficiais evoluem em ondas à medida que a transferência de energia aumenta.
- A altura (H), o comprimento de onda (λ) e o período (T) aumentam durante o processo de crescimento.
- As partículas de água descrevem trajectórias aproximadamente circulares, cujo diâmetro diminui à medida que a profundidade aumenta.
- A propagação das ondas transporta energia, enquanto o movimento médio da água permanece reduzido.
- O desenvolvimento das ondas depende de três factores fundamentais: velocidade do vento, duração da sua acção e *fetch*.

27.2 – Formação das ondas pelo vento



27.3 – Parâmetros geométricos da onda



Relações importantes

$$f = \frac{1}{T}$$

$$C = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$$

Significado dos parâmetros

- H – distância vertical entre a crista e a cava (altura da onda)
- a – distância da crista (ou da cava) ao nível médio (amplitude)
- λ – distância horizontal entre duas cristas (ou duas cavas) consecutivas
- T – tempo que uma crista demora a passar por um ponto fixo
- f – número de ondas que passam por um ponto em 1 segundo
- C – velocidade com que a onda se propaga

Observações

- A energia das ondas depende principalmente de H e T.
- Ondas com grande H e grande T transportam mais energia.
- A profundidade (h) influencia a forma de propagação e a velocidade da onda.

27.3 – Período (T) e frequência (f) das ondas

O período (T) representa o intervalo de tempo entre a passagem de duas cristas consecutivas por um ponto fixo.

A frequência (f) indica o número de ciclos por unidade de tempo e é medida em hertz (Hz).

As duas grandezas relacionam-se pela expressão

$$\mathbf{f = 1/T} \qquad (27.1)$$

A velocidade de propagação da onda pode ser determinada por

$$\mathbf{C = \lambda/T = \lambda \cdot f} \qquad (27.2).$$

- Ondas com períodos mais longos transportam, em geral, maior quantidade de energia.

O conhecimento de **T** e **f** é essencial para o dimensionamento e a optimização dos sistemas de conversão de energia das ondas.

27.3 – Águas profundas, intermédias e rasas

As ondas classificam-se pela profundidade relativa, h/λ [–], razão adimensional entre a profundidade da água, h [m], e o comprimento de onda, λ [m]:

- ✓ águas profundas: $h/\lambda > ½$
- ✓ águas intermédias: $1/20 < h/\lambda < 1/2$ (27.3)
- ✓ águas rasas: $h/\lambda < 1/20$

- **Águas profundas**: o fundo não influencia a propagação; as partículas descrevem órbitas aproximadamente circulares.
- **Águas intermédias**: inicia-se a interacção com o fundo; a velocidade de propagação diminui e as órbitas deformam-se.
- **Águas rasas**: a velocidade depende essencialmente da profundidade; as órbitas tornam-se achatadas e o movimento é predominantemente horizontal.

27.3 – Águas profundas, intermédias e rasas

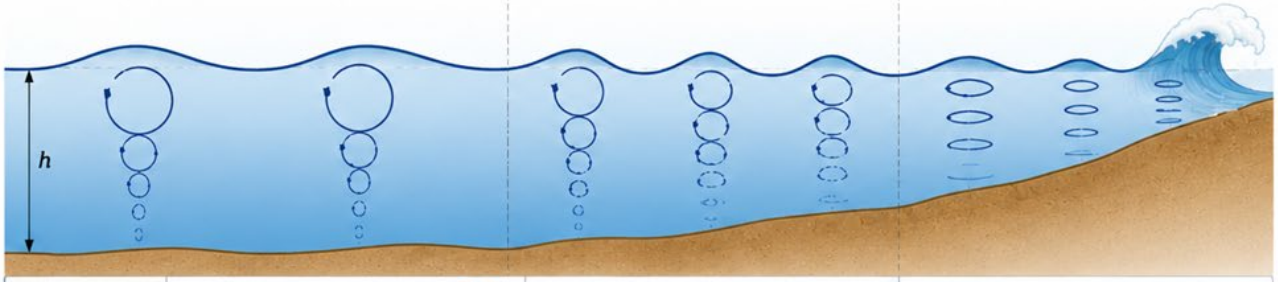
A classificação pela razão h/λ determina as cargas hidrodinâmicas e a energia disponível em cada zona – é a base do projecto de portos, quebra-mares, plataformas offshore e conversores.

Regime	Velocidade	Altura da onda	Movimento das partículas
Águas profundas	Elevada	Pequena	Órbitas circulares
Águas intermédias	Diminui	Aumenta	Órbitas elípticas
Águas rasas	Baixa	Elevada	Movimento quase horizontal

27.3 – Águas profundas, intermédias e rasas

À medida que a onda se aproxima da costa, a profundidade diminui e as suas características transformam-se

	1 ÁGUAS PROFUNDAS	2 ÁGUAS INTERMÉDIAS	3 ÁGUAS RASAS
	$h > \frac{\lambda}{2}$	$\frac{\lambda}{20} < h < \frac{\lambda}{2}$	$h < \frac{\lambda}{20}$
	A profundidade é maior que metade do comprimento de onda	A profundidade é comparável com o comprimento de onda	A profundidade é muito menor que o comprimento de onda

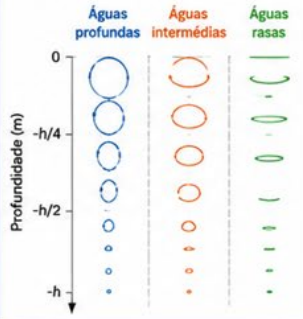


	1 ÁGUAS PROFUNDAS	2 ÁGUAS INTERMÉDIAS	3 ÁGUAS RASAS
Órbitas das partículas	Órbitas circulares que diminuem rapidamente com a profundidade	Órbitas elípticas, achatadas à medida que a profundidade diminui	Órbitas muito achatadas (movimento quase horizontal)
Comprimento de onda (λ)	Grande (λ longo)	Diminui	Muito pequeno
Altura da onda (H)	Pequena	Aumenta	Muito grande
Velocidade de propagação (C)	Elevada	Diminui	Baixa
Energia da onda	Distribuída numa grande profundidade	Concentra-se à medida que a profundidade diminui	Muito concentrada perto da superfície e do fundo

LEGENDA

- h – Profundidade da água (m)
- λ – Comprimento de onda (m)
- H – Altura da onda (m)
- C – Velocidade de propagação (m/s)

MOVIMENTO DAS PARTÍCULAS COM A PROFUNDIDADE

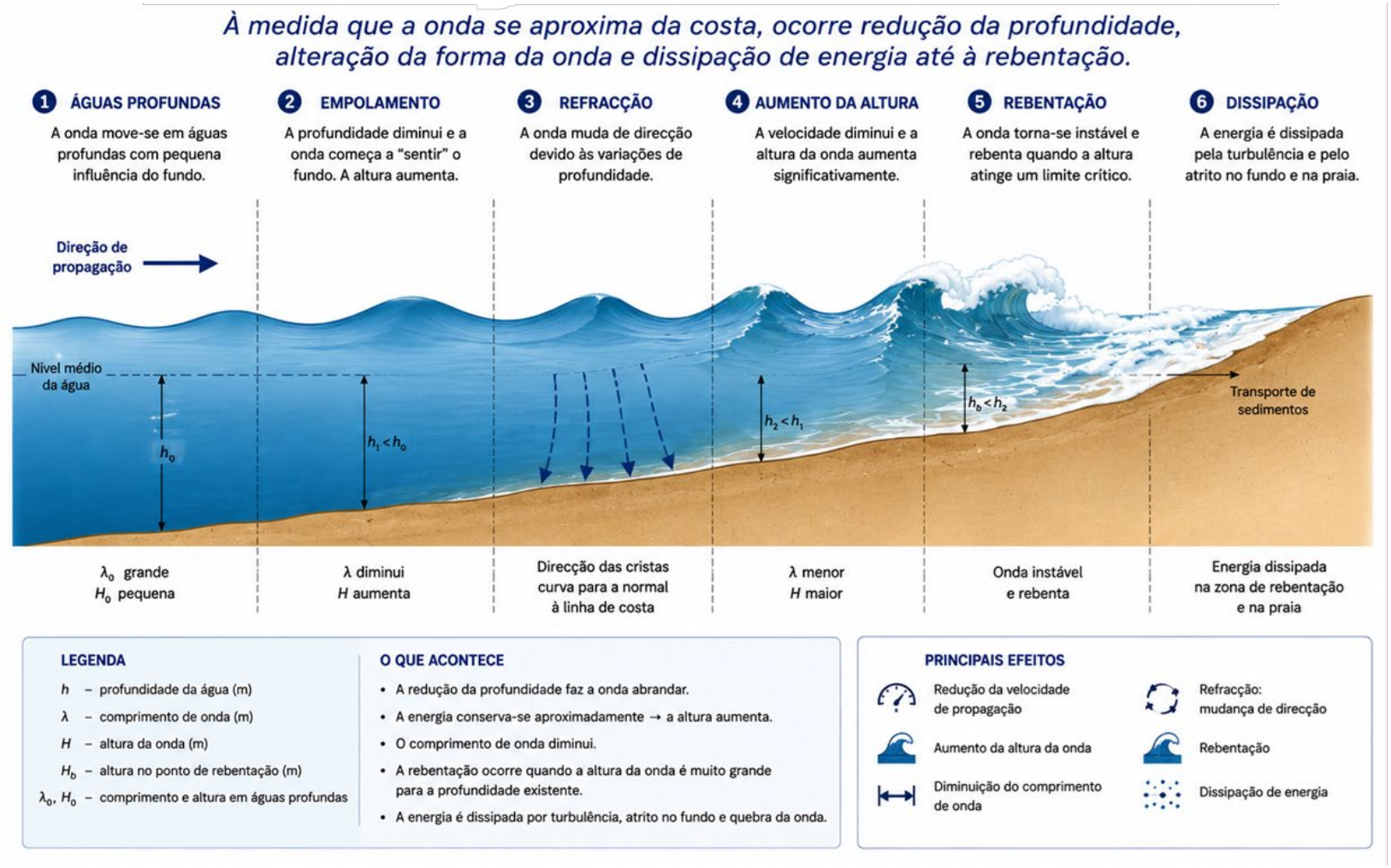


As órbitas reduzem com a profundidade e tornam-se mais achatadas.

RESUMO DAS TRANSFORMAÇÕES



27.3 – Transformação da onda junto à costa



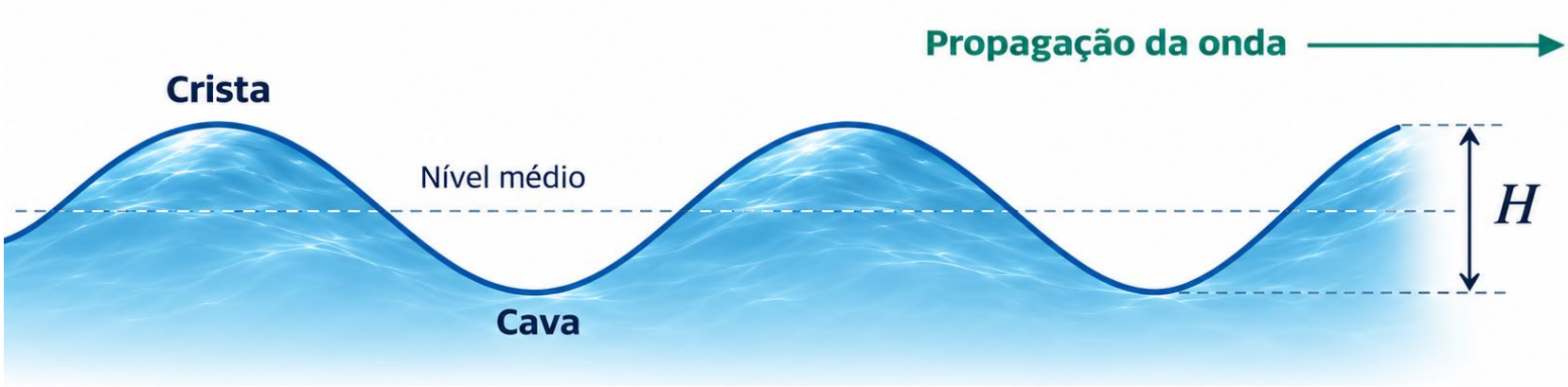
27.4 – Energia cinética e potencial de uma onda

- A energia mecânica de uma onda é composta por energia potencial gravitacional e energia cinética.
- A energia potencial resulta da elevação das partículas de água acima do nível médio da superfície.
- A energia cinética está associada às velocidades orbitais das partículas de água.
- Num escoamento ondulatório linear, a energia potencial média e a energia cinética média são aproximadamente iguais.
- A energia total da onda é dada pela soma das duas componentes:

$$E_{\text{total}} = E_p + E_k \qquad (27.4)$$

- A energia propaga-se com a onda, enquanto as partículas de água apenas oscilam em torno da sua posição de equilíbrio.

27.4 – Energia cinética e potencial de uma onda



Energia potencial (E_P)
Elevação da superfície em relação ao nível médio.

Energia cinética (E_K)
Movimento das partículas de água.

Energia média por unidade de área (J/m²)

$$E = E_P + E_K = \frac{\rho g H^2}{8}$$

ρ — densidade da água g — aceleração da gravidade H — altura da onda

27.4 – Transporte de energia por uma onda

A onda transporta **energia, não massa**: as partículas de água descrevem órbitas quase fechadas, sem deslocamento líquido.

A forma da onda avança à **velocidade de fase, C [m/s]**. A energia avança à **velocidade de grupo, C_g [m/s]**, que é menor.

Densidade de energia, E [J/m²]: energia por unidade de área da superfície do mar; ϱ [kg/m³] é a massa específica da água do mar (≈ 1025 kg/m³), g [m/s²] a aceleração da gravidade e H [m] a altura da onda.

$$E = \varrho g H^2/8 \qquad (27.5)$$

Velocidade de grupo, C_g [m/s]: velocidade à qual a energia se propaga; n [–] é um factor adimensional que depende da profundidade (n = 1/2 em águas profundas; n = 1 em águas rasas).

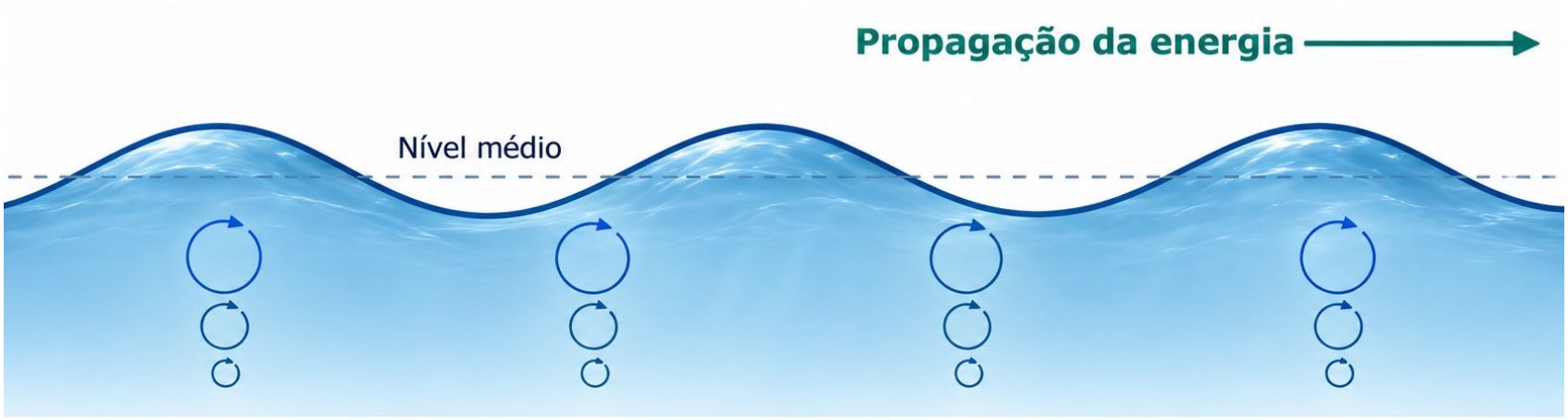
$$C_g = n \cdot C \qquad (27.6)$$

→ em águas profundas: $C_g = C/2$

Potência por metro de frente de onda, P [W/m]: energia que atravessa, em cada segundo, cada metro de crista da onda.

$$P = E \cdot C_g \ (W/m) \qquad (27.7)$$

27.4 – Transporte de energia por uma onda



Movimento das partículas

As partículas oscilam em torno da posição média.

As órbitas diminuem com a profundidade.

Velocidades da onda

c — velocidade das cristas

C_g — velocidade de grupo

Fluxo médio de energia por unidade de largura da crista (W/m)

$$P = E C_g$$

E — energia média por unidade de área (J/m²) C_g — velocidade de grupo (m/s)

27.4 – Principais características de uma onda

As ondas regulares são descritas pelos parâmetros **H, a, λ, T, f, C** e **k**.

Altura da onda, H [m]: distância vertical entre a crista e a cava; é o dobro da amplitude a [m].

$$H = 2a \qquad (27.8).$$

Número de onda, k [rad/m]: número de ciclos, em radianos, por metro de propagação.

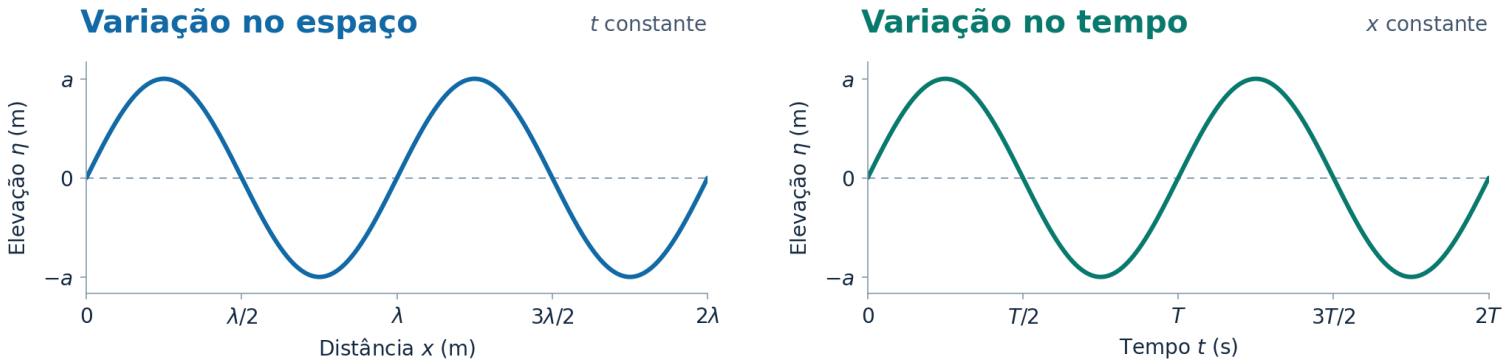
$$k = 2\pi/\lambda \qquad (27.9).$$

Velocidade em águas profundas (h > λ/2), C [m/s]: depende apenas de λ [m]; g ≈ 9,81 m/s² é a aceleração da gravidade.

$$C = \sqrt{(g\lambda / 2\pi)} \qquad (27.10)$$

27.4 – Principais características de uma onda

Representações da onda



Valores típicos no oceano

Condição	λ (m)	H (m)	T (s)	C (m/s)
Mar calmo	20–50	0,1–0,5	3–6	5–9
Mar moderado	50–150	0,5–2,0	6–10	9–16
Mar grosso	150–300	2,0–6,0	10–14	16–22
Tempestade	300–600	6,0–12,0	14–20	22–31

27.4 – Potência por metro de frente de onda

Em águas profundas, a potência pode ser estimada por:

$$P \approx 0{,}49\, H_s^2\, T_e \qquad (27.11)$$

Forma geral (mar irregular) e potência numa frente de largura B:

$$P = \varrho g\, H_s^{\,2}\, C_g/16 \ \ [W/m] \qquad (27.12)$$

$$P_{total} = P \cdot B \qquad (27.13)$$

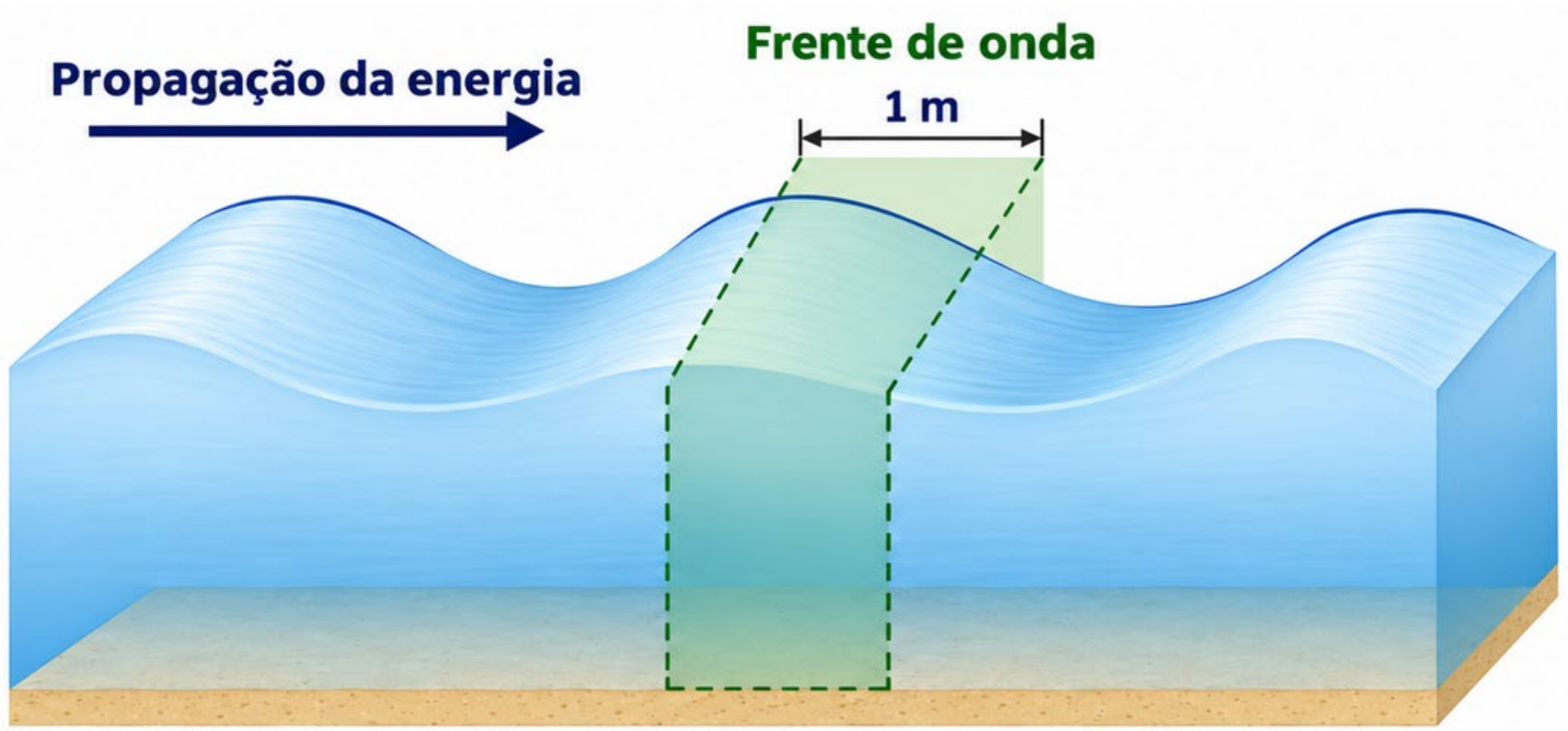
Onde:

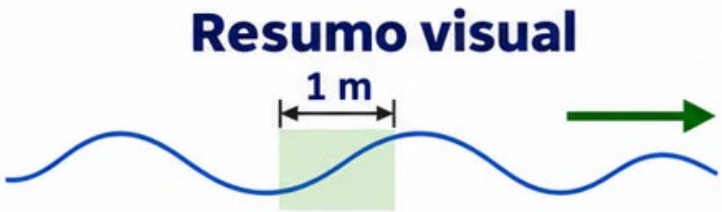
- **P** – potência por metro de frente de onda (kW/m)
- **H_s** – altura significativa da onda (m)
- **T_e** – período energético (s)
- **C_g** – velocidade de grupo (m/s); **B** – largura da frente (m)

- A potência aumenta aproximadamente com o quadrado da altura da onda.
- Ondas de maior período transportam mais energia para a mesma altura.
- Este parâmetro é utilizado na selecção de locais para parques de energia das ondas e no dimensionamento dos dispositivos de conversão.

27.4 – Potência por metro de frente de onda

Prof. Doutor Engº Jorge Nhambiu ◊ Sistemas Energéticos





Potência média que atravessa 1 m de frente de onda.

27.4 – Exemplo 27.1: Potência de um estado de mar

Num local ao largo do sul de Moçambique, com profundidade h = 60 m, o estado de mar tem H_s = 2 m e T_e = 8 s (ϱ = 1025 kg/m³). Determine: (a) o comprimento de onda e o regime de profundidade; (b) a velocidade de grupo; (c) a potência por metro de frente de onda; (d) a potência eléctrica de uma frente de 1 km, com um rendimento de captura de 25% e um PTO de 80%.

Grandeza	Cálculo	Resultado
Comprimento de onda (27.10)	$\lambda = gT^2/2\pi = 9{,}81 \times 8^2/2\pi$	**≈ 100 m**
Regime (27.3)	$h > \lambda/2 = 50$ m	Águas profundas
Velocidade de grupo (27.6)	$C_g = gT/4\pi = 9{,}81 \times 8/4\pi$	**6,25 m/s**
Potência por metro (27.12)	$P = \rho g H_s^2 C_g/16$ ($\approx 0{,}49 H_s^2 T_e$; 27.11)	**15,7 kW/m**
Frente de 1 km (27.13)	$P \times B = 15{,}7 \times 1\,000$	**15,7 MW**
Electricidade	15,7 × 0,25 (captura) × 0,80 (PTO)	**≈ 3,1 MW**

27.5 – Classificação dos conversores

Os conversores de energia das ondas (**Wave Energy Converters – WEC**) classificam-se de acordo com o mecanismo de extracção da energia e a configuração estrutural. As principais categorias são:

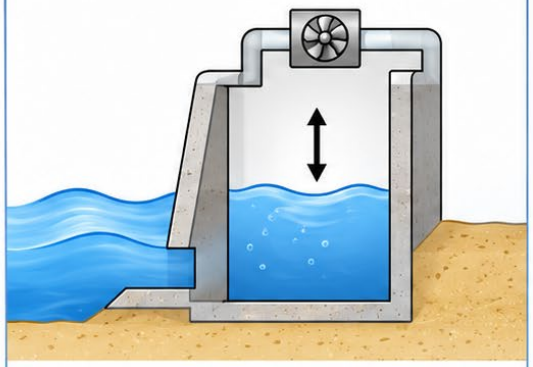
- **Coluna de Água Oscilante (OWC)**;
- **Corpos Oscilantes**, que incluem:
  - **Atenuadores**;
  - **Absorvedores Pontuais (Point Absorbers)**;
- **Conversores por Transbordamento (Overtopping)**.

Os WEC também podem ser classificados pela localização (**onshore**, **nearshore** e **offshore**) e pelo modo de fixação (fixos ou flutuantes).

27.5 – Classificação dos conversores

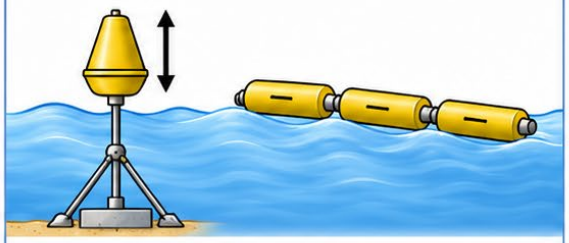
Conversores de energia das ondas (WEC)

Coluna de água oscilante



A água em movimento força o ar a passar pela turbina.

Corpos oscilantes

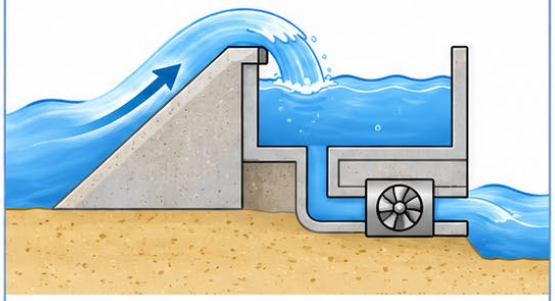


Absorvedor pontual

Atenuador

O movimento dos flutuadores acciona o gerador.

Galgamento



A água acumulada desce e acciona a turbina.

27.5.1 – Coluna de água oscilante (CAO)

A Coluna de Água Oscilante (CAO) converte a energia mecânica das ondas em energia pneumática e, posteriormente, em energia eléctrica.

A oscilação da superfície livre da água provoca compressão e descompressão alternadas do ar no interior da câmara.

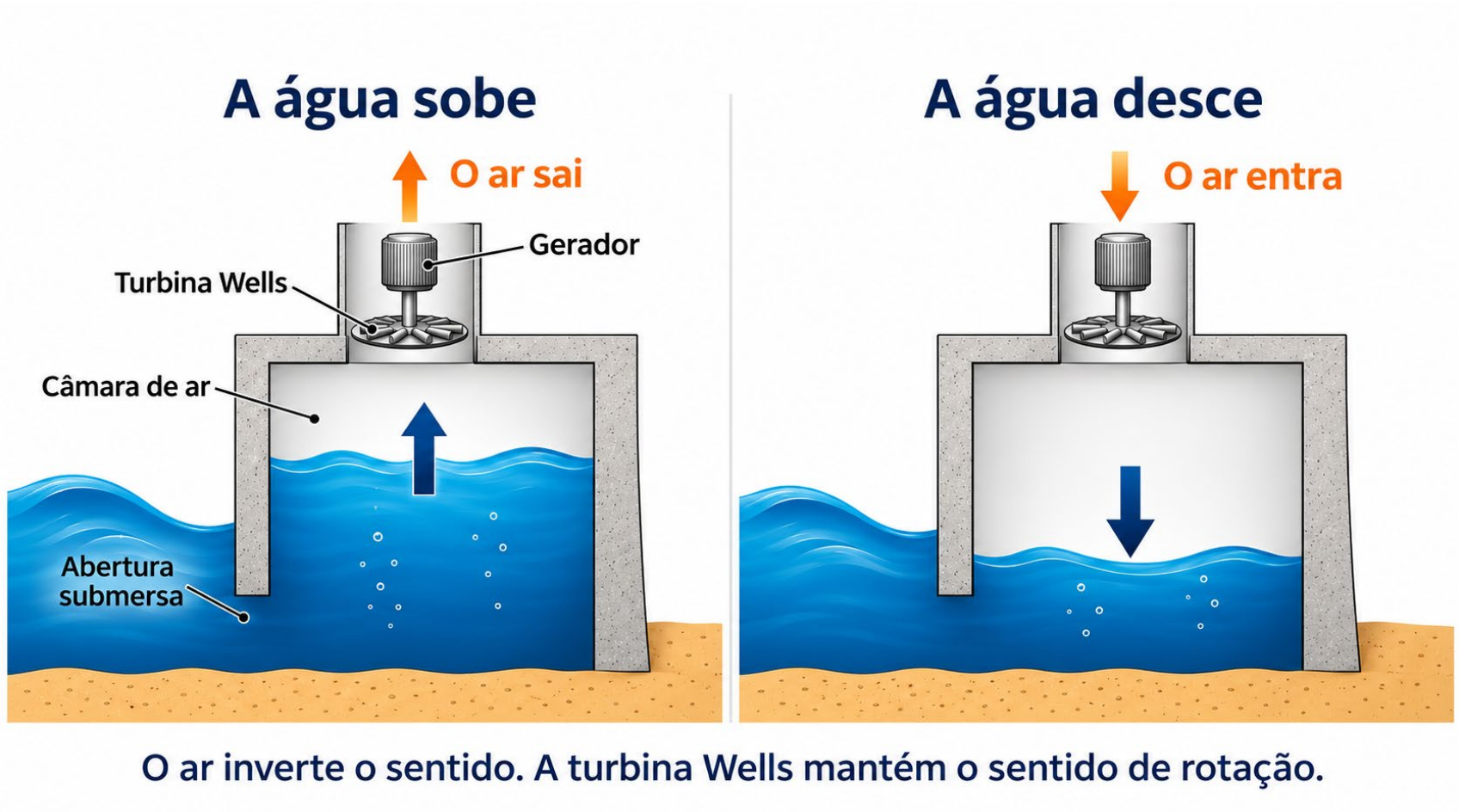
O escoamento bidirecional do ar atravessa uma turbina auto-reversível (geralmente do tipo Wells), que gira sempre no mesmo sentido.

A energia mecânica da turbina é convertida em energia eléctrica por um gerador.

Como os componentes electromecânicos permanecem acima da superfície do mar, os custos de manutenção são reduzidos.

O desempenho depende da geometria da câmara, das características da turbina e das condições do regime de ondas.

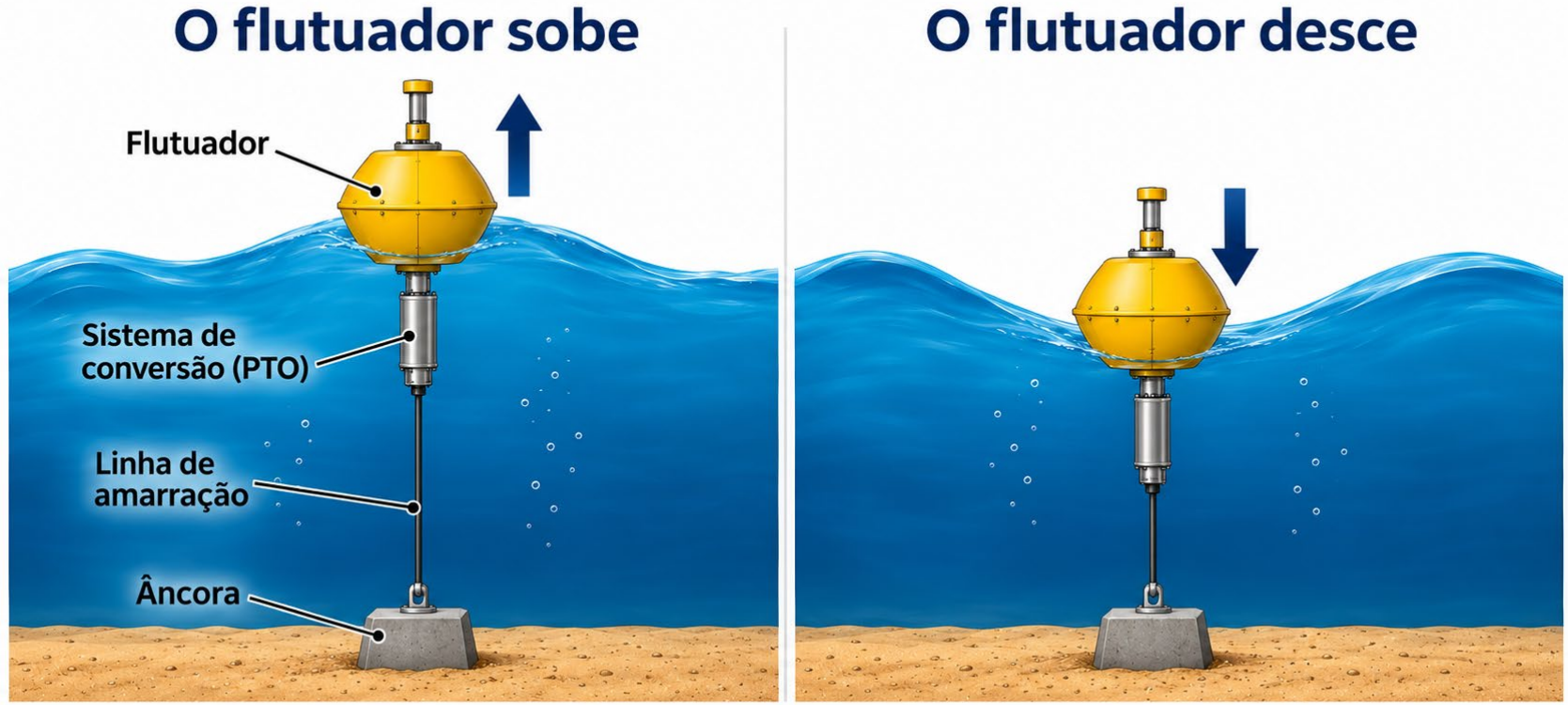
27.5.1 – Coluna de água oscilante (CAO)



27.5.2 – Absorvedor pontual

- O absorvedor pontual (**Point Absorber**) é um conversor de pequenas dimensões relativamente ao comprimento de onda incidente.
- O dispositivo aproveita o movimento relativo entre o flutuador e uma referência (âncora, estrutura ou massa de reacção).
- O sistema de conversão de potência (**Power Take-Off – PTO**) transforma o movimento mecânico em energia eléctrica, podendo utilizar actuadores hidráulicos, geradores lineares ou sistemas electromecânicos.
- O movimento predominante é o **heave**, embora alguns dispositivos também explorem os movimentos de *surge* e *pitch*.
- A potência captada depende da sintonia dinâmica entre o conversor e as características das ondas.
- A modularidade permite a instalação de múltiplos absorvedores formando parques offshore de elevada capacidade.

27.5.2 – Absorvedor pontual

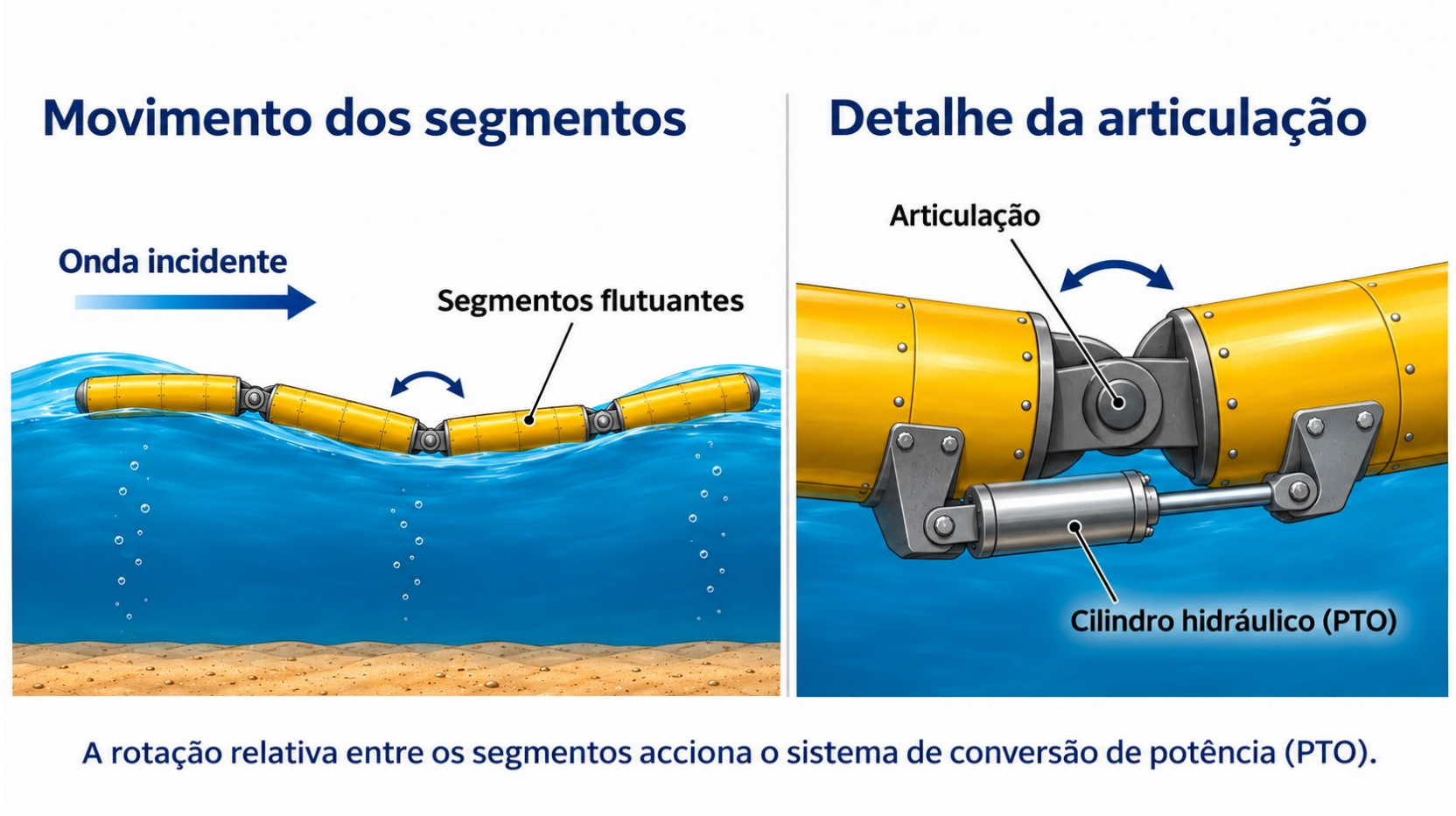


O PTO converte o movimento vertical do flutuador em electricidade.

27.5.3 – Atenuador articulado

- O atenuador articulado (**Attenuator**) é um conversor longitudinal composto por vários módulos flutuantes interligados por juntas articuladas.
- O dispositivo é orientado aproximadamente na direcção de propagação das ondas, acompanhando o seu movimento.
- A flexão relativa entre os segmentos é convertida em energia mecânica por meio de sistemas **Power Take-Off (PTO)**, normalmente hidráulicos ou electromecânicos.
- A energia hidráulica ou mecânica é posteriormente convertida em energia eléctrica por um gerador.
- O desempenho depende da geometria do dispositivo, do comprimento total e da sintonia com o período dominante das ondas.
- Esta tecnologia é particularmente indicada para parques offshore sujeitos a ondas de grande amplitude e elevado conteúdo energético.

27.5.3 – Atenuador articulado

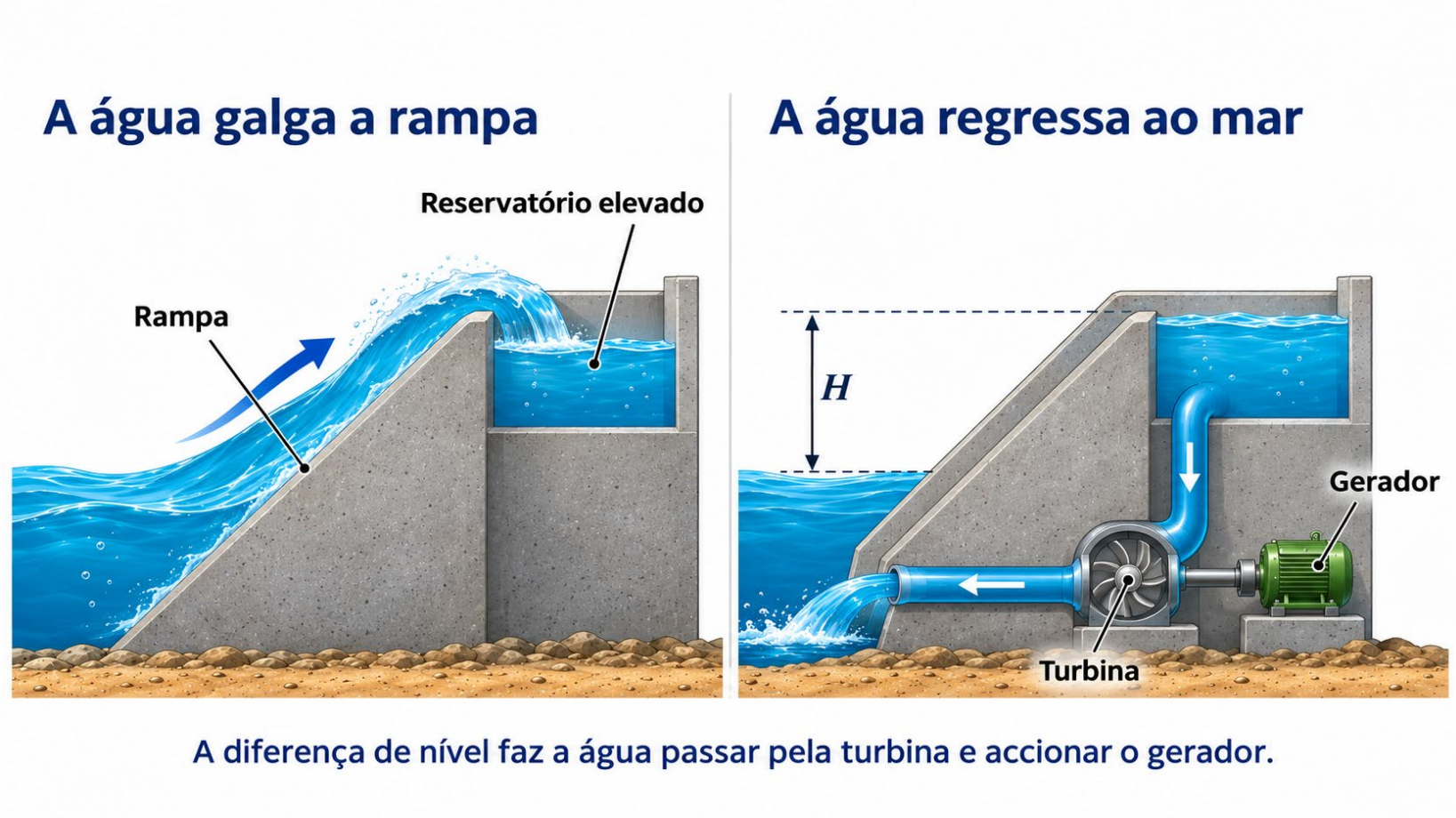


A rotação relativa entre os segmentos acciona o sistema de conversão de potência (PTO).

27.5.4 – Conversor de galgamento (overtopping)

- O conversor de galgamento (**Overtopping Converter**) utiliza uma rampa para conduzir parte da água das ondas a um reservatório elevado.
- A água acumulada armazena energia potencial gravitacional devido ao desnível em relação ao nível médio do mar.
- O escoamento controlado por meio de turbinas hidráulicas converte essa energia em energia mecânica.
- O gerador eléctrico transforma a energia mecânica em energia eléctrica.
- O rendimento do sistema depende da altura das ondas, da geometria da rampa, do volume armazenado e da eficiência das turbinas.
- O princípio de funcionamento é semelhante ao de uma central hidroeléctrica de baixa queda.

27.5.4 – Conversor de galgamento (overtopping)



27.5.6 – Comparação entre os conversores

Tecnologia	Maturidade	Eficiência	Local típico	Complexidade
Coluna de Água Oscilante	★★★★☆	Média	Costa	Baixa
Absorvedor Pontual	★★★★☆	Elevada	Offshore	Média
Atenuador	★★★☆☆	Elevada	Offshore	Elevada
Galgamento	★★★☆☆	Média	Costa	Elevada
Corpo oscilante	★★★★☆	Elevada	Offshore	Média

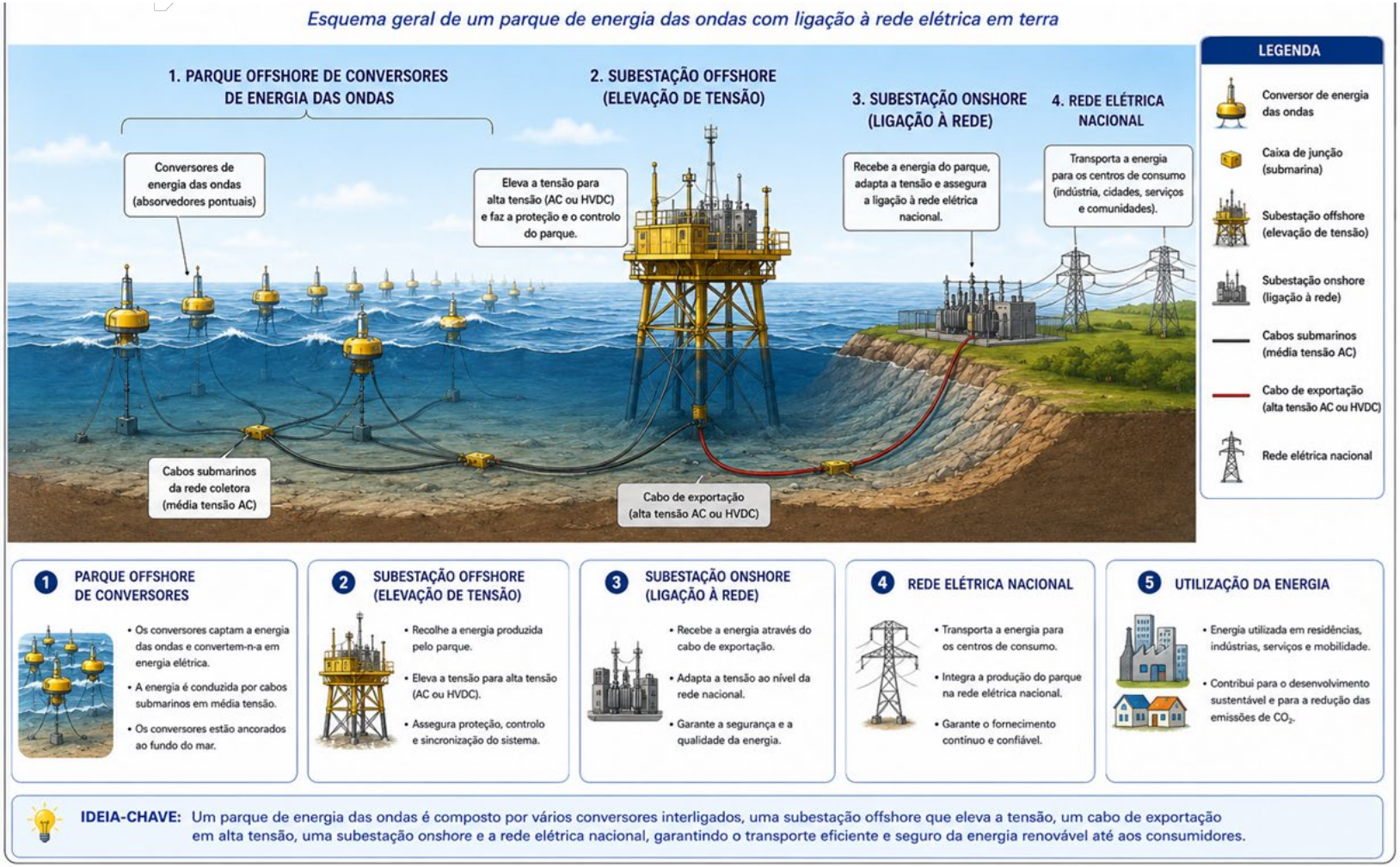
Nenhuma tecnologia de ondas atingiu ainda a maturidade comercial plena. Os atenuadores e os absorvedores pontuais são tipos de corpos oscilantes.

27.6 – Parque offshore ligado à rede

Os conversores de energia das ondas estão organizados em parques (*Wave Energy Farms*) interligados por uma rede colectora submarina.

- A energia gerada por cada dispositivo é transmitida, em média tensão, para uma subestação offshore.
- A subestação eleva a tensão e realiza a protecção, sincronização e controlo do sistema eléctrico.
- A energia é transportada até à terra por cabos submarinos de alta tensão (AC ou HVDC, para grandes distâncias).
- A subestação onshore adapta a tensão e integra a produção na rede eléctrica nacional.
- O projecto da infra-estrutura eléctrica offshore é determinante para minimizar perdas, aumentar a fiabilidade e reduzir os custos de operação.

27.6 – Parque offshore ligado à rede



27.7 – Desafios de engenharia

- O ambiente oceânico provoca corrosão, fadiga, bioincrustação (*biofouling*) e desgaste acelerado dos componentes mecânicos.
- As cargas hidrodinâmicas são altamente variáveis e exigem dimensionamento estrutural para condições extremas de operação.
- Os sistemas de amarração, fundações e cabos submarinos devem garantir estabilidade e elevada disponibilidade operacional.
- Os sistemas **Power Take-Off (PTO)** necessitam de elevada eficiência, elevada fiabilidade e baixos requisitos de manutenção.
- A instalação, monitorização e manutenção offshore representam uma parcela significativa do custo total do ciclo de vida.
- A viabilidade comercial depende da redução do custo nivelado da energia (**LCOE**), do aumento da durabilidade e da optimização da operação dos parques.

27.7 – Desafios de engenharia

Principais desafios no projeto, instalação, operação e manutenção de sistemas de conversão de energia das ondas

1. AMBIENTE MARINHO AGRESSIVO

- Corrosão e bioincrustação de estruturas e componentes.
- Fadiga de materiais devido à carga cíclica das ondas.
- Desgaste por impacto e abrasão (areia, partículas em suspensão).
- Exposição a UV, temperatura e salinidade.



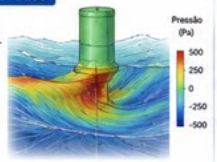
2. CONDIÇÕES OCEÂNICAS EXTREMAS

- Ondas de grande altura e períodos variáveis.
- Tempestades e eventos extremos.
- Correntes marítimas e marés.
- Variação espacial e temporal da energia das ondas.



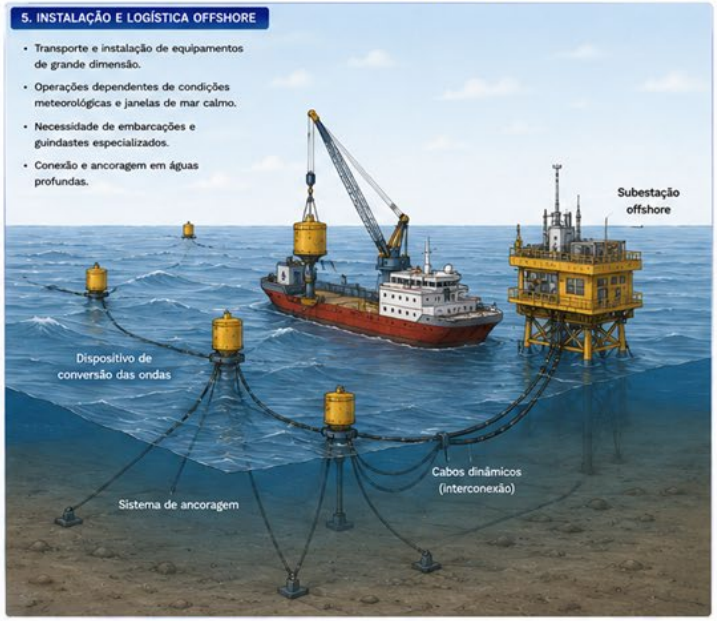
3. PROJETO ESTRUTURAL E HIDRODINÂMICO

- Garantir alta eficiência de conversão em ampla faixa de condições de onda.
- Resistência estrutural com peso e custo reduzidos.
- Interação fluido-estrutura complexa.
- Otimização de geometria e controle de movimentos.



5. INSTALAÇÃO E LOGÍSTICA OFFSHORE

- Transporte e instalação de equipamentos de grande dimensão.
- Operações dependentes de condições meteorológicas e janelas de mar calmo.
- Necessidade de embarcações e guindastes especializados.
- Conexão e ancoragem em águas profundas.



6. CONFIABILIDADE E DISPONIBILIDADE

- Garantir operação contínua com mínima intervenção.
- Componentes sujeitos a falhas em ambiente remoto.
- Necessidade de alta confiabilidade para viabilidade econômica.
- Estratégias de manutenção preditiva e monitoramento.



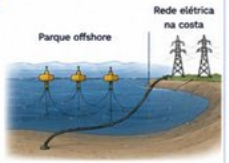
7. MANUTENÇÃO E ACESSO

- Acesso difícil e caro para inspeção e reparos.
- Dependência de condições de mar e clima.
- Desenvolvimento de sistemas de manutenção remota (ROV) e módulos substituíveis.



8. CONEXÃO À REDE ELÉTRICA

- Transmissão de energia a longas distâncias até a costa.
- Perdas elétricas e queda de tensão.
- Proteção e estabilidade do sistema elétrico.
- Integração com redes existentes.



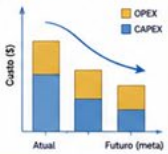
4. SISTEMAS DE CONVERSÃO DE POTÊNCIA

- Conversão eficiente e confiável do movimento em energia elétrica.
- Componentes hidráulicos, pneumáticos ou mecânicos sujeitos a falhas.
- Selagem e lubrificação em ambiente marinho.
- Necessidade de redundância e proteção de equipamentos.



9. CUSTOS E VIABILIDADE ECONÔMICA

- Altos custos de capital (CAPEX) e operacionais (OPEX).
- Necessidade de tecnologias duráveis e de baixo custo de manutenção.
- Escalabilidade e produção em larga escala.



10. IMPACTOS AMBIENTAIS E PERMISSÕES

- Avaliação de impacto ambiental.
- Interação com ecossistemas marinhos e vida selvagem.
- Ruído subaquático e interferência com navegação e pesca.
- Processos de licenciamento complexos e demorados.



11. PADRONIZAÇÃO E REGULAMENTAÇÃO

- Falta de normas e padrões específicos para tecnologias de ondas.
- Incertiidões regulatórias e de seguros.
- Necessidade de testes, certificações e validações em escala real.



DESAFIO CENTRAL

Desenvolver soluções robustas, eficientes e economicamente viáveis que possam operar de forma confiável no ambiente marinho, convertendo a energia das ondas em eletricidade de forma sustentável.

CHAVES PARA SUPERAR OS DESAFIOS

- Inovação tecnológica
- Materiais avançados
- Monitoramento inteligente
- Parcerias e colaboração
- Testes em escala real
- Experiência operacional

OBJETIVO FINAL

Viabilizar parques de energia das ondas competitivos, confiáveis e sustentáveis, contribuindo para a transição energética global.

27.8 – O recurso das ondas em Moçambique

- O Canal de Moçambique é parcialmente abrigado por Madagáscar: o recurso é moderado.
- Sul do Canal: 10–23 kW/m em média; centro e norte: ≈ 6–7 kW/m.
- Em tempestades, picos até ≈ 90 kW/m – condicionam o dimensionamento estrutural.
- As ondas permitem produzir electricidade em ≈ 60% do tempo.
- Comparação: costa atlântica da Europa, tipicamente 40–60 kW/m.
- Fonte: Sitoe, Hoguane & Haddout (2023), J. Water Clim. Change 14(1), 330–349.

Em Moçambique, a energia das ondas é mais adequada a sistemas de pequena escala e híbridos, sobretudo no sul, do que a grandes parques.

27.8 – Benefícios e aplicações em Moçambique

Benefícios

- Electrificação costeira, menor dependência do gasóleo, apoio à pesca e ao turismo e maior resiliência climática.

Aplicações potenciais em Moçambique

- Ilhas do Arquipélago das Quirimbas.
- Ilha de Moçambique.
- Bazaruto e Inhaca.
- Comunidades piscatórias isoladas.
- Faróis e postos de vigilância costeira.
- Portos de pequena dimensão.
- Estações oceanográficas.
- Sistemas de dessalinização alimentados por energias renováveis.
- Produção de hidrogénio verde em zonas costeiras.

27.8 – Aplicação híbrida em Moçambique



Exemplo ilustrativo de electrificação de uma comunidade costeira em Moçambique.

Formulário da Aula 27

Grandeza	Expressão	Eq.
Frequência	$f = 1/T$	27.1
Velocidade de propagação	$C = \lambda/T = \lambda f$	27.2
Classificação da profundidade	profundas $h > \lambda/2$; rasas $h < \lambda/20$	27.3
Energia total	$E = E_p + E_k$	27.4
Energia (onda regular)	$E = \rho g H^2/8$ [J/m^2]	27.5
Velocidade de grupo	$C_g = n \cdot C$ (n = 1/2 profundas; n = 1 rasas, $C = \sqrt{(gh)}$)	27.6
Potência por metro	$P = E \cdot C_g$ [W/m]	27.7
Altura e amplitude	$H = 2a$	27.8
Número de onda e frequência angular	$k = 2\pi/\lambda$; $\omega = 2\pi/T$	27.9
Águas profundas	$C = \sqrt{(g\lambda/2\pi)} = gT/2\pi$; $\lambda = gT^2/2\pi$	27.10
Potência (águas profundas)	$P \approx 0{,}49\ H_s^2 T_e$ [kW/m]	27.11
Potência (mar irregular)	$P = \rho g\ H_s^2\ C_g/16$ [W/m]	27.12
Potência numa frente B	$P_{total} = P \cdot B$	27.13

Prof. Doutor Engº Jorge Nhambiu ◊ Sistemas Energéticos

Síntese e erros frequentes

O que reter

- As ondas transportam energia, não massa; a energia viaja à velocidade de grupo C_g.
- A potência cresce com o quadrado da altura e com o período: $P \propto H^2T$.
- Em águas profundas: $P \approx 0{,}49\ H_s^2\ T_e$ [kW/m].
- Três princípios de conversão: CAO, corpos oscilantes e galgamento.
- O recurso no Canal de Moçambique é moderado (6–23 kW/m).

Erros frequentes

- Confundir a altura H com a amplitude a ($H = 2a$).
- Usar C em vez de C_g no cálculo da potência.
- Usar /8 com H_s (mar irregular) ou /16 com H (onda regular).
- Esquecer de multiplicar P (kW/m) pela largura da frente.
- Classificar a profundidade por h e não pela razão h/λ.

Problemas propostos

- P1. Uma onda em águas profundas tem período T = 10 s. Calcule λ, C e C_g.
- P2. No sul de Moçambique, um estado de mar apresenta H_s = 1,5 m e T_e = 7 s. Calcule a potência por metro e a potência em uma frente de 500 m.
- P3. Mantendo T_e, como varia a potência se H_s passar de 1 m para 2 m?
- P4. Uma onda com T = 8 s propaga-se num local com h = 20 m. Classifique o regime de profundidade.
- P5. Uma CAO com 20 m de frente, num quebra-mar, recebe ondas com H_s = 2 m e T_e = 8 s. Com um rendimento global de 15%, qual a potência eléctrica?

Próxima aula: mini-teste sobre energia das ondas (Aula 27).

Problemas propostos – respostas

Prob.	Resolução resumida	Resposta
P1	$\lambda = 9{,}81 \times 10^2/2\pi$; $C = \lambda/T$; $C_g = C/2$	156 m ; 15,6 m/s ; 7,8 m/s
P2	$0{,}49 \times 1{,}5^2 \times 7$; $\times$ 500 m	7,7 kW/m ; 3,9 MW
P3	$P \propto H_s^2 : (2/1)^2$	4 vezes maior
P4	$\lambda \approx 100$ m ; $h/\lambda = 20/100 = 0{,}2$	Águas intermédias
P5	15,7 kW/m $\times$ 20 m $\times$ 0,15	$\approx$ 47 kW