



# FUNDAMENTOS SOBRE ENERGIA DAS ONDAS



**Mestrado em Energias Renováveis**

**Unidade Curricular: Energias Renováveis II**

# ENQUADRAMENTO



- Devido ao aumento do consumo energético, tem-se apostado na procura de fontes de energia alternativas aos combustíveis fósseis visando a produção de energia útil. Uma destas fontes alternativas é a **energia contida nas ondas do oceano**. Esta fonte de energia é um recurso renovável encontrado em abundância por todo o planeta, podendo ser explorado por vários países contribuindo para as suas necessidades energéticas. Em comparação com outras fontes de energia renováveis, principalmente **energia solar e eólica, as ondas oceânicas** apresentam maiores densidades de energia. Contudo, a distribuição da densidade de energia contida nas ondas **não é uniforme** em todo planeta, tornando a exploração deste recurso mais adequada para determinados países.
- Após o choque petrolífero de 1973, certos países, privilegiados com potencial de exploração deste recurso, devido às suas condições geográficas e com dependência da importação de energia para satisfazerem as suas necessidades, consideraram a conversão da energia das ondas em programas de índole governamental ou em instituições de investigação e desenvolvimento.

**Portugal insere-se neste grupo de países !**



- Para Portugal, o aproveitamento da energia das ondas oceânicas revela-se atractivo pois apresenta uma extensa faixa costeira na qual surgem ondas do oceano com elevada densidade energética. Além disso, deve-se pugnar por uma determinada independência energética para Portugal através da utilização de energias renováveis. Deste modo, não só são reduzidos os custos de importação de energia útil e de combustíveis fósseis, como também são atenuadas as emissões de gases com efeito de estufa para a atmosfera, o que incentiva ainda mais o investimento em tecnologia de extracção de energia das ondas. No entanto, a extracção de energia das ondas oceânicas apresenta ainda muitos constrangimentos.
- Apesar da existência de inúmeros conceitos de extracção, os sistemas existentes encontram-se ainda em **fase de protótipo** não se tendo ainda afirmado um dispositivo suficientemente eficaz. Os custos associados à implementação e manutenção dos sistemas de extracção são significativos já que a tecnologia referente às estruturas existentes apresentam dificuldades em resistir à severidade das ondas do oceano em situações de tempestade marítima. Por isso, é importante para Portugal apostar na investigação e desenvolvimento nesta área através da optimização e desenvolvimento de novos dispositivos de geração eléctrica a partir das ondas, afim de tornar esta tecnologia fiável e **exequível a nível técnico e económico**.

## 1. Estado da arte



**1.1. Introdução:** Nesta secção realiza-se uma breve avaliação histórica da utilização da energia do movimento da água, não só para enquadramento do tema em estudo, mas também para efectuar a comparação das potenciais vantagens dos diferentes sistemas existentes e também identificar as limitações e condicionalismos, no sentido de uma aproximação progressiva às soluções de compromisso mais eficazes.

**1.2. Energia da água:** A água é um fluido de elevada massa volúmica, pelo que o seu movimento natural ao longo dos rios, por efeito da gravidade, forneceu ao Homem uma forma de energia inesgotável contida nesse movimento. É possível encontrarem-se sistemas mais ou menos engenhosos de aproveitamento da energia da água em movimento, alguns ainda a funcionar até aos nossos dias, como sejam os do tipo mostrado na figura.



Fig. 1.1 - Imagem e esquema de um moinho de água tradicional



O sistema de moinhos de água tal como o mostrado na figura anterior sendo muito simples na sua concepção apresentavam muitas limitações no aproveitamento da energia. Um aumento da energia potencial por efeito de maior altura de queda não se refletia proporcionalmente no ganho de energia aproveitada, pelo que posteriormente foram aperfeiçoados sistemas do tipo **turbina** onde uma maior velocidade e pressão da água são convenientemente aproveitados. Para o aproveitamento hidroelétrico em terra existem diferentes tipos de turbinas como são os exemplos das turbinas do tipo “**Pelton**”, turbina **Kaplan**, turbina **Francis**, ou outras, umas mais adaptadas a altos desníveis (queda de água ou albufeira), ou outras mais adaptadas a grandes ou pequenos caudais mas com reduzido desnível de fluxo mais ou menos constante (fio de água). Este tema será abordado e estudado mais adiante no capítulo referente à **energia mini-hídrica**.

- No que concerne ao aproveitamento da energia dos oceanos destacam-se as seguintes formas:



- **Energia das ondas**
- **Energia das marés**
- Energia associada ao diferencial térmico (OTEC)
- energia das correntes marítimas

Neste capítulo apenas será estudada a temática referente à energia das ondas. Contudo, será referido muito brevemente alguns conceitos de natureza qualitativa sobre a energia das marés.

***Energia das marés:*** Esta forma de aproveitamento terá tido sucesso com base na experiência e técnicas de aproveitamento da energia da água nos rios, nomeadamente da energia cinética da água em movimento (água deslocada). Para transformar a energia da deslocação da água das marés são habitualmente construídos diques que envolvem uma enseada ou um braço de mar. Se não houver condições naturais o custo de investimento inicial é manifestamente inviável face ao resultado (benefício) esperado.



### *Energia das marés*

O princípio de funcionamento é bastante simples: quando a maré enche, a água entra e fica armazenada num dique (sendo aproveitada a corrente ascendente). Quando a maré baixa, a água sai pelo dique como em qualquer outra barragem, sendo de novo aproveitada a energia de movimento da água.

Para que este sistema funcione adequadamente são necessárias marés e correntes fortes. Contudo, existem poucos sítios no mundo onde se verifique tão grande variação nas marés.

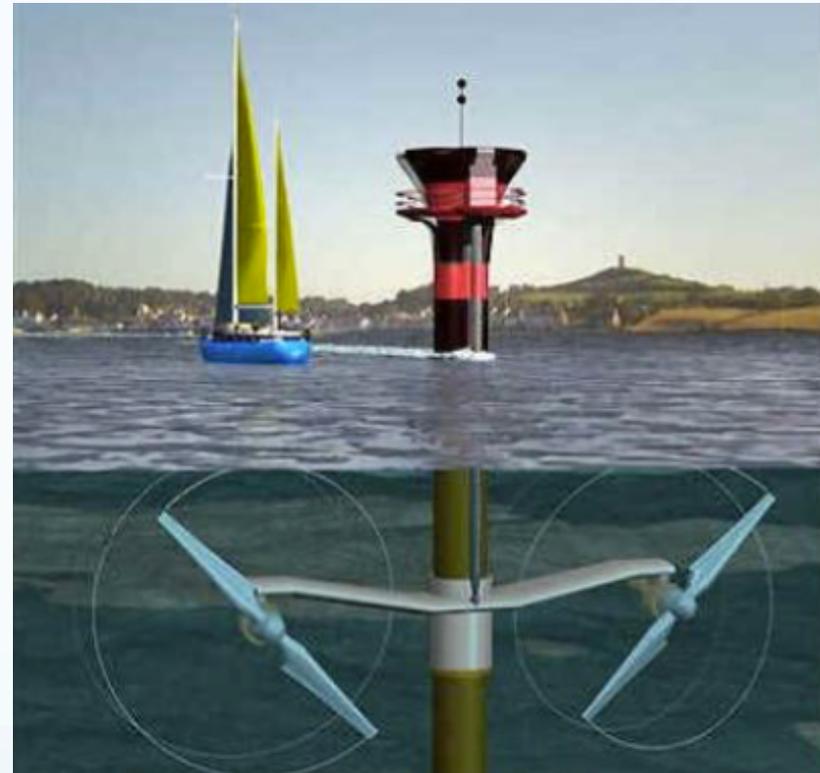


Fig.1.2 - Modelo de aproveitamento de energia das marés e de correntes marítimas



### ***As vantagens da Energia das Marés***

- A constância e previsibilidade da ocorrência das marés;
- As marés são uma fonte inesgotável de energia;
- As marés constituem uma fonte de energia não poluente.

### ***As desvantagens da Energia das Marés***

- Custos de instalação bastante elevados;;
- Só é produzida energia enquanto existir um desnível entre os níveis de água que se encontram nas partes superior e inferior do muro da barragem;
- A construção de centrais para a produção de eletricidade a partir desta energia pode comportar grandes impactos ambientais devido à criação de uma albufeira;



### ***Energia das ondas - o recurso energético em Portugal***

A maior actividade de ondas ocorre entre latitudes de 30° e 60° em ambos os hemisférios, tornando a Europa fortemente energética com cerca de 320 GW ao longo da sua costa, o que representa 16% do recurso energético mundial das ondas. Para Portugal, os valores estimados de energia disponível são de 15 GW para a zona continental e 6 GW para as regiões autónomas (Açores e Madeira). Deste modo, para Portugal, a densidade média de energia contida nas ondas é cerca de **30 a 40 kW** por cada metro de costa (kW/m), por ano para águas com profundidades superiores a 50m podendo-se classificar-se, a nível mundial, como uma região de recurso médio-alto. No entanto, muitos problemas de cariz tecnológico estão associados a este recurso energético: uns devem-se à imprevisibilidade e falta de regularidade do comportamento do mar e outros são devidos a um conhecimento insuficiente no que concerne à escolha das soluções mais convenientes. Em Portugal, este recurso energético está fundamentalmente distribuído ao longo de uma costa com 250 km e por isso, disponível para a exploração de energia.



### ***Energia das ondas - o recurso energético em Portugal***

- Segundo o Ministério da Economia e da Inovação, considerando que em média 15% da energia contida nas ondas pode ser convertida em electricidade, estima-se um potencial de produção de 10 TWh anuais. Supondo uma instalação de 20 MW por quilómetro, a potência instalada poderá atingir os 5 GW. Trata-se ainda de um recurso estável, no qual as pequenas variações que ocorrem podem ser previstas devido à existência de equipamentos de previsão bastante desenvolvidos.
- De acordo com o mapa da disponibilidade da energia das ondas a nível mundial, Figura 1.3 e Figura 1.4, a península Ibérica encontra-se numa das zonas do globo em que o potencial de energia das ondas se encontra mais perto de costa zona de cor laranja. Segundo este gráfico toda a costa de Portugal a norte do cabo Espichel apresenta um potencial de energia das ondas correspondendo a 30 a 40 kW/m, como foi já referido anteriormente.

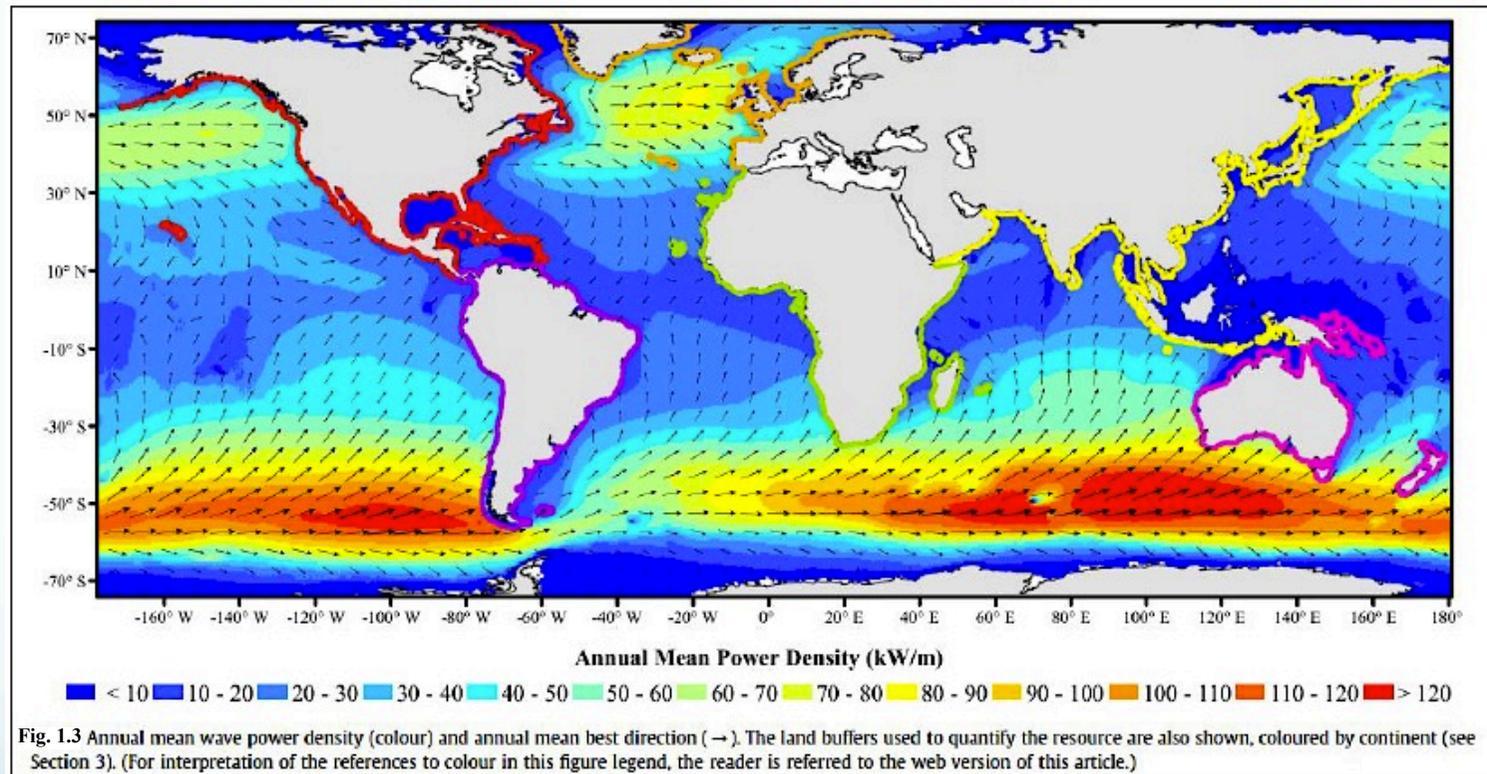
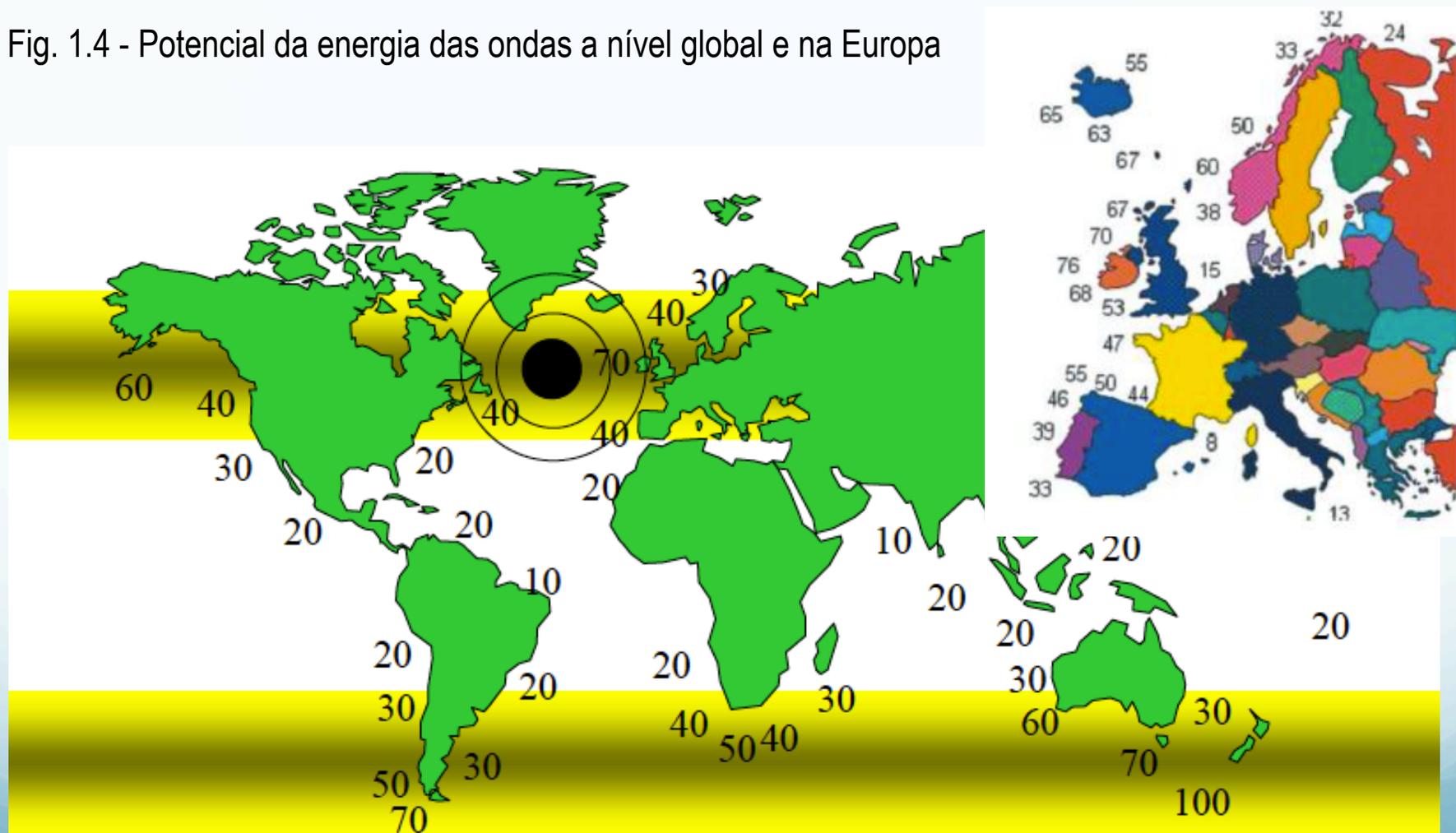


Fig. 1.3 - Potencial da energia das ondas a nível global



Fig. 1.4 - Potencial da energia das ondas a nível global e na Europa



## 2. Classificação das tecnologias existentes



Os dispositivos de aproveitamento da energia das ondas podem ser classificados quer pela sua **localização** quer pelo seu **princípio de funcionamento**. Relativamente ao seu local de instalação (localização), ou seja, a profundidade em que serão instalados, os dispositivos podem ser classificados em **costeiros (shoreline ou onshore)**, **próximos da costa (nearshore)** e **afastados da costa (offshore)**.

- *Dispositivos Costeiros:* são dispositivos que ficam fixos ou que são construídos na orla costeira. A proximidade da orla dá a estes dispositivos vantagens de instalação, manutenção e também dispensa grandes extensões de cabos submarinos. Porém, por outro lado, o fato de estar próximo ao fundo do mar diminui a disponibilidade do potencial de energia a ser absorvida já que as ondas que chegam à costa interagem com o leito oceânico vendo sua energia diminuída. Um dispositivo costeiro consegue utilizar entre 25% a 50% do recurso oferecido.

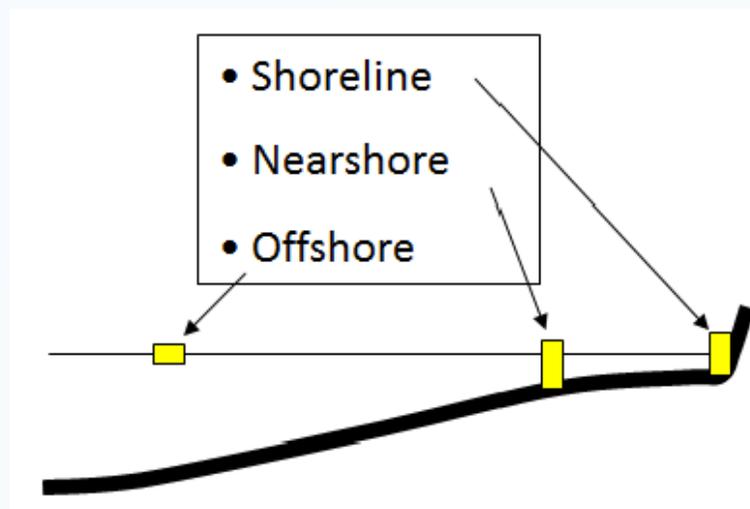


Fig. 2.1 - Esquema referente à localização de dispositivos conversores de energia das ondas

## 2. Classificação das tecnologias existentes



- ✓ Os dispositivos onshore mais desenvolvidos utilizam o princípio da *Coluna de Água Oscilante (CAO)*. Um dispositivo onshore é por exemplo a Central-Piloto da Ilha do Pico, localizada nos Açores, em Portugal.
- *Dispositivos próximos da costa (nearshore)*: Estes dispositivos ficam em zonas mais ou menos afastadas da costa, algo em torno de 20 metros de profundidade, próximos a quebra-mares e molhes. Estes dispositivos ou de *segunda geração*, aproveitam algumas vantagens face às instalações situadas sobre a costa (já que apresentam uma distância razoável para transporte e distribuição da energia produzida) bem com a vantagem de estarem situados numa região com maior potencial de aproveitamento energético das ondas. Contudo, devido à sua distância à costa, apresentam ainda alguns problemas que estão relacionados com o seu impacto ambiental.
- *Dispositivos afastados da costa (offshore)*: São dispositivos (conhecidos também como de *terceira geração*) que exploram ondas mais potentes (ondas de mar aberto), disponíveis em áreas mais fundas (profundidades entre 40 a 50 metros). Como desvantagens, destacam-se a dificuldade de acesso para a instalação e manutenção, além da grande distância para a distribuição da energia gerada, fazendo com que os custos envolvidos sejam bastante elevados. O dispositivo offshore de tecnologia mais avançada, atualmente conhecido, é o sistema *Pelamis*.

## 2. Classificação das tecnologias existentes



Os dispositivos ainda podem ser classificados de acordo com seu **princípio de funcionamento**, ou seja de acordo com a técnica de extração de energia das ondas do oceano, tal como se descreve:

- ◆ Coluna de água oscilante, **CAO ("OWC - Oscillating Water Column")**
- ◆ Corpos oscilantes/flutuantes ("**Oscillating Bodies**")
- ◆ Galgamento ("**Overtopping Devices**")

Atendendo aos dispositivos de corpos flutuantes, estes podem ser sub-classificados de acordo com a colocação da estrutura relativamente à direcção incidente ou devido ao tipo de movimento do dispositivo face às ondas incidentes (Figura 2.2). Para o primeiro caso, os dispositivos podem ser classificados como:

- Absorção pontual ("**Point absorber**")
- Terminais ("**Terminator**")
- Atenuador ("**Attenuator**")

## 2. Classificação das tecnologias existentes

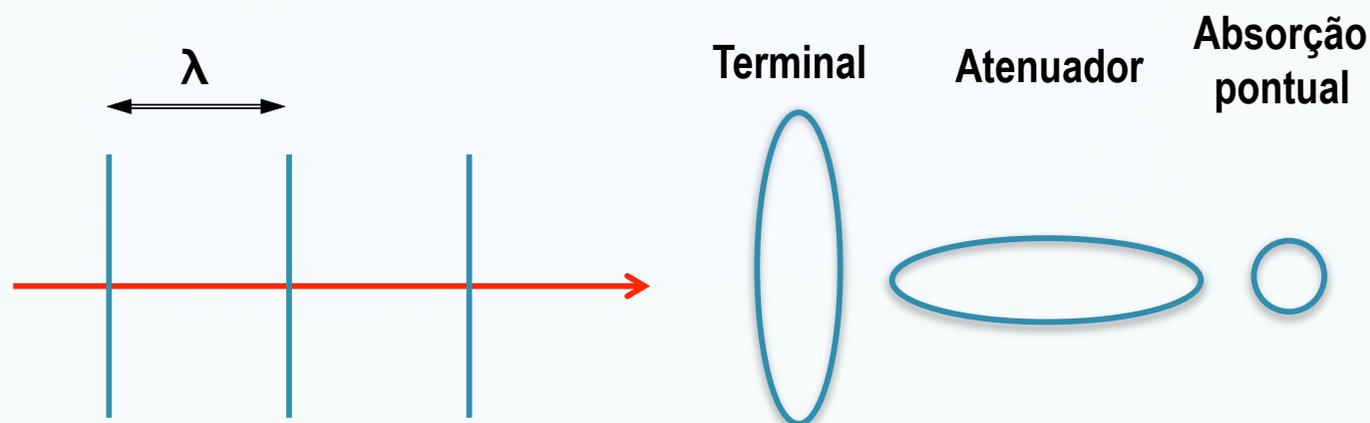


Fig. 2.2 - Classificação dos dispositivos segundo a sua colocação

**2.1 - Sistema Coluna de Água Oscilante (CAO):** trata-se uma estrutura parcialmente submersa, em que a passagem das ondas provoca, respectivamente, um aumento e uma diminuição do nível da água no seu interior. Gera-se assim, uma compressão e uma descompressão do ar que se encontra dentro desse compartimento. Esse ar passa por uma turbina que aciona um gerador, produzindo eletricidade (Figura 2.3). Em relação à turbina, é recomendável que a mesma possua a propriedade de manter o sentido de rotação independentemente do sentido do escoamento, como é o caso das turbinas do tipo Wells.

## 2. Classificação das tecnologias existentes

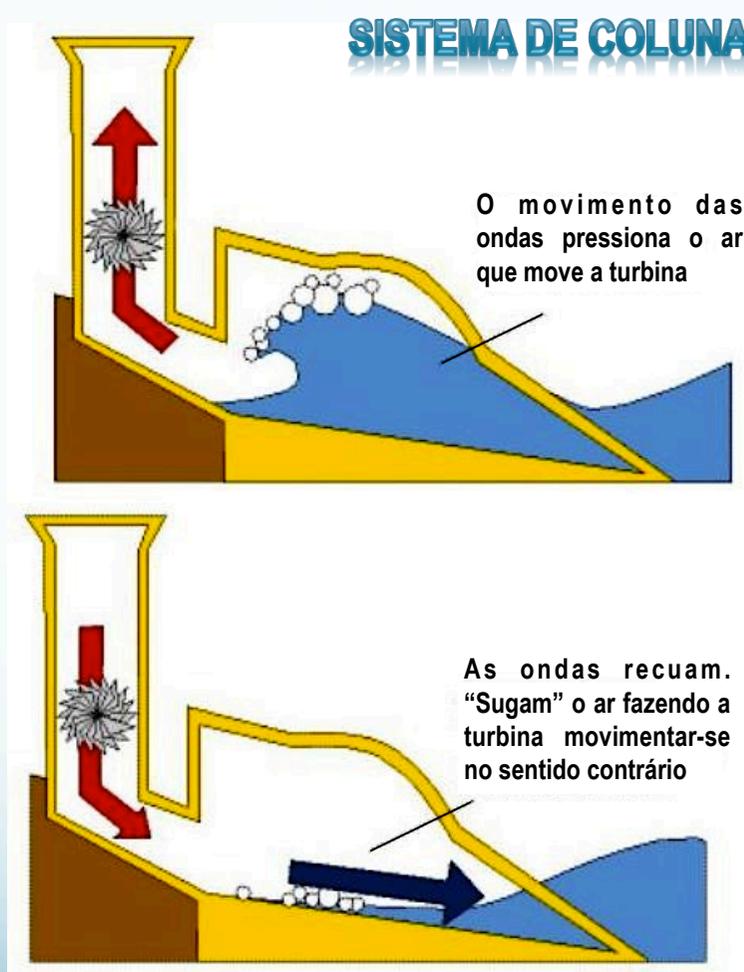


Fig. 2.4 - Coluna de Água Oscilante (GHOSH e PRELAS, 2010)

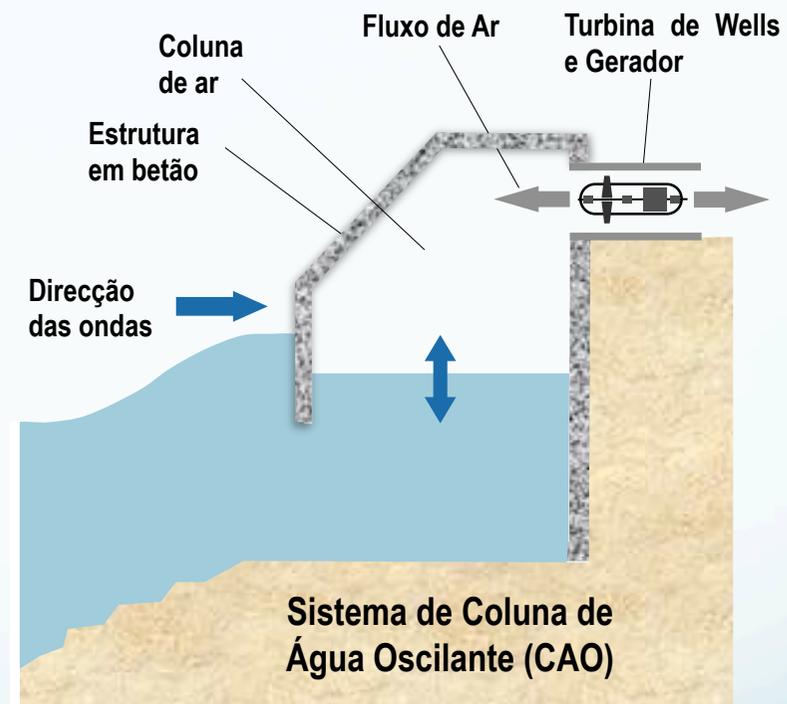


Fig. 2.3 – Sistema CAO: turbina de ar numa instalação na zona de rebentação (Central da ilha do Pico, Açores)

## 2. Classificação das tecnologias existentes



A **central da ilha do Pico** é um bom exemplo de uma central de **CAO** de primeira geração. Com uma potência instalada de 400 kW, é constituída por uma estrutura em betão com uma área interior de 12 m x 12 m ao nível médio da superfície livre, e está assente no fundo do mar numa reentrância da costa onde a profundidade é de cerca de 8 m. A **concepção desta central foi inteiramente Portuguesa**, assim como os fornecimentos, à excepção dos equipamentos mecânicos. Estiveram envolvidas no projecto e construção desta central o Instituto Superior Técnico (responsável científico do projecto comunitário associado), a EDP, a EDA, a Profábril, a PROET, EFACEC, a Marques, Lda e o INETI. O fornecimento dos equipamentos mecânicos esteve a cargo da empresa britânica ART.

### SISTEMA DE COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE (CAO)



Fig. 2.5 - Central Piloto Europeia de Energia das Ondas do Pico, Açores, Portugal

## 2. Classificação das tecnologias existentes

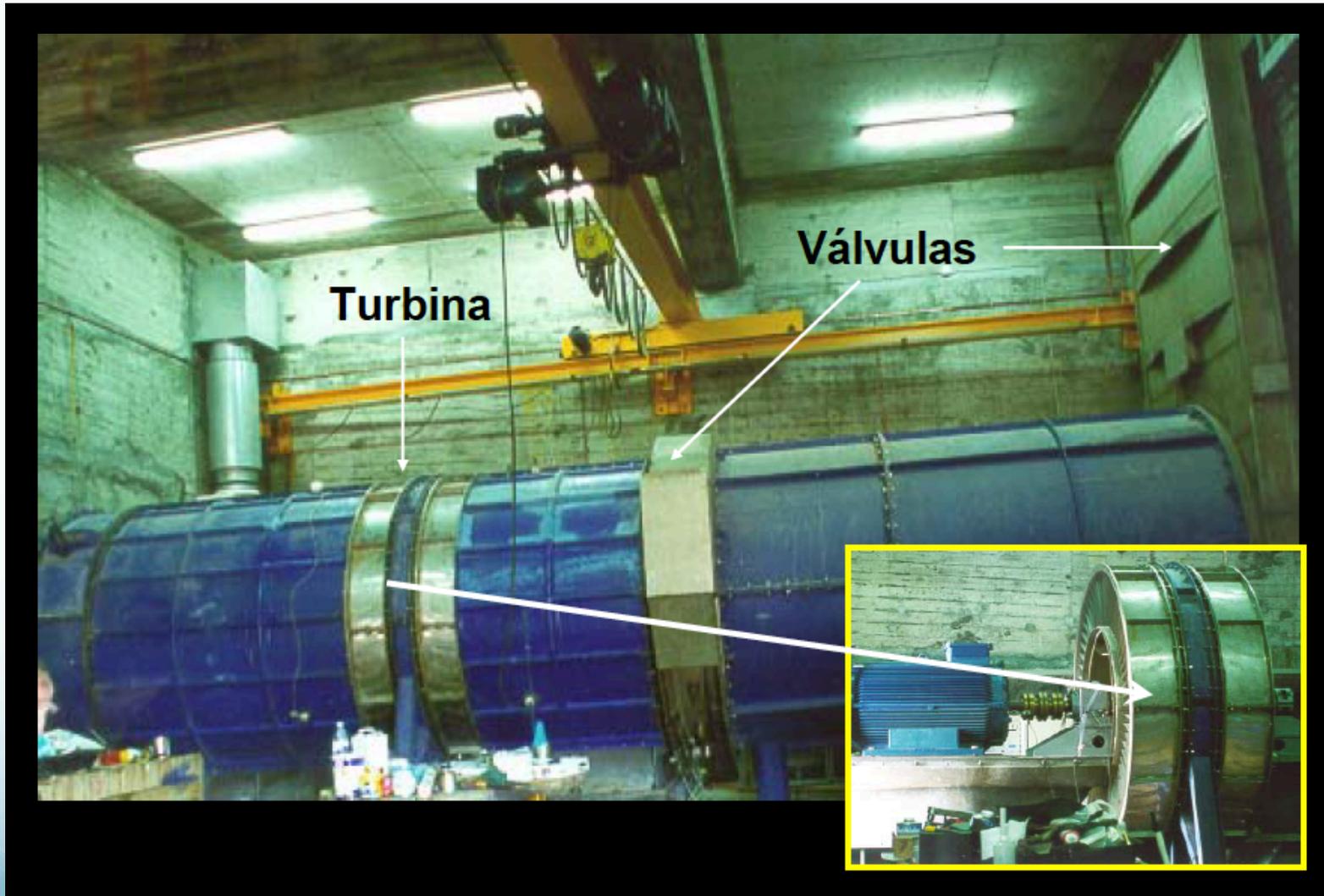


Fig. 2.6 – Central do Pico: sala das máquinas, durante os primeiros testes, 1999  
Joaquim Carneiro, Universidade do Minho (2017)

## 2. Classificação das tecnologias existentes



**2.2 - Sistema Corpos Oscilantes:** a passagem da onda provoca oscilações nesse tipo de dispositivo (sendo a energia extraída desse movimento), as quais impulsionam sistemas hidráulicos que acionam um gerador para a produção de eletricidade.

Os **corpos oscilantes** são de natureza flutuante ou, em algumas configurações, totalmente submersos. Este tipo de dispositivos tira partido da natureza ondulatória da água do mar para acionar directamente um **gerador eléctrico linear**, ou pressurizar um líquido de modo a acionar um turbina ou motor hidráulico associado a uma máquina eléctrica rotativa, para produção de electricidade. São mais adequados para a exploração **offshore**, uma vez que permitem a extração de energia em zonas de grande densidade de potência, ou seja, em zonas aquáticas de grande profundidade (> 40 m).

A sua exploração offshore encerra vários problemas associados à sua ancoragem, manutenção e transporte de energia eléctrica para a costa. Os corpos flutuantes podem ter o seu movimento causado pelas ondas do mar limitado à translação ou à rotação, podendo também existir a combinação dos dois. Os sistemas oscilantes já desenvolvidos dividem-se em várias categorias, dependendo estas da estrutura e modo como absorvem a energia.

## 2. Classificação das tecnologias existentes



### SISTEMA CORPOS OSCILANTES

Estes dispositivos flutuantes podem ser subdivididos em sistemas de **ascensão** (heaving systems), de **rotação** (pitching devices) ou de **progressão** (surging devices). Uma outra classificação plausível é feita tendo em conta a disposição do corpo oscilante relativamente à direcção de propagação das ondas, sendo classificados de **absorção pontual, atenuador e terminal**.

#### ➤ **Sistemas de elevação (Absorção Pontual)**

São sistemas de conversão de energia das ondas em que o sistema de extração de potência é ditado por um movimento de translação vertical de um corpo, podendo este ser flutuante na superfície do nível da água (ou submerso). O movimento vertical dá-se devido à ondulação do mar. Num determinado ponto, o nível de água sobe e desce com uma determinada periodicidade provocando a subida e descida do corpo oscilante. Estes dispositivos são denominados por **sistemas de absorção pontual**, uma vez que, **as suas dimensões horizontais são muito menores que o comprimento de onda das ondas do mar** e são dotados de características axissimétricas, permitindo extrair energia de ondas provenientes de todas as direcções.

## 2. Classificação das tecnologias existentes



### SISTEMA ABSORÇÃO PONTUAL

- Na configuração mais simples trata-se de um único corpo flutuante ou boia que desce ou ascende consoante a cava ou crista da onda, respectivamente. O movimento da boia é de pura translação e efetua-se relativamente a uma estrutura fixa no fundo do mar. Contudo, devido à axissimetria deste tipo de dispositivo, é possível absorver energia de ondas que sejam provenientes de qualquer direcção.

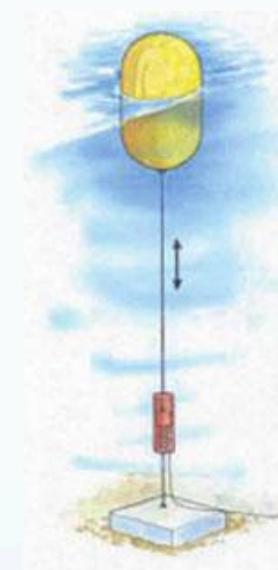
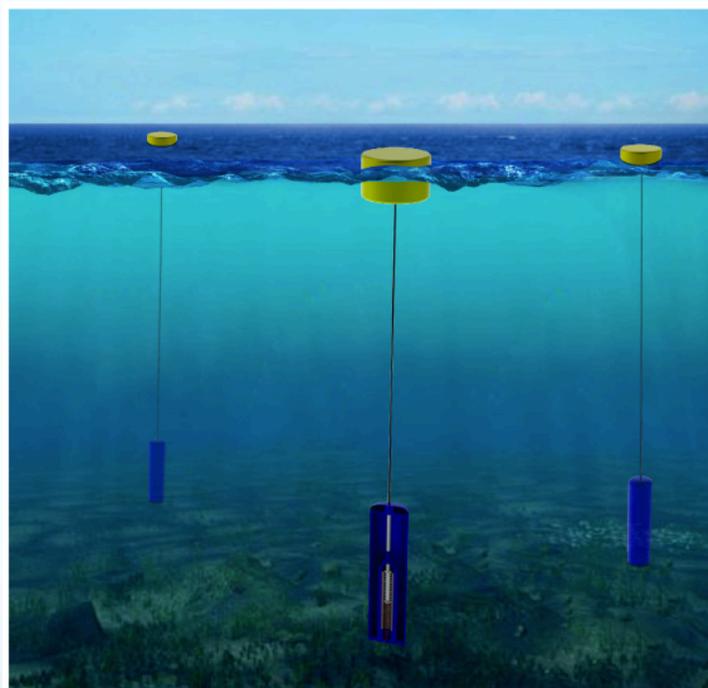


Fig. 2.7 - Exemplo de sistemas de absorção pontual

## 2. Classificação das tecnologias existentes



**Dispositivos Atenuador (pitching devices):** neste tipo de dispositivo a conversão de energia baseia-se na **rotação relativa** de corpos oscilantes segundo o seu eixo longitudinal (**pitch**) em vez da translação como acontece nos dispositivos de elevação. Os sistemas de extração de potência associados a estes dispositivos são geralmente sistemas hidráulicos associados a um gerador eléctrico. Apesar da intensiva investigação científica neste tipo de dispositivos, a maioria destes nunca atingiu a fase de protótipo à escala real. Uma tecnologia de destaque, foi o Cockerell Raft inventado por Sir. Christopher Cockerell.

Esta tecnologia consiste num conjunto de jangadas ligadas por dobradiças (rótulas) a uma estrutura de referência havendo, possivelmente, um sistema hidráulico-eléctrico em cada dobradiça para extração de potência. As jangadas oscilam com o contorno das ondas dando-se, nas dobradiças, um movimento relativo de rotação entre as jangadas e a outra estrutura de referência, que é convertido pelo sistema extrator de potência. Esta tecnologia apesar de não ter sido sucedida, foi a base do desenvolvimento de outras tecnologias mais eficazes na conversão de energia das ondas como o **Pelamis** e a McCabe Wave Pump.

## 2. Classificação das tecnologias existentes



### Dispositivo Atenuador (pitching devices)

O engenheiro britânico Christopher Cockerell, mais conhecido por sua invenção do Hovercraft, também foi muito ativo na investigação sobre a energia das ondas e sugeriu o uso de um conjunto de jangadas articuladas para seguir o contorno das ondas (cava ou crista da onda) à medida que passam (Figura 2.8). O movimento relativo entre cada par de jangadas nas dobradiças fornece energia a um subsistema hidráulico para extração de potência.

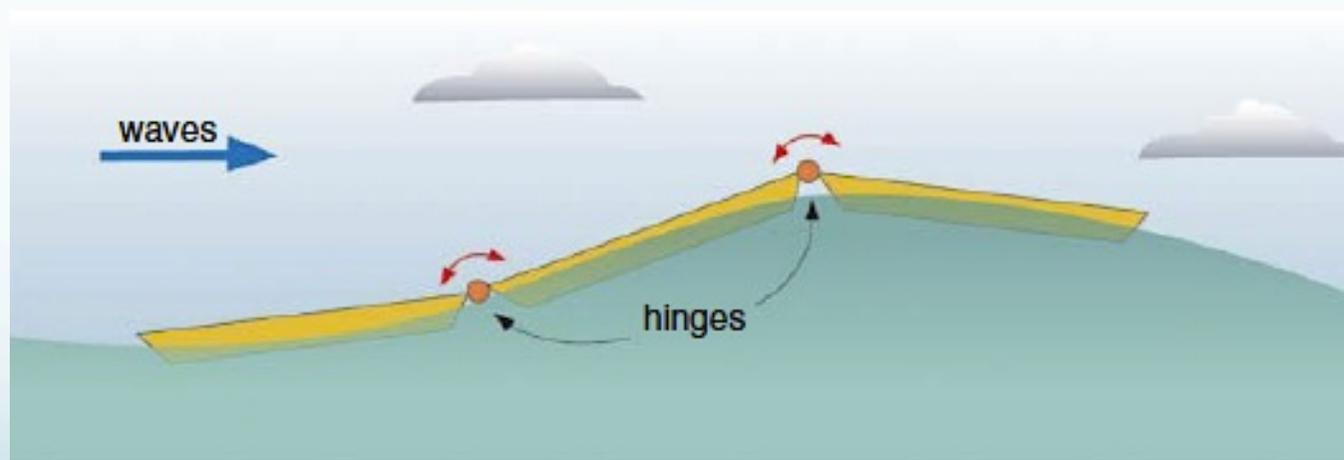


Fig. 2.8 - Exemplo de sistema de jangadas articuladas para seguir o contorno das ondas

## 2. Classificação das tecnologias existentes



### Dispositivos Atenuador (pitching devices)

#### PELAMIS

O Pelamis é um sistema atenuador muito conhecido que representa uma tecnologia desenvolvida pela Pelamis Wave Power Ltd. (anteriormente conhecida por Ocean Power Delivery Ltd) e é um conversor de energia de ondas semi-submerso constituído por várias secções flutuantes de aço (normalmente quatro) que se encontram ligadas por junções (rótulas) articuladas.

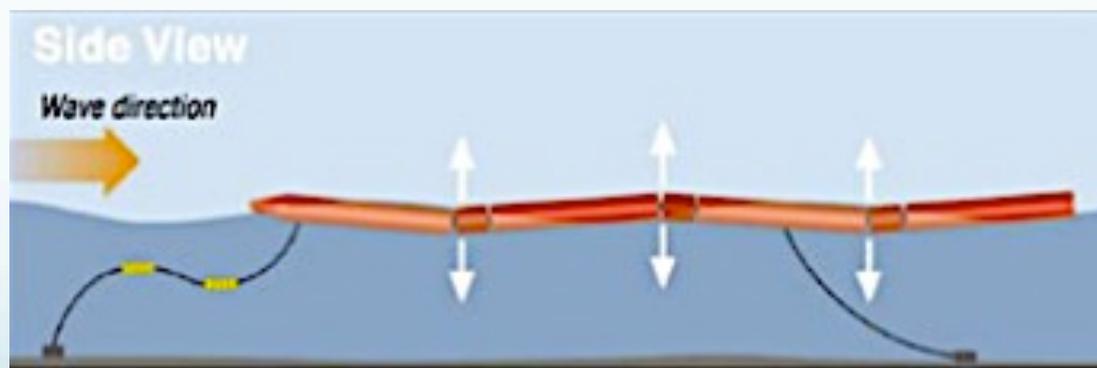


Fig. 2.9 - Desenho esquemático do Pelamis

## 2. Classificação das tecnologias existentes



### Dispositivos Atenuador (pitching devices)

#### PELAMIS

A estrutura total encontra-se atracada com folga ao fundo do mar e é alinhada longitudinalmente com a direcção de propagação das ondas sendo, por esta razão, considerada também como um **dispositivo atenuador**. A ondulação da água induz um momento flector em cada junta da estrutura que é absorvido por cilindros hidráulicos. Estes fornecem óleo a alta pressão a um acumulador que suaviza a potência transmitida no circuito hidráulico. O óleo pressurizado flui do acumulador para um motor hidráulico que, por sua vez, aciona um gerador eléctrico para a produção de electricidade.

- O modelo Pelamis P-750 possui uma potência nominal de 750 kW dividida em três módulos independentes de conversão de energia (250 kW cada), tendo a estrutura um comprimento total de 150 m e 3,5m de diâmetro. Trata-se de um dispositivo offshore (5 a 10 Km de distância e situado em zonas com 50 a 70 m de profundidade. No ano de 2006 foram instalados 3 dispositivos Pelamis a 5 Km da costa **portuguesa na freguesia de Aguçadoura**.

## 2. Classificação das tecnologias existentes



### DISPOSITIVOS ATENUADOR (PITCHING DEVICES)

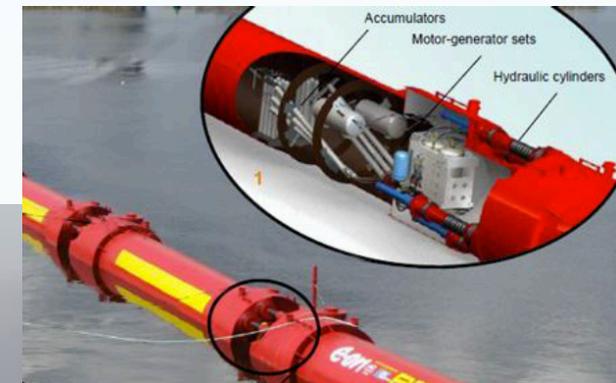
### PELAMIS



(a)



(b)



(c)

Fig. 2.10 – Pelamis: Protótipo de 750 kW (a) vista da parte dianteira durante a construção (b) dispositivo colocado em mar aberto (c) componentes que integram a junta articulada

## 2. Classificação das tecnologias existentes



### Dispositivo de Progressão ou Terminal (surging devices)

Este tipo de dispositivos aproveita a componente horizontal da força das ondas para provocar a oscilação do corpo flutuante. Geralmente, o corpo flutuante encontra-se ligado a um junta articulada (normalmente no fundo do oceano) em torno da qual se dá um movimento de rotação à medida que esta oscila. Deste modo, os dispositivos com estas características têm um comportamento de pêndulo invertido.

- **Swinging Mace:** O Swinging Mace ou martelo baloiçante, é um conceito inventado por Stephen Salter que utiliza as funcionalidades anteriormente descritas. O dispositivo consiste num mastro flutuante simétrico relativamente ao seu eixo vertical que oscila através de uma junta universal fixa no fundo do mar. O dispositivo possui vários cabos que ligam a extremidade superior do mastro e o fundo do mar. O movimento oscilatório do mastro provoca o avanço e retrocesso dos cabos que por sua vez ativam um sistema hidráulico de extração de energia.

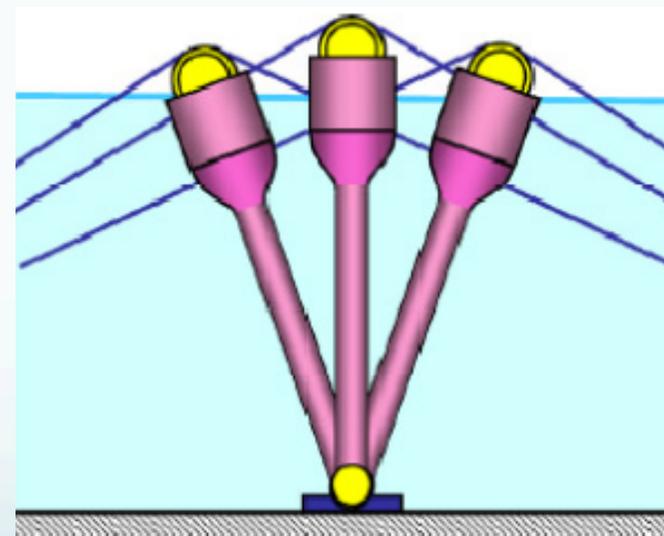


Fig. 2.11 - Desenho esquemático do conceito de Swinging Mace

## 2. Classificação das tecnologias existentes



### 2.3 - Dispositivos de Galgamento (overtopping devices)

Os dispositivos de conversão de energia de ondas através de **galgamento** baseiam-se na captura da água presente na crista das ondas conduzindo-a, por derrame, para um reservatório onde é mantida a uma altura superior ao nível médio da superfície do oceano, armazenando assim energia potencial que é posteriormente convertida em energia útil, escoando a água através de uma ou mais turbinas hidráulicas de baixa queda (turbinas Kaplan), associadas a geradores eléctricos. O modo de conversão de energia assemelha-se ao de uma central hidroelétrica com albufeira. São dispositivos destinados a operar na costa (**shoreline**) ou perto desta (**nearshore**).

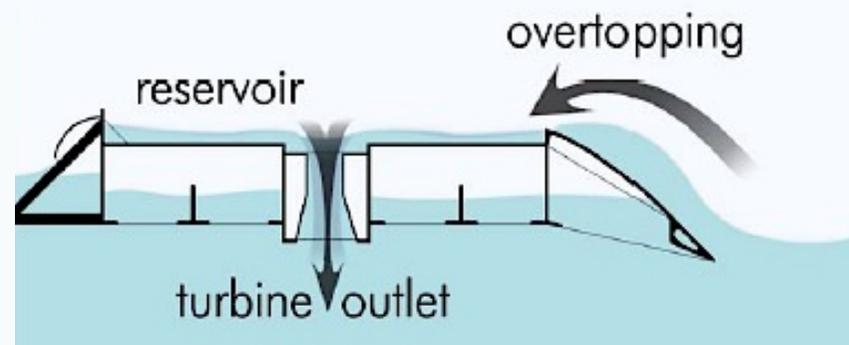


Fig. 2.12 - Princípio de funcionamento dos dispositivos de galgamento

## 2. Classificação das tecnologias existentes



### 2.3 - Dispositivos de Galgamento (overtopping devices)

**Wave Dragon:** o Wave Dragon é um tipo de dispositivo que opera segundo o princípio de **galgamento**. Trata-se de um dispositivo afastado da costa (**offshore**) desenvolvido por um grupo de companhias dirigidas pela *Wave Dragon Aps (DK)*. Trata-se de um dispositivo flutuante bastante pesado (260 toneladas) que se encontra atracado com folga ao fundo do mar. Utiliza dois refletores de ondas, com design patenteado, que concentram as ondas incidentes na direcção de uma rampa com uma forma específica.

Esta rampa, situada entre os dois braços refletores, tem como finalidade amplificar a altura das ondas e forçá-las a entrar num reservatório a uma cota superior ao nível médio da água do mar. São usadas turbinas Kaplan para converter a energia potencial da água em energia mecânica e posteriormente em electricidade através de geradores de ímãs permanentes. Um protótipo com uma envergadura de 58 m (boca do dispositivo à entrada dos concentradores parabólicos) e 260 toneladas foi instalado em Nissum Bredning, Dinamarca, onde foi testado durante muitos anos.

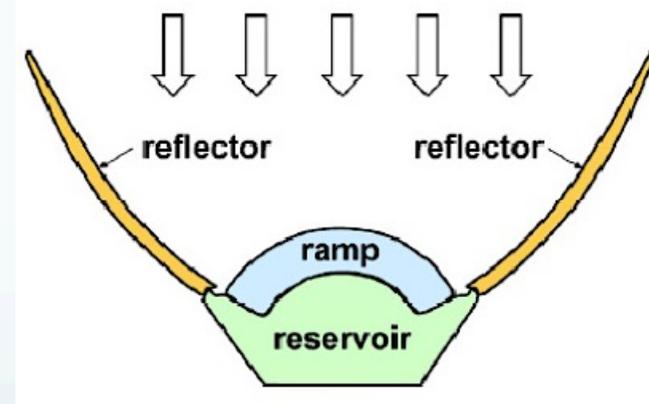


Fig. 2.13 - Desenho esquemático do WaveDragon

## 2. Classificação das tecnologias existentes



### 2.3 - Dispositivos de Galgamento (overtopping devices)

A estrutura deste dispositivo tem um peso absoluto de 260 toneladas, o reservatório tem as dimensões de 26 m × 17 m × 3,6 m e uma capacidade de 55 m<sup>3</sup>.



Fig. 2.14 - Wavedragon. Central piloto no local de teste em Nissum Bredning/Dinamarca numa zona marítima protegida no mar do Norte, a uma profundidade de 6 m.

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.1 - Introdução

- A formação de ondas deve-se a uma manifestação de **forças verticais** que actuam na água com tendência a deformá-la contra a acção da **gravidade** e contra a sua **tensão superficial**. Assim que deformação ocorre, a força gravítica e a tensão superficial actuam de modo a *restabelecer a superfície da água para a sua posição de equilíbrio*. Durante este processo, a inércia subjacente à massa de água faz com que a sua superfície ultrapasse a posição de equilíbrio estabelecendo, deste modo, um movimento oscilatório a nível superficial. Esta oscilação perturba as massas de água adjacentes, implicando a **propagação frontal de uma onda**. À medida que a onda se propaga, o seu movimento oscilatório permanece devido à interação da força gravítica com a inércia das massas de água.

## 3. Ondas Oceânicas



### Introdução

- Subjacente às ondas do mar existe uma elevada quantidade de energia que pode ser convertida noutras formas de energia passíveis de serem utilizadas. A conversão é conseguida através de sistemas cujas características são adequadas para o tipo de ondas das quais se pretende extrair energia. Nesta secção introdutória são mencionados os vários tipos de onda assim como a sua origem.
- Em seguida, é feita a caracterização das ondas em estudo assim como a abordagem à *teoria linear* que rege os princípios básicos da hidrodinâmica das ondas e permite determinar os parâmetros relevantes para a conversão da energia das ondas. Finalmente é descrito e calculado um sistema de conversão de energia das ondas considerado neste curso (**absorção pontual**).

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.2 - Ondas do oceano

As forças que perturbam o estado de equilíbrio da superfície da água do oceano podem ter origem no **vento**, em atividades sísmicas ocorrentes no fundo do oceano, na passagem de um navio ou na atração gravítica entre a terra e outros corpos celestes como a lua e o sol (está na origem das marés). Consoante o tipo de origem da força perturbadora, as ondas formadas possuem diferentes características, nomeadamente diferentes períodos (**T**) e alturas (**H**). As ondas geradas pelo vento têm uma altura típica de 3m e o seu período varia entre 1 a 30 s com valores dominantes de 5 a 15 s para ondas formadas em tempestades marítimas podendo, nesta situação, a altura exceder os 6 metros. As ondas provocadas por **navios** raramente excedem 1 m e possuem períodos de 1 a 3 s. Ondas geradas por atividade sísmica (*tsunamis*) possuem períodos entre os 5 minutos até 1 hora, com alturas inferiores a 1 m. No entanto, à medida que os *tsunamis* se aproximam da costa, a altura da onda aumenta significativamente, podendo a sua altura atingir valores extremamente elevados. As ondas formadas pela atração gravítica entre a terra e a lua são denominadas de **marés** e têm um período elevado, cujo valor varia entre 12 a 24 horas.

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.2 - Ondas do oceano

Entre os vários tipos de onda anteriormente mencionados, as ondas com **origem no vento** são as que mais se manifestam na superfície do oceano e as que maior consideração merecem do ponto de vista da conversão de energia das ondas. Por estas razões será este tipo de onda abordado no presente curso.

#### 3.2.1 - Ondas oceânicas geradas pelo vento

Consideremos em primeiro lugar os efeitos de uma leve brisa com velocidade  $U_0$  sobre a superfície livre (interface ar-mar) da água calma num oceano aberto. Atendendo a que a velocidade do ar é relativamente pequena, o fluxo de ar é laminar. Este fluxo de ar laminar simplesmente arrasta as partículas de água (na sua superfície livre) na direção do fluxo devido às viscosidades do ar e da água. Este fluxo de ar **não produz nenhuma onda**, como ilustrado na Figura 3.1a. Contudo, a formação de ondas geradas a partir do vento inicia-se quando a sua velocidade ( $U_1 > U_0$ ) aumenta até que o seu escoamento junto à superfície livre da água se torne **turbulento**. Nesta situação, surgem flutuações de pressão na superfície da água, causando a sua deformação e gerando pequenas ondulações, denominada por **ondas capilares** (Figura 3.1b). Neste tipo de ondas, a tensão superficial é a força dominante, sendo pouco importantes para a maioria dos problemas de engenharia, devido ao seu baixo conteúdo energético.

### 3. Ondas Oceânicas



#### 3.2.1 - Ondas oceânicas geradas pelo vento

#### ONDAS CAPILARES

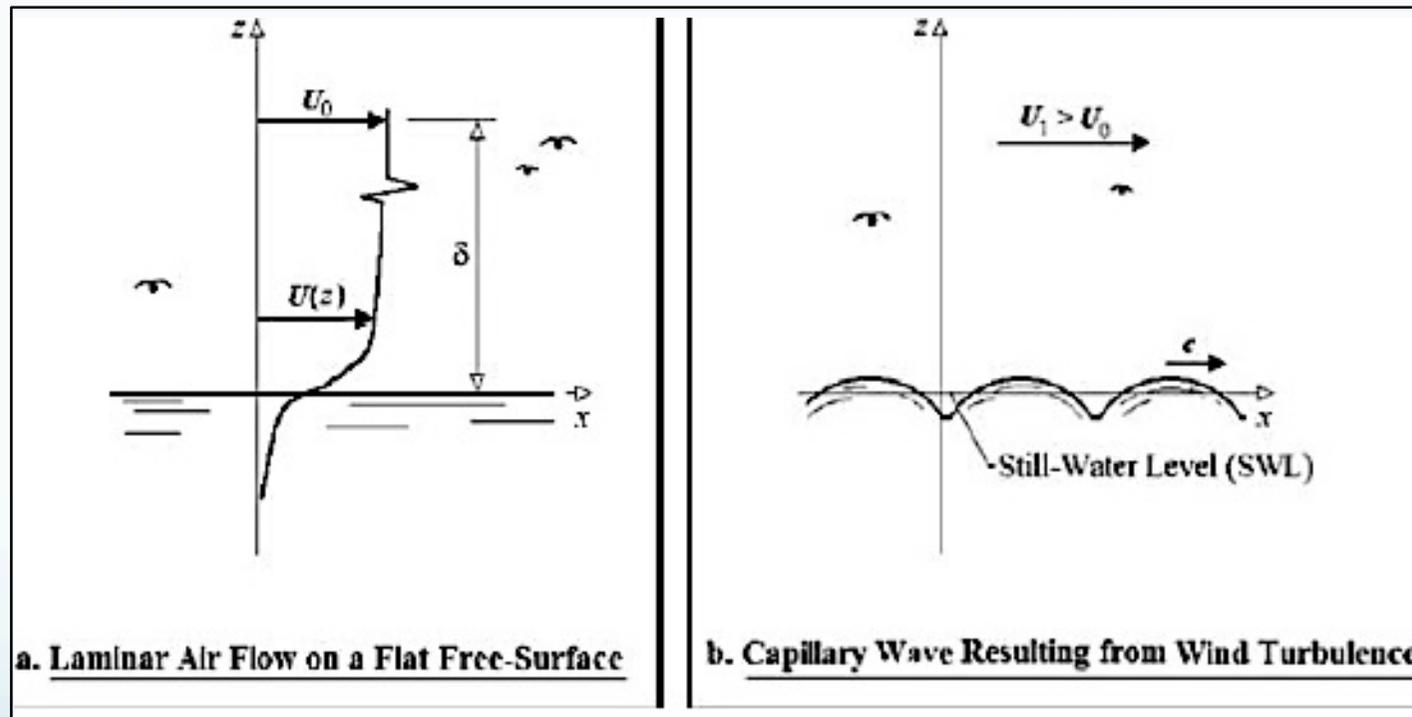


Fig. 3.1. Scenario of Wind-Wave Generation with Increasing Wind Velocity,  $U$ . The capillary wave profile in (b) is influenced by the surface tension.

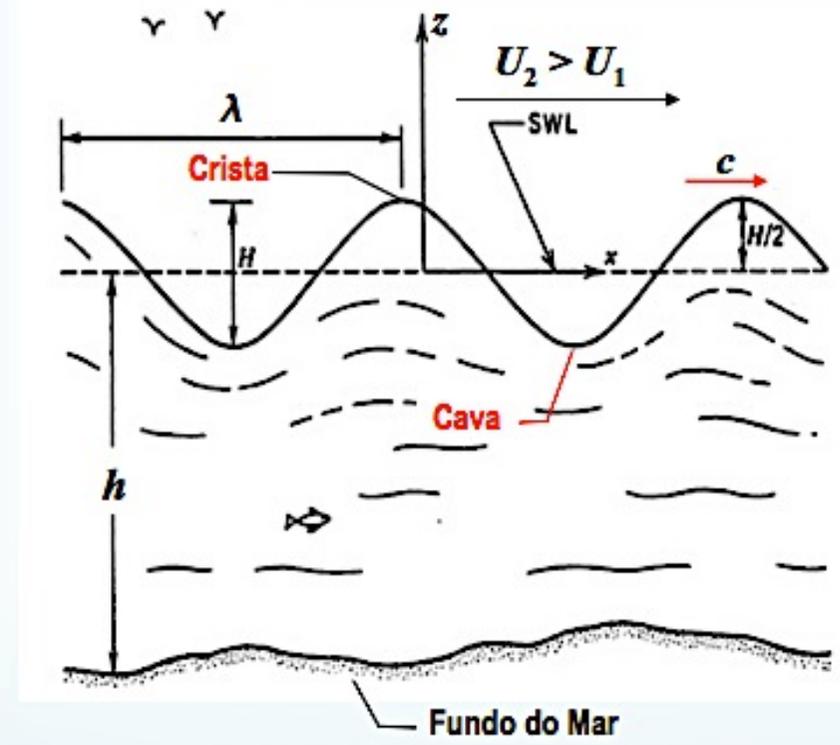
## 3. Ondas Oceânicas



### ONDAS LINEARES

#### 3.2.1 - Ondas oceânicas geradas pelo vento

À medida que a velocidade do vento aumenta ainda mais, o escoamento torna-se ainda mais turbulento e as ondas adoptam um perfil sinusoidal devido à energia para elas transferida. Devido à simplicidade do seu perfil (Figura 3.1c), estas ondas podem ser descritas matematicamente por equações lineares, sendo portanto denominadas de **ondas lineares**. Uma das propriedades das ondas lineares é a que se refere ao princípio da superposição, ou seja, ondas lineares de alturas diferentes (**H**) e comprimentos diferentes ( **$\lambda$** ) podem ser combinadas para formar outros perfis de onda.



C. Sinusoidal Wave on Water of Finite Depth

Fig. 3.1. Scenario of Wind-Wave Generation with Increasing Wind Velocity,  $U$ . (d) Perfil das ondas lineares

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.2.1 - Ondas oceânicas geradas pelo vento

Quando o vento atinge velocidades muito superiores à da simples brisa (ou seja,  $U_3 > U_2 > U_1 > U_0$ ) dá-se um aumento da altura e do comprimento das ondas devido ao gradiente de pressão horizontal que resulta da separação do escoamento de ar no sotavento da crista da onda. Nesta situação, a onda apresenta uma crista afunilada e uma cava ampla, sendo uma descrição mais realista do perfil das ondas do oceano o perfil mostrado na Figura 3.1d), o qual revela um comportamento não linear.

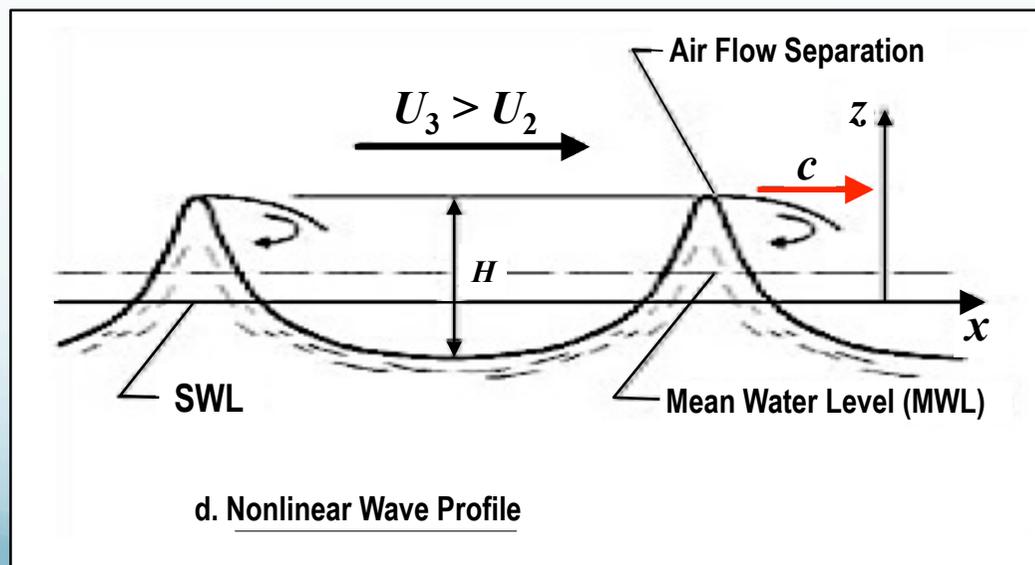


Fig. 3.1. Scenario of Wind-Wave Generation with Increasing Wind Velocity,  $U$ . The separation of the air flow at the crests in (d) and the resulting wakes contribute to the crest profile

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.2.2 - Caracterização das ondas do oceano

- As ondas que descrevem um variação sinusoidal ao longo do tempo são denominadas por monocromáticas ou **harmónicas**. Quando este tipo de variação se refere às ondas do oceano, estas designam-se de **ondas regulares ou lineares** como já foi referido. Independentemente da variação do perfil ao longo do tempo, as ondas podem-se deslocar segundo uma determinada direcção designando-se por **ondas progressivas**. Neste caso, a onda é dotada de uma determinada velocidade de propagação,  $C$ . Apenas as ondas progressivas serão consideradas neste curso já que o dispositivo a estudar destina-se a uma localização longe da costa, fora do alcance de ondas estacionárias (geram-se devido à sobreposição da onda incidente e a onda refletida por um objeto ou uma parede).
- Apesar do perfil das ondas do oceano não ser sinusoidal, estas podem ser analisadas com tal assumindo que o seu comportamento não linear possa ser desprezado. Esta análise é conhecida por **teoria de ondas lineares**, teoria de ondas de baixa amplitude ou **teoria linear de Airy**.

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.2.2 - Caracterização das ondas do oceano

A última designação deve-se ao facto de a teoria ter sido inicialmente formulada por Airy em 1845. A teoria linear das ondas fornece equações que definem grande parte das propriedades cinemáticas e dinâmicas das ondas superficiais cuja previsão destas propriedades, se encontra dentro de determinados limites úteis para a maioria de aplicações práticas. Apesar de ser uma teoria básica, as propriedades que dela dela derivam são bastante próximas das que são realmente observadas desde que a **inclinação da onda** ( $H / \lambda$ ), um parâmetro que será definido mais à frente, seja pequena.

### 3.3. Teoria linear das ondas

A teoria linear é confinada à análise bidimensional das ondas e é obtida através da linearização de equações que definem as condições de fronteira da superfície. As condições de fronteira são:

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3. Teoria linear das ondas

Condições de fronteira:

- ① Condição de fronteira cinemática da superfície (KSBC) – qualquer partícula de água que se situe na sua superfície livre mantém-se nessa superfície, apesar de esta sofrer ondulação devido à propagação da onda.
- ② Condição de fronteira dinâmica da superfície (DSBC) – o valor da pressão relativa na superfície livre é nulo para qualquer posição e instante de tempo.
- ③ Condição de fronteira do fundo do oceano (BBC) – as partículas de água adjacentes ao fundo do oceano não atravessam o fundo sólido, ou seja, a componente vertical da velocidade destas partículas é nula.

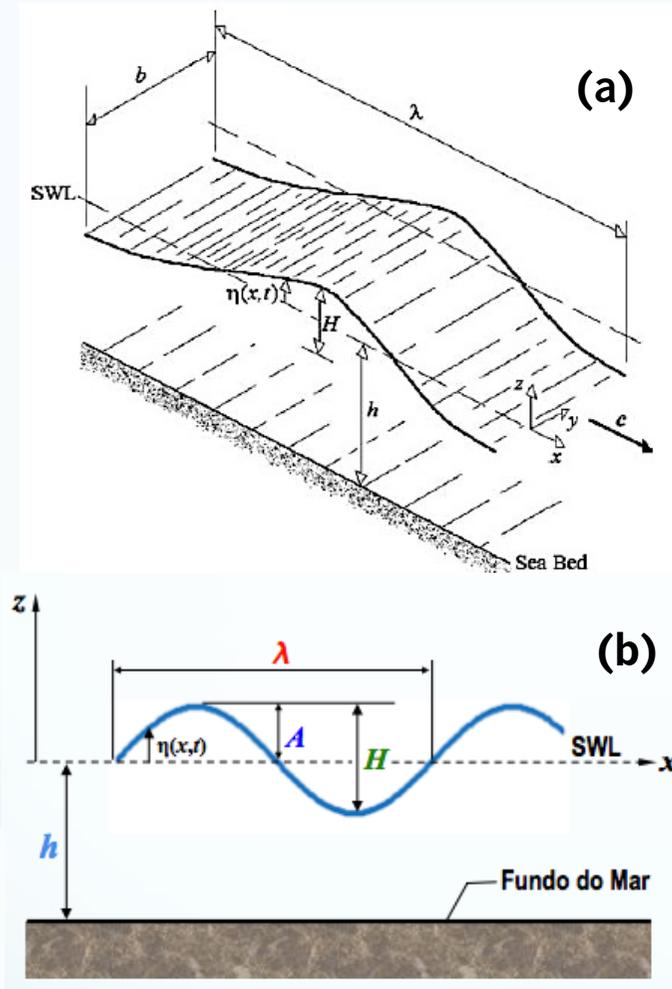
Antes de se apresentar as expressões matemáticas relevantes e parâmetros físicos associados às propriedades hidrodinâmicas das ondas oceânicas é importante considerar as propriedades físicas de uma onda progressiva, conforme esquematizado na Figura 3.2.

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3. Teoria linear das ondas

O nível de água calma (do Inglês, still-water level - **SWL**) representa o nível superfície da água do oceano ausente de ondulação (em condições calmas). O valor da sua cota no referencial cartesiano é nulo. A profundidade (**h**) mede a distância entre o fundo do oceano e o nível de água calma. A onda é ainda caracterizada por uma altura **H** (medida entre a crista e a cava) e um comprimento de onda  $\lambda$  (medido entre duas cristas consecutivas). O deslocamento vertical na superfície da onda  $\eta(x,t)$  é medido em relação ao nível de água calma e representa a deslocação da superfície da onda em função do tempo  $t$  e da distância  $x$  (Figura 3.2a e 3.2b).



**SWL** - nível de água calma

**h** - profundidade (abaixo de SWL)

**c** - celeridade (velocidade da frente de onda)

$\lambda$  - comprimento de onda

**A** - amplitude da onda

**H** - altura da onda

Fig. 3.2 - Notação dos parâmetros físicos bidimensionais para a teoria linear das ondas. (a) esquema 3D e (b) vista longitudinal

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3. Teoria linear das ondas

Normalmente, em problemas bidimensionais de mecânica das ondas, as ondas progressivas são convencionalmente consideradas a movimentarem-se para a direita. Por isso, neste curso também se adopta essa convenção. Considere-se então a onda progressiva esquematizada na Figura 3.2. O deslocamento da superfície livre ( $\eta$ ) causado pela onda é dado pela seguinte equação:

$$\eta = A \cos[k(x - ct)] ; A = \frac{H}{2} \quad (3.1)$$

Como o perfil de superfície livre é sinusoidal no tempo e no espaço, o deslocamento máximo (ou seja, a crista) tomado a partir de SWL ocorre quando

$$k(x - ct) = \pm 2m\pi \quad (\text{com } m = 0, 1, 2 \dots) \quad (3.2)$$

Considere-se em primeiro lugar o caso para o qual  $t = 0$ . A distância na direção  $x$  entre duas cristas sucessivas é o denominado **comprimento de onda**,  $\lambda$ . Da eq. 3.2, obtém-se

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.3)$$

O parâmetro de onda,  $k$ , é designado por **número de onda**.

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3. Teoria linear das ondas

Em seguida, considere-se novamente a expressão da eq. 3.2 quando  $x = 0$ . O intervalo de tempo decorrido entre cristas sucessivas é o denominado **período de onda, T**. Tomando  $x = 0$  na eq. 3.2, obtém-se:

$$kcT = 2\pi \rightarrow kc = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f = \omega \quad (3.4)$$

Nesta equação,  $f$  é a **frequência linear da onda em Hertz (Hz)** e  $\omega$  é a sua **frequência angular** em de radianos por segundo (rad/s). Combinando as eqs. 3.3 e 3.4 através da eliminação do número da onda, é possível obter a expressão para a celeridade ou a velocidade da fase,  $c$

$$kc = \omega \rightarrow c = \frac{\omega}{k} = \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right) \times \omega = \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right) \times \left(\frac{2\pi}{T}\right) = \frac{\lambda}{T} \quad (3.5)$$

Por isso, a eq. 3.1 também pode ser escrita da seguinte maneira

$$\eta = A \cos(kx - \omega t); \quad A = \frac{H}{2} \quad (3.6)$$

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3. Teoria linear das ondas

O **potencial de velocidade**  $\Phi$  é uma função escalar utilizada em mecânica dos fluidos que define o integral do vector velocidade ao longo de uma distância. O vector velocidade pode ser obtido pelo gradiente do potencial de velocidade. Apesar de não ter nenhum sentido físico, esta função escalar é utilizada para descrever o comportamento de um fluido irrotacional, tendo como vantagem a redução de três variáveis dependentes do vector velocidade (**u, v e w**) para apenas uma ( $\Phi$ ) facilitando assim a sua determinação. Para a teoria linear das ondas, é possível obter-se o potencial de velocidade de acordo com a seguinte expressão:

$$\phi = \frac{H}{2} \frac{g}{\omega} \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) \quad (3.7)$$

Note-se que as funções seno e cosseno hiperbólico são dadas por:

$$\sinh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2} ; \cosh(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2} \quad \text{donde} \quad \cosh(x) + \sinh(x) = e^x$$

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3. Teoria linear das ondas

Na teoria linear das ondas, Usando a eq. (3.3) e a eq. (3.7) é possível obter uma expressão para frequência angular das ondas:

$$\omega = \sqrt{gk \tanh(kh)} \quad (3.8)$$

esta última equação permite escrever

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \rightarrow k = \frac{\omega^2}{g \tanh(kh)} \rightarrow \frac{1}{k} = \frac{g \tanh(kh)}{\omega^2} \quad (3.9)$$

Atendendo a que  $\lambda = \frac{2\pi}{k}$  então:

$$\lambda = 2\pi \times \underbrace{\left[ \frac{g \tanh(kh)}{\omega^2} \right]}_{=1/k}$$

Sabendo que  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  então:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kh) \quad (3.10)$$

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3. Teoria linear das ondas

Atendendo à eq. (3.5), ou seja,  $c = \frac{\lambda}{T}$ , então  $\lambda = cT$

Por isso, a eq. (3.10) pode ser rearranjada da seguinte maneira:

$$\lambda = \left[ \frac{gT}{2\pi} \tanh(kh) \right] \times T \quad (3.11)$$

Pelo qua a celeridade da onda pode ser expressa através da seguinte equação:

$$c = \frac{gT}{2\pi} \tanh(kh) \quad (3.12)$$

A equação para o comprimento de onda é transcendental porque  $\lambda$  não pode ser isolado. As relações 3.8, 3.10 e 3.12 são conhecidas como a equação da dispersão, uma vez que são diferentes configurações da mesma expressão. As ondas do oceano são dispersivas, i.e., num grupo de ondas com diferentes períodos ou comprimentos, as ondas mais longas propagam-se a uma celeridade superior, dispersando-se das restantes.

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3. Teoria linear das ondas

#### 3.3.1 Variação de $\lambda$ com a profundidade da água

A partir do conhecimento das funções hiperbólicas, é sabido que  $\tanh(kh)$  aproxima-se da unidade à medida que  $kh$  se aproxima de infinito. O comportamento de  $kh$  será observado se  $h \rightarrow \infty$  ou  $\lambda \rightarrow 0$ . No extremo oposto, onde os valores de  $kh$  são muito pequenos,  $\tanh(kh) \rightarrow kh$ .

Tabela 3.1 – Parâmetros da teoria linear das ondas

$h/\lambda$	$kh$	$\tanh(kh)$
0.01 = 1/100	0.06283..	0.06275..
0.04 = 1/25	0.25313..	0.24616..
0.05 = 1/20	0.31415..	0.30421..
0.10 = 1/10	0.62831..	0.55689..
0.50 = 1/2	3.14159..	0.99627..
1.00 = 1/1	6.28318..	0.99999..

Fisicamente, esta condição corresponde a profundidades de água relativamente pequenas ou comprimentos de onda relativamente grandes. O termo "relativo" é usado porque este comportamento depende da relação  $h/\lambda$  (também denominado por profundidade relativa). Alguns valores práticos da relação  $h/\lambda$  são apresentados na Tabela 3.1, conjuntamente com os valores correspondentes de  $kh$  e de  $\tanh(kh)$ .

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3. Teoria linear das ondas

#### 3.3.1 Variação de $\lambda$ com a profundidade da água

Os resultados da Tabela 3.1 mostram que a diferença entre os valores de  $kh$  e  $\tanh(kh)$  é de aproximadamente 3,16% (ou menos) para os casos em que  $h/\lambda \leq 1/20$ , enquanto que para razões de  $h/\lambda \geq 1/2$  a diferença entre  $\tanh(kh)$  e a unidade é inferior a 0,4%.

Em temáticas adstrita à engenharia dos oceanos, é prática comum dividir o intervalo da razão  $h/\lambda$  em três regiões, sendo estas:

- a) **Águas rasas**:  $h/\lambda \leq 1/20$  de modo que  **$\tanh(kh) \approx kh$**
- b) **Águas intermédias**:  $1/20 < h/\lambda < 1/2$  de modo que  **$\tanh(kh) = \tanh(2\pi h/\lambda)$**
- c) **Águas profundas**:  $h/\lambda \geq 1/2$  de modo que  **$\tanh(kh) \approx 1$**

Os especialistas que trabalham na área da engenharia oceânica podem usar a aproximação de **águas rasas** para obter uma boa estimativa para o comprimento das ondas (bem como a sua celeridade) na zona costeira. Para zonas razoavelmente afastadas da costa os especialistas devem utilizar a aproximação para **águas profundas** a fim de estimarem estes dois parâmetros físicos.

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3. Teoria linear das ondas

#### 3.3.1 Variação de $\lambda$ com a profundidade da água

Tendo em conta as relações anteriores, na estimativa **para águas rasas**, as equações da dispersão (3.8, 3.10 e 3.12) reduzem-se a:

**ÁGUAS RASAS**   $\tanh(kh) \approx kh = 2\pi \left( \frac{h}{\lambda} \right)$

$$\lambda \cong \frac{gT^2}{2\pi} kh = \frac{gT^2}{2\pi} \left( \frac{2\pi h}{\lambda} \right) = \frac{gT^2 h}{\lambda}$$

donde  $\lambda = T\sqrt{gh}$  (3.13)

como  $\lambda = cT \rightarrow c = \sqrt{gh}$  (3.14)

$$\omega = \sqrt{gk^2 h} \quad (3.15)$$

Observa-se que em situações de águas rasas, o comprimento de onda  $\lambda$  é uma função da **profundidade** e do **período**, diminuindo à medida que ambos diminuem. No entanto, a celeridade da onda  $c$  depende apenas da **profundidade** e **independente do período**. Por isso, verifica-se que as ondas diminuem e abrandam à medida que se aproximam do litoral.

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3. Teoria linear das ondas

#### 3.3.1 Variação de $\lambda$ com a profundidade da água

Na estimativa para **águas profundas**, as equações da dispersão (3.8, 3.10 e 3.12 ) reduzem-se a:

**ÁGUAS PROFUNDAS**



$$\tanh(kh) \approx 1$$

$$\lambda \equiv \lambda_0 \equiv \frac{gT^2}{2\pi} \quad (3.16)$$

$$c \equiv c_0 \equiv \frac{gT}{2\pi} \quad (3.17)$$

$$\omega = \sqrt{gk} \quad (3.18)$$

Fisicamente, o resultado das equações 3.16 e 3.17 mostra que o comprimento de onda em águas profundas e a correspondente celeridade são funções apenas do PERÍODO, ambas as grandezas aumentando à medida que o período aumenta. Por isso, verifica-se que as ondas aumentam e são mais rápidas à medida que estão mais afastadas do litoral.

em que o índice “0” é, por convenção, usado para identificar propriedades de águas profundas.

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3. Teoria linear das ondas

#### 3.3.2 Cinemática das partículas

Segundo a teoria linear das ondas, à medida que a onda se propaga, as partículas de água descrevem uma trajetória orbital (Figura 3.3).

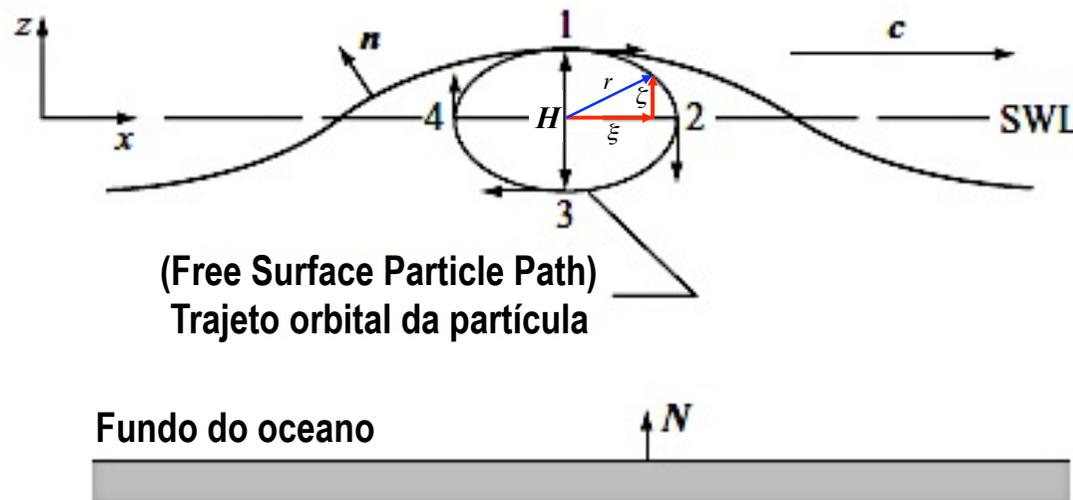


Fig. 3.3 - Trajeto elíptico descrito por uma partícula da superfície da água durante a progressão de uma onda de acordo com a teoria das ondas.

Os números correspondem à passagem da crista da onda (1), dos nós (2 e 4) e da cava (3). Os vetores unitários  $n$  e  $N$  são os vetores normais (para fora) da superfície livre e do fundo do mar, respectivamente.

A Figura 3.2 ilustra o perfil da superfície das ondas. Mas o que acontece sob a superfície e, em particular, como é que as múltiplas partículas de água que formam uma onda se movem realmente? Em primeiro lugar, deve-se entender que é a **energia, e não a água, que “viaja” pela superfície de um oceano!**

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3. Teoria linear das ondas

#### 3.3.2 Cinemática das partículas

Não há translação da massa (das “partículas”) de água; Em vez disso, as “partículas” de água movem-se ao longo de pequenos círculos (Figura 3.3) verticais à medida que cada onda passa. A forma da órbita descrita pela partícula de água varia com a profundidade. Para o caso de **águas profundas**, a **órbita é circular**, com o **diâmetro diminuindo à medida que a profundidade aumenta** (Figura 3.5a). Para águas **intermédias** e rasas, a órbita toma a forma de uma elipse que se torna mais achatada com o aumento da profundidade (Figura 3.5b e 3.5c), como veremos mais adiante.

- No caso bidimensional, as componentes horizontal e vertical da velocidade e do deslocamento das partículas de água podem ser obtidas a partir do potencial de velocidade derivado da teoria linear das ondas. As componentes da velocidade horizontal ( $u$ ) e vertical ( $w$ ) das partículas são dadas, respectivamente, por :

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh[k(z+h)]}{\sinh(kh)} \cosh(kx - \omega t) \quad (3.19)$$

$$w = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh[k(z+h)]}{\sinh(kh)} \sinh(kx - \omega t) \quad (3.20)$$

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3. Teoria linear das ondas

#### 3.3.2 Cinemática das partículas

Os deslocamentos horizontais e verticais ( $\xi$ ,  $\zeta$ ) das de partículas de água sobre um ponto médio fixo ( $x_0$ ,  $z_0$ ) podem ser obtidos substituindo ( $x$ ,  $z$ ) por ( $x_0 + \xi$ ,  $z_0 + \zeta$ ), e finalmente integrando as respectivas expressões de velocidade ao longo do tempo. Referindo-nos à Figura 3.4, as expressões resultantes parao deslocamento são:

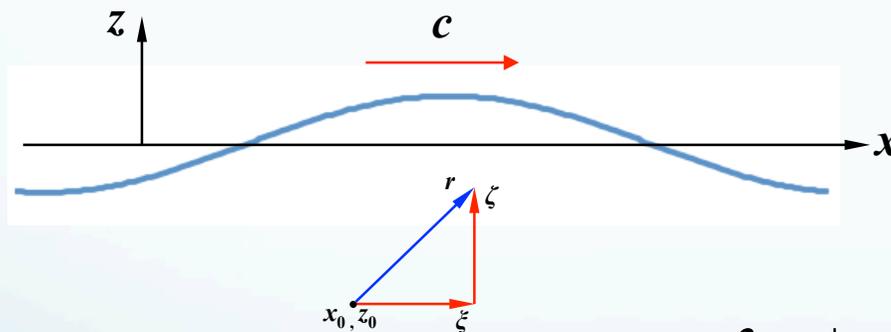


Fig. 3.4 – Vector posição de uma partícula sob uma onda progressiva

$$\xi = \int u dt \Big|_{x_0, z_0} = -\frac{H \cosh[k(z_0 + h)]}{2 \sinh(kh)} \sin(kx_0 - \omega t) \quad (3.21)$$

$$\zeta = \int w dt \Big|_{x_0, z_0} = \frac{H \sinh[k(z_0 + h)]}{2 \sinh(kh)} \cos(kx_0 - \omega t) \quad (3.22)$$

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3. Teoria linear das ondas

#### 3.3.2 Cinemática das partículas

O índice “o” nas equações 3.21 e 3.22 identifica a posição média fixa da partícula ( $x_o, z_o$ ).

- O vetor de posição ( $\vec{r}$ ) da partícula tomado a partir da sua posição média pode ser escrito da seguinte maneira:

$$\vec{r} = \xi \vec{i} + \zeta \vec{k} \quad (3.23)$$

em que  $\vec{i}$  e  $\vec{k}$  são os versores das direções  $x$  e  $z$ , respectivamente.

$$\vec{r} = \frac{H/2}{\sinh(kh)} \left\{ -\cosh[k(z_o + h)] \sin(kx_o - \omega t) \vec{i} + \sinh[k(z_o + h)] \cos(kx_o - \omega t) \vec{k} \right\} \quad (3.24)$$

A eq. (3.24) pode ser estudada para três diferentes casos/regiões **(1) águas profundas**  
**(2) águas intermédias e (3) águas rasas**.

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3. Teoria linear das ondas

#### 3.3.2 Cinemática das partículas

**CASO 1: Águas Profundas** ( $1/2 \leq (h/\lambda) \leq \infty$  , ou  $\pi \leq kh \leq \infty$ )

Para este intervalo  $\sinh(kh) \approx \cosh(kh) \approx e^{kh}/2$  e  $\tanh(kh) \approx 1$ .

Com essas aproximações, a expressão na eq. 3.24 é aproximadamente igual a:

$$\vec{r} = \frac{H_0}{2} e^{-k_0 z_0} \left[ -\sin(k_0 x_0 - \omega t) \vec{i} + \cos(k_0 x_0 - \omega t) \vec{k} \right] \quad (3.25)$$

Aqui, o subtítulo "**0**" identifica propriedades de **águas profundas** e, novamente, "**o**" identifica a posição média da partícula. O sinal negativo que consta na exponencial deve-se ao facto de que abaixo do SWL, os valores de  $z_0$  são negativos. A expressão para  $\vec{r}$  descreve caminhos de **partículas circulares** com diâmetros que **diminuem com a profundidade**. Os gráficos desses caminhos são esboçados na **Figura 3.5a**.

➤ **O diâmetro máximo corresponde a uma posição média no SWL, onde  $z_0 = 0$ .**

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3. Teoria linear das ondas

#### 3.3.2 Cinemática das partículas

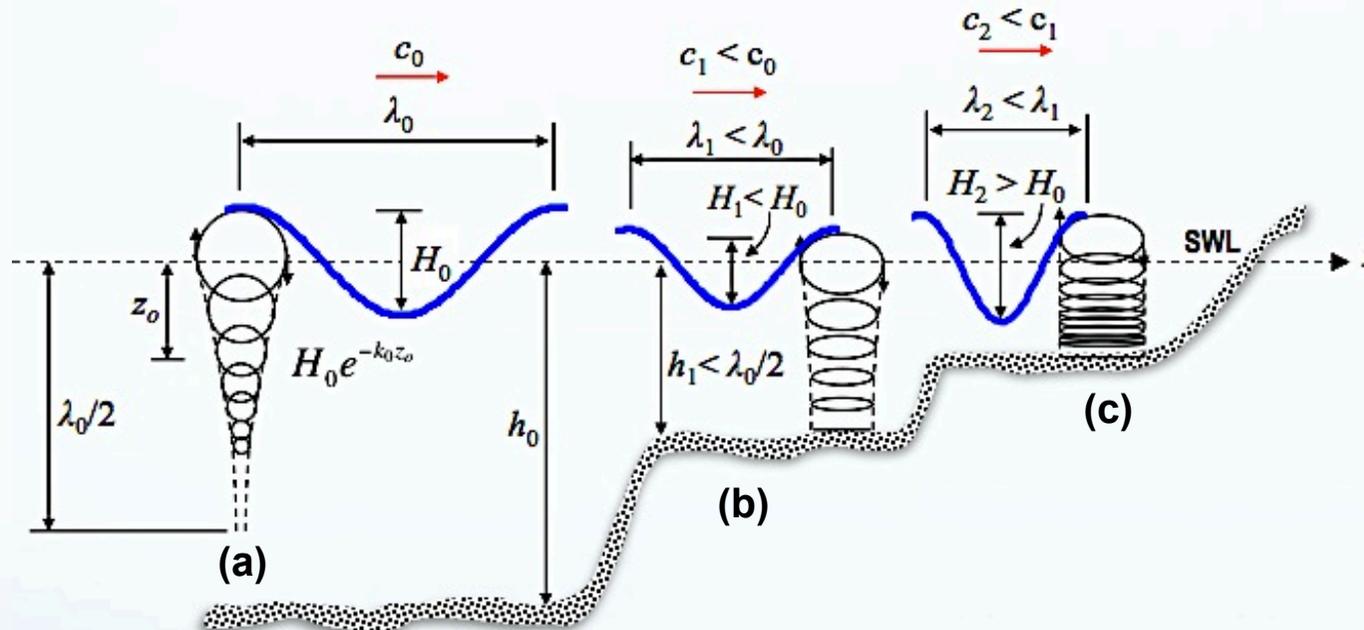


Fig. 3.5a , 3.5b e 3.5c - Trajetórias das partículas de água previstas pela teoria linear das ondas de Airy. As trajetórias para águas profundas na Figura 3.5a são circulares com diâmetros que diminuem exponencialmente com a profundidade. Na Figura 3.15b, as trajetórias para águas intermedias são elípticas, com os eixos maior e menor diminuindo com a profundidade. As trajetórias para águas rasas na Figura 3.5c são elípticas em que os menores eixos diminuem com profundidade e eixos os maiores (principais) mantêm-se uniformes na direção vertical (profundidade).

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3. Teoria linear das ondas

#### 3.3.2 Cinemática das partículas

#### CASO 2: Águas Intermédias

$$\left(\frac{1}{20} < \left(\frac{h}{\lambda}\right) < \frac{1}{2} \text{ , ou } 2\pi/20 < kh < \pi\right)$$

Para esta gama de  $kh$ , a equação para o vetor posição dada na eq. 3.24 deve ser usado como indicado. Os gráficos resultantes da equação estão esboçados na **Figura 3.5b**. Nessa figura, é possível observar-se que as trajetórias das partículas são elipses com os **eixos maiores e menores a diminuírem com a profundidade**. Em  $z_o = -h$ , o eixo menor é zero, e os movimentos das partículas de água são adjacentes ao leito.

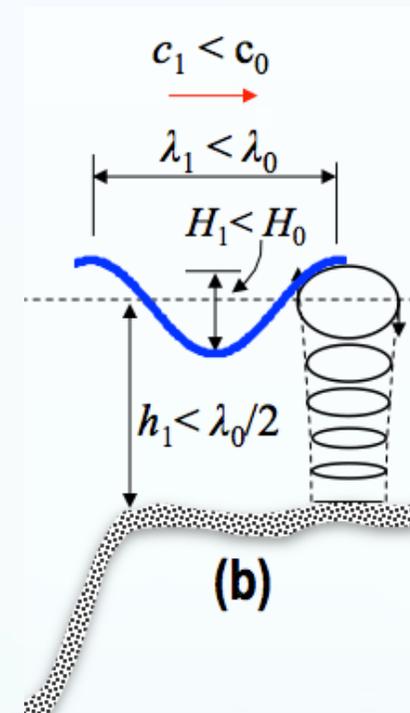


Figura 3.15b - As trajetórias para águas intermédias são elípticas, com os eixos maior e menor diminuindo com a profundidade.

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3. Teoria linear das ondas

#### 3.3.2 Cinemática das partículas

##### CASO 3: Águas Rasas

$$(0 < (h/\lambda) < 1/20, \text{ ou } 0 < kh < 2\pi/20)$$

Observando-se as parcelas das funções hiperbólicas representadas na Figura 3.6, para o caso de águas rasas o intervalo de variação de  $kh$  justifica as aproximações  $\sinh(kh) \approx \tanh(kh) \approx kh$  e  $\cosh(kh) \approx 1$ . Com estas aproximações a eq. 3.24 simplifica-se para:

$$\vec{r} = \frac{H}{2kh} \left\{ -\sin(kx_o - \omega t) \vec{i} + [k(z_o + h)] \cos(kx_o - \omega t) \vec{k} \right\} \quad (3.26)$$

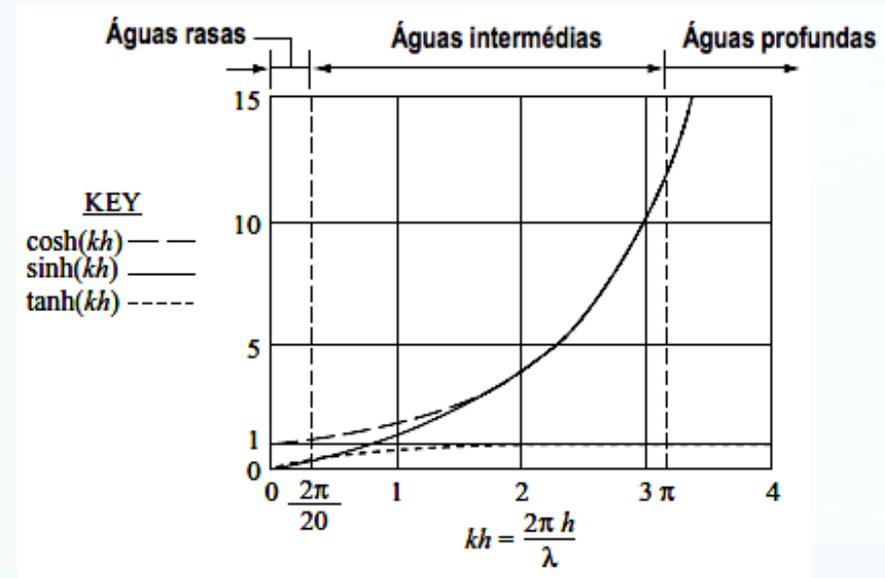


Figura 3.6 – Comportamento das funções hiperbólicas

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3. Teoria linear das ondas

#### 3.3.2 - Cinemática das partículas

**CASO 3: Águas Rasas** ( $0 < (h/\lambda) < 1/20$  , ou  $0 < kh < 2\pi/20$ )

A representação gráfica da eq. (3.26) corresponde também a trajetórias elípticas para as partículas de água; No entanto, para este caso, os eixos maiores (principais) são uniformes e os eixos menores diminuem com a profundidade. Estas trajetórias elípticas estão esquematizadas na Figura 3.5c.

#### 3. 3. 3 - Grupo de ondas

As propriedades até agora mencionadas referem-se apenas a uma onda regular individual. No entanto, as ondas podem propagar-se em grupos de várias ondas individuais. Considerando a hipótese de um fluido irrotacional, na qual se baseia a teoria linear das ondas, os **grupos de onda** são constituídos por ondas regulares sobrepostas formando, neste caso, um padrão irregular (Figura 3.7).

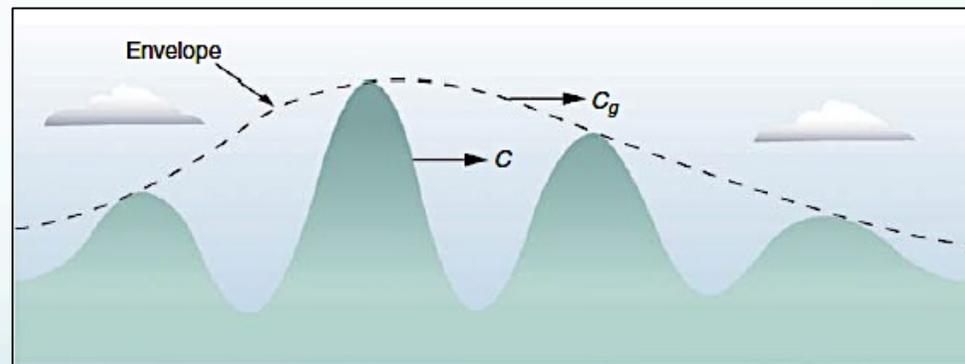


Figura 3.7 – Parte de um “pacote” de um grupo de ondas, mostrando as velocidades de fase e a velocidade de grupo.

## 3. Ondas Oceânicas



### 3. 3. 3 - Grupo de ondas

À medida que o grupo de ondas se propaga, as ondas regulares frontais vão diminuindo em altura, acabando por desaparecer ao mesmo tempo que novas ondas surgem na retaguarda do grupo. A celeridade de um grupo de ondas ( $c_g$ ) é menor que a celeridade de uma onda regular contida no grupo, sendo dada por:

$$c_g = \frac{c}{2} \left[ 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \quad (3.27)$$

Para **águas profundas**, a expressão dentro dos parênteses rectos torna-se igual à unidade. Senão vejamos: para águas profundas a observação da Figura 3.6 permite escrever:

$$\sinh(2kh) \rightarrow \frac{e^{2kh}}{2}$$

e a velocidade de grupo é, para este caso, dada aproximadamente por:

$$c_{g0} = \lim_{h \rightarrow \infty} (c_g) = \frac{c_0}{2} \quad (3.28)$$

onde, tal como anteriormente, o índice "0" refere-se às condições de águas profundas.

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3.3 - Grupo de ondas

Portanto, fisicamente falando, para um grupo de ondas que se propaga na região de águas profundas, a celeridade do grupo ( $c_{g0}$ ) é metade da celeridade da onda individual.

Para o caso de **águas rasas**, a celeridade do grupo mantém-se igual à celeridade da onda individual. Na verdade, observando-se uma vez mais a Figura 3.6, para região de águas rasas

$$\sinh(2kh) \rightarrow 2kh$$

Pelo que a eq. (3.27) é dada aproximadamente por:

$$c_g = \lim_{h \rightarrow \infty} (c_g) = \lim_{h \rightarrow \infty} \left\{ \frac{c}{2} \times \left[ 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \right\} = \frac{c}{2} \times \left[ 1 + \frac{2kh}{2kh} \right] = c \quad (3.29)$$

### 3.3.4 - Campo de pressão

O campo de pressão originado pelas ondas do oceano é dado por

$$c_g = -\rho g z + \frac{\rho g H}{2} \left[ \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh(kh)} \right] \cos(kx - \omega t) \quad (3.30)$$

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3.4 - Campo de pressão

No segundo membro da equação anterior, a primeira parcela corresponde à pressão hidrostática e a segunda à pressão dinâmica induzida pela aceleração das partículas das ondas. Esta equação não é válida para posições da onda acima do nível de água calma (SWL). Em águas profundas, a pressão dinâmica anula-se para distâncias superiores a  $\lambda/2$  abaixo do nível da água calma actuado, neste caso, apenas a pressão hidrostática.

### 3.3.5 – Energia e Potência

Todas as ondas (água, acústica, óptica, etc.) representam energia em transição. Ou seja, a energia é transmitida por ondas de uma região para outra. As ondas da superfície livre da água podem ser produzidas por movimentos de corpos, como por exemplo os navios, terremotos ou pelo **ventos (caso que estamos a considerar neste curso)**, conforme discutido anteriormente. Nesta seção, pretende-se obter as expressões tanto para a **energia média** como também para o **fluxo médio de energia** ou seja, a **potência** das ondas de água.

Iniciamos a nossa análise considerando a energia potencial gravítica de uma massa elementar de água deslocada acima da SWL, conforme esquematizado na Figura 3.8. A massa desse elemento é:

$$\delta m = \rho \eta (\delta x) b$$

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3.5 – Energia e Potência

Na expressão anterior,  $b$  é a largura da crista da onda, e o deslocamento da sua superfície livre ( $\eta$ ) está posicionado na linha vertical de centro do elemento horizontal e verticalmente simétrico.

- É suposto que o comprimento do elemento, ( $\delta x$ ), é suficientemente pequeno para nos permitir desprezar tanto a curvatura da superfície livre ao longo desse comprimento como também assumir que o seu centro de massa está localizado a uma distância  $\eta/2$  acima do SWL.

- Nestas condições, a **energia potencial gravítica elementar** desta massa elementar é então dada por:

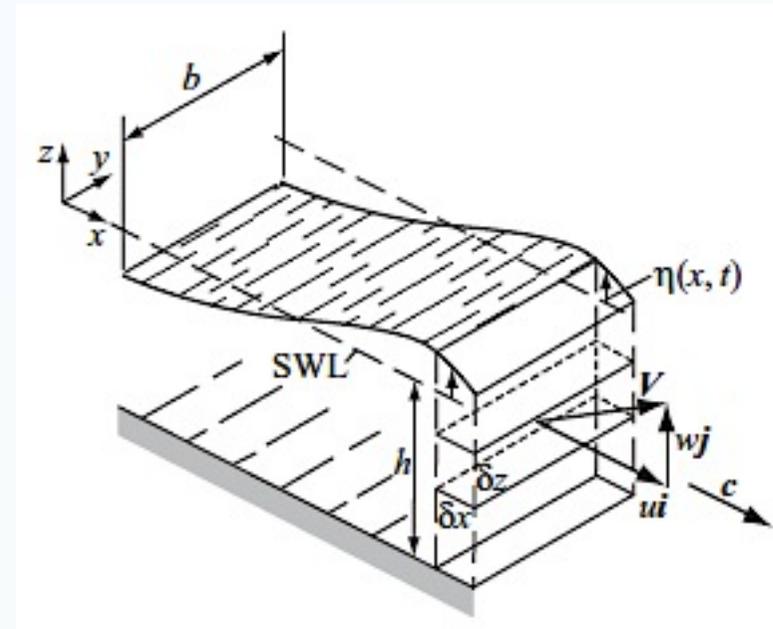


Figura 3.7 – Notação utilizada para analisar a Energia e a Potência (Fluxo de Energia) de uma Onda.

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3.5 – Energia e Potência

$$\delta E_p = (\delta m) \times g \times \left(\frac{\eta}{2}\right) = \frac{1}{2} \rho g \eta^2 (\delta x) b$$

**Energia potencial gravítica** da massa elementar esquematizada na Figura 3.7

A equação para a **energia potencial total** da onda é obtida combinando a expressão anterior com a **eq. (3.1)** e integrando a expressão resultante ao longo de um comprimento de onda. A expressão resultante para energia potencial total é então dada por:

$$E_p = \frac{\rho g H^2}{8} b \int_0^\lambda \cos^2(kx - \omega t) dx = \frac{\rho g H^2 \lambda b}{16} \quad (3.31)$$

- Consideramos agora a **energia cinética** da massa elementar da água submersa que está esquematizada na Figura 3.7. A energia cinética dessa massa elementar é

$$\delta E_c = \frac{1}{2} (\rho b \delta x \delta z) \times (u^2 + w^2)$$

onde, para uma onda linear, as respectivas componentes da velocidade das partículas de água ( $u$ ,  $w$ ) são dadas pelas equações (3.19) e (3.20) apresentadas anteriormente.

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3.5 – Energia e Potência

A combinação das equações (3.19) e (3.20) com a expressão de  $\delta E_c$  e a subsequente integração ao longo da profundidade da água e o seu comprimento de onda, permite a obtenção da equação da energia cinética total para a onda:

$$E_c = \frac{1}{2} \rho b \int_{-h}^0 \int_0^\lambda (u^2 + w^2) dx dz = \frac{\rho g H^2 \lambda b}{16} \quad (3.32)$$

Comparando os resultados das eqs. 3.31 e 3.32, observa-se que a energia total de uma onda linear está repartida igualmente entre a energia potencial e a energia cinética. Por isso, a energia total contida numa onda corresponde à soma das expressões nas eqs. 3.31 e 3.32, ou seja:

$$E = E_p + E_c = \frac{\rho g H^2 \lambda b}{8} \quad (3.33)$$

Por vezes é útil expressar a energia total por unidade de superfície de área, ou seja, por comprimento de onda considerando uma largura unitária ( $b = 1$ ). Assim a energia pode ser definida em termos de densidade, sendo dada por:

$$E_\lambda = \frac{E}{\lambda \times 1} = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (3.34)$$

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3.5 – Energia e Potência

Analisando a eq. (3.33) verifica-se que uma duplicação da altura da onda ( $H$ ) resulta num aumento de quatro vezes na sua energia. Por outro lado, também se observa que a energia é uma função linear do comprimento de onda. Os efeitos de profundidade sobre a energia da onda são demonstrados no exemplo seguinte.

#### ENERGIA DE UMA ONDA REFERENTE A ÁGUAS PROFUNDAS E ÁGUAS RASAS

A combinação da expressão referente à energia total da onda dada pela eq. 3.33 e a expressão do comprimento de onda para **águas profundas** (eq. 3.16) produz o seguinte resultado:

$$E_0 = \frac{\rho g^2 H^2 T^2 b}{16\pi} \quad (3.35)$$

Águas  
Profundas

Da mesma forma, a combinação da expressão referente ao comprimento de onda em **águas rasas** dada pela eq. (3.13) com a expressão da energia total da onda (eq. 3.33) produz o seguinte resultado:

$$E = \frac{\rho g^{3/2} H^2 b T \sqrt{h}}{8} \quad (3.36)$$

Águas Rasas

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3.5 – Energia e Potência

Comparando os resultados das eqs. (3.35) e (3.36), verifica-se que a energia da onda é proporcional ao quadrado do período da onda para o caso de **águas profundas**, mas diretamente proporcional ao período em **águas rasas**.

**EXEMPLO 3.1** - Para ter uma ideia das diferentes magnitudes referentes às energias para **águas profundas** e **águas rasas**, iremos considerar o caso em que as ondas do mar (densidade da água salgada,  $\rho \sim 1030 \text{ kg/m}^3$ ) têm altura  $H = 1 \text{ m}$  e um período  $T = 5 \text{ s}$ . Para a onda de águas profundas, a **energia total por largura unitária** ou também conhecida por **densidade de energia** ( $J_w = E_0/b$ ) é aproximadamente igual a **49 200 J/m** (eq. 3.35).

$$J_w = (E_0/b) = \frac{1030 \times 9,8^2 \times 1^2 \times 5^2}{16\pi} \approx 49199,4 \text{ J m}^{-1}$$

**Águas profundas**

Para a onda em águas rasas, aplicando a eq. 3.36 a uma onda com 1 m de água de profundidade produz uma **densidade de energia** de aproximadamente **19 750 J/m**.

**Águas rasas**

$$E = \frac{1030 \times (9,8)^{3/2} \times 1^2 \times 1 \times 5 \times \sqrt{1}}{8} \approx 19749,51 \text{ J m}^{-1}$$

Joaquim Carneiro, Universidade do Minho (2017)

Estes resultados mostram que ondas com igual altura e período, que se propaguem em **águas profundas** e **rasas**, têm energias significativamente muito diferentes.

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3.5 – Energia e Potência

Como as ondas do oceano representam energia mecânica em transição (transporte de energia na direcção de propagação das ondas), torna-se relevante determinar a taxa de variação temporal da energia por unidade de área normal à direcção de propagação das ondas, designada como **fluxo de energia** ou **potência**.

O fluxo de energia é determinado pelo produto da força induzida (resulta da pressão dinâmica) no plano normal à direcção de propagação da onda e pela velocidade horizontal das partículas de água nesse plano. A partir da teoria linear das ondas, a expressão para o fluxo de energia (**potência,  $P$** ) associada às ondas do oceano é dada por:

$$P = \frac{\rho g H^2 c b}{16} \left[ 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \quad (3.37)$$

Nesta expressão, é possível reconhecer a fórmula para a velocidade do grupo,  $c_g$ , dada na eq. (3.27). Por isso, a eq. (3.37) pode ser reescrita na sua forma mais popular,

$$P = \frac{\rho g H^2 c_g b}{8} \quad (3.38)$$

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3.5 – Energia e Potência

Combinando-se as equações (3.17) e (3.28) com a eq. (3.38), é possível obter a aproximação para **águas profundas** da potência da onda. Senão vejamos:

#### POTÊNCIA DE UMA ONDA REFERENTE A ÁGUAS PROFUNDAS

$$P = \frac{\rho g H^2 c_g b}{8} = \frac{\rho g H^2 b}{8} \times c_g = \frac{\rho g H^2 c_0 b}{16} = \frac{\rho g^2 H^2 T b}{32\pi} \quad (3.39)$$

Comparando esta expressão com a expressão referente à energia para **águas profundas** dada pela eq. (3.35), verifica-se que a energia é proporcional ao *quadrado do período*, enquanto que a potência é diretamente proporcional ao período da onda.

A aproximação para **águas rasas** pode ser obtida por combinação das eqs. (3.38), (3.29) e (3.14), ou seja:

#### POTÊNCIA DE UMA ONDA REFERENTE A ÁGUAS RASAS

$$P = \frac{\rho g H^2 c_g b}{8} = \frac{\rho g H^2 b}{8} \times c = \frac{\rho g H^2 b}{8} \times \sqrt{gh} = \frac{\rho g^{3/2} H^2 b \sqrt{h}}{8} \quad (3.40)$$

## 3. Ondas Oceânicas



### 3.3.5 – Energia e Potência

**EXEMPLO 3.2** – Considere a onda de altura  $H = 1 \text{ m}$  e um período  $T = 5 \text{ s}$  tratada no Exemplo 3.1. Pretende-se comparar a **densidade de potência**,  $J$  (ou seja,  $J = P/b$ ) da onda quando se propaga em águas profundas ou em águas rasas (neste caso, considere que a onda se movimenta num local com 1 metro de profundidade de água, i.e.  $h = 1 \text{ m}$ ).

**Águas Profundas:** Aplica-se directamente a eq. ( 3.39)

$$J_{\text{Aprofundas}} = (P/b) = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} = \frac{1030 \times 9,81^2 \times 5}{32\pi} \approx 4930 \text{ W m}^{-1} = 4,93 \text{ kW m}^{-1}$$

**Águas Rasas:** Aplica-se directamente a eq. ( 3.40)

$$J_{\text{ARasas}} = (P/b) = \frac{\rho g^{3/2} H^2 \sqrt{h}}{8} = \frac{1030 \times 9,81^{3/2} \times 1^2 \times \sqrt{1}}{8} \approx 3960 \text{ W m}^{-1} = 3,96 \text{ kW m}^{-1}$$

### 3. Ondas Oceânicas



#### 4 – Conversão de Energia

Como foi já referido no estudo realizado no Capítulo 2, existem várias técnicas que podem ser utilizadas para a conversão da energia das ondas. O sistema de conversão abordado neste curso converte a energia contida nas ondas em energia eléctrica através do **acionamento direto do gerador**. Existem vários conceitos utilizados na conversão de energia por acionamento direto envolvendo, a maioria, corpos de **absorção pontual acoplados à parte móvel do gerador**. Os corpos de **absorção pontual** podem ser submersos ou **flutuantes**. No caso de corpos flutuantes, estes movem-se relativamente a uma estrutura de referência que poderá ser também flutuante ou fixa ao fundo do oceano (Figura 4.1a, b, c).

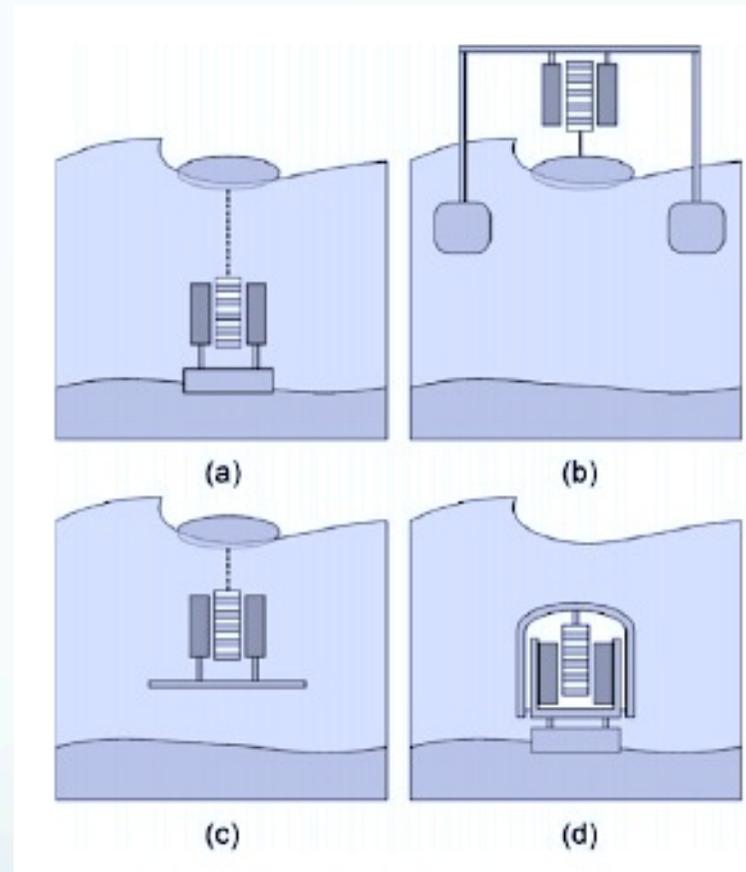


Figura 4.1 – Diferentes conceitos de conversão de energia das ondas por acionamento direto utilizando geradores lineares a) **Absorção pontual** com o fundo do oceano como sistema referência, b) absorção pontual com estrutura flutuante como referência, c) absorção pontual com placa de amortecimento submersa como sistema de referência, d) reservatório de gás submerso com o fundo do oceano como referência.

## 4. Conversão de Energia



### Conversão de Energia

Os dispositivos de conversão de energia por **acionamento direto linear** (utilização de geradores lineares) são caracterizados por baixas velocidades de operação e grandes forças de reacção. Por isso, como dispensam de mecanismos intermédios de conversão, os **geradores lineares** permitem o acionamento direto e reduzem a complexidade mecânica do sistema tornando-se os mecanismos mais adequados para a conversão de energia em sistemas de absorção pontual.

#### 4.1 – Sistema de absorção pontual

O sistema de absorção pontual abordado neste curso, e ao qual o gerador linear se destina, utiliza o conceito ilustrado na Figura 4.1a, ou seja, será um corpo flutuante com o fundo do oceano como referência. A configuração básica deste sistema inclui um **corpo flutuante**, um mecanismo de extração de potência (**gerador**) que é designado por vários autores de **"power take off"** segundo a nomenclatura inglesa, um meio físico que permite o acoplamento entre o corpo flutuante e o **secundário do gerador** (geralmente uma corda) e uma mola de retorno acoplada directamente ao **secundário** (ver Figura 4.2). Esta último componente tem por objetivo auxiliar o sistema corpo/secundário na sua oscilação. Este conceito foi utilizado no dispositivo de absorção pontual desenvolvido pela Universidade de Uppsala, Suécia em 2006.

## 4. Conversão de Energia



### 4.2 – Energia Absorvida pelo corpo flutuante

O corpo flutuante de um sistema de absorção pontual é responsável pela extração da energia das ondas para que esta possa ser convertida em energia eléctrica pelo gerador. Considerando um corpo cilíndrico, para que um sistema seja considerado de absorção pontual, o corpo flutuante tem que verificar a seguinte condição:

$$ka \ll 1 \Leftrightarrow 2\pi\left(\frac{a}{\lambda}\right) \ll 1 \quad (3.41)$$

em que  $k$  é o número de onda e  $a$  o **raio do corpo cilíndrico**. Esta condição indica que as dimensões do corpo flutuante deverão ser muito inferiores ao comprimento da onda incidente.

Joaquim Carneiro, Universidade do Minho (2017)

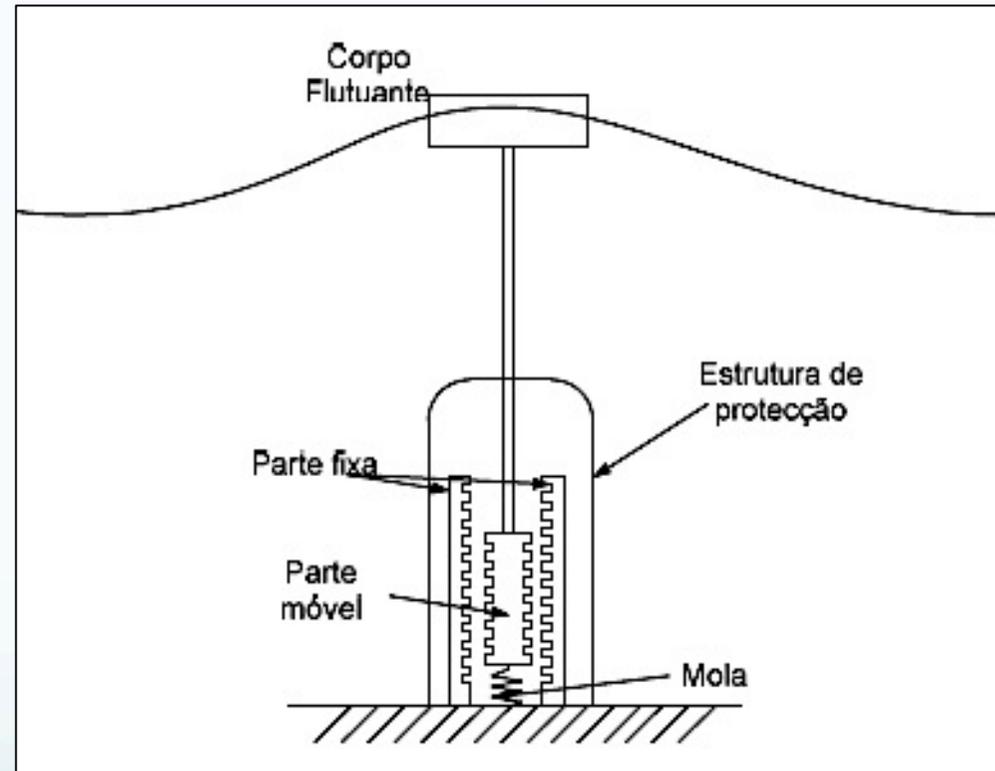


Figura 4.2 – Configuração básica de um sistema de absorção pontual. Corpo flutuante na direção vertical.

## 4. Conversão de Energia



### 4.3 – Energia Absorvida pelo corpo flutuante

O corpo flutuante deste sistema tem apenas um grau de liberdade de movimento, sendo este **vertical, ou seja, de elevação**. Quando uma onda interage com um corpo oscilante, esta é modificada devido aos denominados fenómenos de radiação.

- Mesmo considerando que o corpo esteja em oscilação em águas calmas, este provoca o fenómeno de radiação já que gera ondas devido ao seu movimento periódico. Estas ondas dizem-se ser radiadas do corpo e afastam-se à medida que se propagam, conforme esquematizado na Figura 4.3.

Apenas parte da energia contida nas ondas superficiais do oceano pode ser absorvida por corpos oscilantes. Para que um dispositivo possa extrair energia das ondas, este deve gerar uma onda que interfira destrutivamente com a onda incidente. Deste modo, um dispositivo que seja um bom absorvedor de ondas deve ser também um bom gerador de ondas.

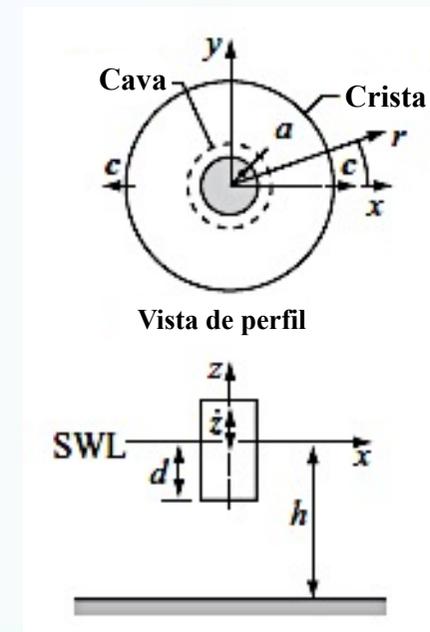


Figura 4.3 – Fenómeno de radiação provocado por um corpo flutuante sobre águas calmas, oscilando na direção vertical.

## 4. Conversão de Energia



### 4.3 – Energia Absorvida pelo corpo flutuante

Segundo *J. Falnes et. al.*, um dispositivo de absorção pontual, cuja geometria do corpo oscilante seja axissimétrica, só pode absorver **50%** da energia contida nas ondas incidentes. Metade da energia incidente é absorvida, sendo a outra metade radiada., ou seja a eficiência ( $\epsilon$ ) de conversão da energia (ou potência) contida na onda é  $\epsilon = 0,5$ . É importante enfatizar que a eficiência  $\epsilon$  de absorção da energia está apenas relacionada com o comportamento **hidráulico e pneumático** do sistema e não com os seus componentes de conversão de energia como por exemplo a turbina, o gerador ou outros componentes.

De acordo com o mesmo autor, é habitual definir-se um limite superior para a razão entre a **potência disponível na onda** e o **volume do corpo flutuante (V)** tendo em conta a maximização da energia absorvida por este.

➤ A expressão que define este limite é: 
$$\frac{P}{V} < \frac{\rho\pi gH}{4T} \quad (3.42)$$

A energia absorvida por um corpo oscilante será sempre inferior ao valor estabelecido por esta desigualdade.

## 4. Conversão de Energia



### 4.3 – Energia Absorvida pelo corpo flutuante

- A utilização de um corpo axissimétrico para absorção da energia das ondas, cuja largura é muito inferior ao comprimento de onda, corresponde a uma técnica de concentração de ondas e é descrita por muitos autores como o **"efeito de antena"**.

*Este termo deve-se ao facto de o corpo absorver energia através da interferência das ondas radiadas com as ondas incidentes.*

- Como o corpo é axissimétrico, as ondas são radiadas (ver Figura 4.3) permitindo a absorção de energia de ondas provenientes de todas as direcções. Assim, as ondas são concentradas no corpo flutuante, fenómeno semelhante ao das ondas rádio incidentes numa antena sintonizada (de onde surge o termo **"efeito antena"**).
- Importa ainda realçar que para que o sistema oscilante absorva a energia disponível nas ondas nas designadas condições óptimas (ideais), o sistema oscilante deveria encontrar-se em **ressonância** com a onda incidente, ou seja, a sua frequência natural de vibração deve igualar a frequência da onda incidente.

## 4. Conversão de Energia



### 4.4 – Interação entre as ondas e o corpo flutuante

O movimento do sistema de conversão de energia das ondas (ver Figura 4.2) tem apenas um grau de liberdade, segundo a direcção vertical. Quando uma onda incidente interage com o corpo flutuante, este sofre uma força vertical que provoca a elevação do corpo (Figuras 4.2 e 4.3) assim como das partes móveis a este acopladas. Deste modo, pela força induzida ao longo do deslocamento vertical é transmitida energia ao corpo flutuante, pelas ondas. A taxa de transferência desta energia é condicionada pela velocidade vertical do corpo ( $V_z$ ), a qual depende da frequência de oscilação das ondas,  $\omega$ . Conhecendo a amplitude de oscilação ( $A = H/2$ ) e a frequência da onda incidente, a velocidade máxima do corpo flutuante e consequentemente da parte móvel do gerador, é dada pela seguinte equação:

$$V_z = \omega A \quad (3.43)$$

Por outro lado, o movimento oscilatório do corpo flutuante causa perturbações na **quantidade água** que a ele lhe está adjacente. Devido à oscilação do corpo, esta quantidade de água acompanha o movimento do corpo, tornando-se numa **massa adicionada** que influenciará a frequência natural do sistema.

## 4. Conversão de Energia



### 4.4 – Interação entre as ondas e o corpo flutuante

- ✓ **Massa Adicionada**: corresponde à massa da quantidade de água que é afetada pela presença de uma estrutura fixa num fluido móvel, ou que é afetada pelos movimentos de uma estrutura em num fluido estacionário.

Ou seja, no nosso caso, a **massa adicionada** ( $a_w$ ) corresponde à massa da quantidade de água ambiente (i.e. em torno do corpo) que é excitada pelo corpo flutuante instável em movimento oscilatório. A soma da **massa adicionada** com a massa do corpo em movimento é, por vezes, denominada por massa virtual.

A **massa adicional** ( $a_w$ ) é calculada através das seguintes expressão:

$$a_w = \rho \pi a^3 \left\{ \frac{a}{8(h-d)} - \frac{a}{2h} \left[ \gamma + \ln \left( \frac{ka}{2} \right) \right] \right\} \quad (3.44)$$

em que  $d$  corresponde à altura imersa do corpo flutuante (aproximadamente igual a 2/3 da sua altura),  $a$  é o raio do corpo cilíndrico e  $\gamma = 0,5772157$  é a constante de Euler.

## 4. Conversão de Energia



### 4.4 – Interação entre as ondas e o corpo flutuante

A **frequência natural de oscilação** (vertical) do sistema ( $\omega_n$ ) é calculada através da seguinte expressão:

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T_n} = \sqrt{\frac{\rho g A_{wp} + k_s}{m + a_w}} \quad (3.45)$$

Na expressão (3.45), o termo  $\rho g A_{wp}$  refere-se ao amortecimento hidrostático,  $m$  é a massa do corpo flutuante enquanto que  $k_s$  representa a constante de rigidez da mola de retorno, acoplada directamente ao à parte móvel (**secundário**) do gerador linear (ver Figura 4.2). Para um corpo oscilante de geometria circular,  $A_{wp} = \pi a^2$  representa a área projetada do corpo. É importante estimar o valor da frequência natural da parte oscilante do dispositivo já que o corpo flutuante atinge a máxima absorção de energia quando a sua frequência natural de oscilação ( $\omega_n$ ) iguala a frequência da onda incidente,  $\omega$  (condição de ressonância). Deste modo, sabendo ambas as frequências pode-se avaliar se o sistema opera dentro condições óptimas de funcionamento.

## 4. Conversão de Energia



### 4.4 – Interação entre as ondas e o corpo flutuante

De acordo com o que anteriormente foi já mencionado, da **potência disponível nas ondas**, apenas parte é transferida pelo corpo para o gerador. Devido ao fenómeno de radiação (ver Figura 4.3) e aos efeitos da viscosidade da água do mar (**causando amortecimento no movimento oscilatório**), parte da energia disponível é perdida limitando a **energia útil** para conversão. Por isso, desprezando-se as perdas de energia em componentes mecânicos, a **potência útil absorvida ( $P_u$ )**, disponível para o gerador é:

$$P_u = P - P_r - P_a \quad (3.46)$$

em que **P** é a potência disponível da onda, **P<sub>r</sub>** é a potência radiada e **P<sub>a</sub>** é a perda de potência devido ao fenómeno de amortecimento causado pela viscosidade da água do mar. De acordo com *Ivanova, et al.*, a utilização prática de conversão de energia demonstra que apenas **20%** (ou seja,  **$\mu = 0,2$** ) da densidade de potência (**J**) disponível na onda é efetivamente aproveitada pelo corpo. Deste modo, a potência útil absorvida por um corpo cilíndrico é dada por:

$$P_u = \mu \times J \times D \quad (3.47)$$

em que **D** é o diâmetro do corpo flutuante

## Problema Proposto



### Modelação mecânica do dispositivo de absorção pontual

Neste exercício pretende-se que seja efetuada a modelação do dispositivo de conversão de energia, esquematicamente representado na Figura 4.4. A modelação mecânica do dispositivo deverá ser realizada através do dimensionamento do corpo flutuante, nomeadamente a determinação da sua constante de mola, e as características dinâmicas de operação face às ondas incidentes numa zona do oceano localizada no norte de Portugal, designadamente **Esposende**. Em última instância pretende-se que o estudante determine a potência útil absorvida pelo corpo cilíndrico a partir da avaliação da densidade de potência ( $J$ ) disponível nas ondas incidentes na região de Esposende. As características da onda são aquelas que constam na Tabela 4.1. Neste exercício admite-se que a densidade da água do mar é  $\rho = 1030 \text{ kg.m}^{-3}$ .

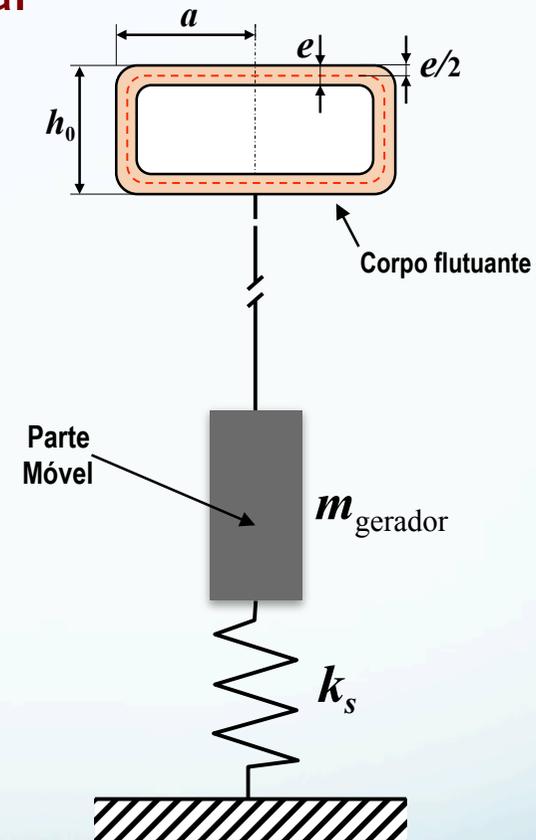


Figura 4.4 – Ilustração esquemática do sistema oscilante do dispositivo de conversão.

## Problema Proposto



### Modelação mecânica do dispositivo de absorção pontual

Tabela 4.1 – Parâmetros característicos da onda incidente na região de Esposende, Norte de Portugal

Altura, $H$ (m)	Período, $T$ (s)	Profundidade, $h$ (m)
1,97	5,96	30,0

O corpo flutuante esquematizado na Figura 4.4 tem **forma cilíndrica** e as suas dimensões são as que constam na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Dimensões do corpo flutuante

Altura, $h_0$ (m)	Raio, $a$ (m)	Espessura, $e$ (m)
1,5	1,2	0,1

Para o material do corpo flutuante foi selecionado o **alumínio** com uma massa específica  $\rho_{Al} = 2700 \text{ kg.m}^{-3}$ . Para a parte móvel do gerador considera-se uma massa  $m_{\text{gerador}} = 1000 \text{ kg}$  que engloba o **secundário** e o **veio**. Considere que a altura submersa do corpo flutuante é  $d = 1,0 \text{ m}$ .

# Problema Proposto



A Figura 4.5 corresponde a um esquema 3D do corpo flutuante ao gerador linear.

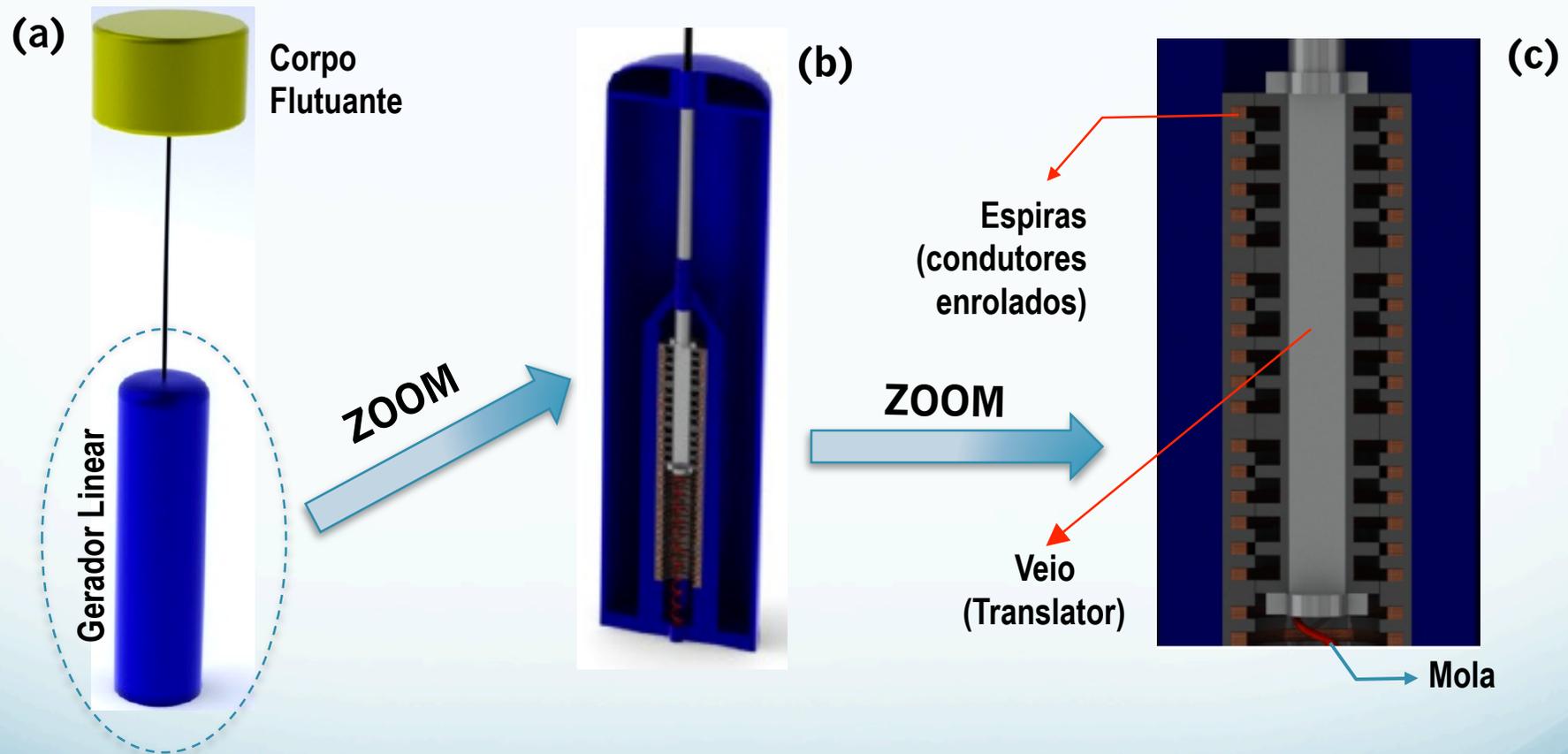


Figura 4.5 – Ilustração 3D do sistema sugerido para o sistema de conversão de energia das ondas. (a) vista exterior ; ( b) vista interior (corte transversal) e (c) pormenor do corte transversal.



### Modelação mecânica do dispositivo de absorção pontual

#### Gerador Linear

Os geradores lineares são semelhantes aos geradores rotativos convencionais (no entanto, muito menos complexos no que concerne ao seu processo construtivo) na medida em que ambos convertem energia mecânica em energia elétrica; No entanto, o rotor no **gerador linear** (em Inglês é denominado por **translator**) é uma peça linear (**veio**) que se move para cima e para baixo, ao contrário do que acontece no movimento rotacional de um rotor tradicional.

O princípio de funcionamento de um gerador linear consiste no movimento do translator (veio), no qual são montados **ímãs permanentes** com **polaridade alternada**, causando uma corrente induzida no **estator** (ou **primário** que contém fios condutores de enrolados/espiras). A corrente induzida aparece devido à variação do fluxo das linhas do campo magnético através da área das espiras à medida que o veio se movimenta (**Lei de Faraday**).

Alguns detalhes do gerador linear são mostrados nas Figuras 4.6a, 4.6b e 4.6c.



## Modelação mecânica do dispositivo de absorção pontual

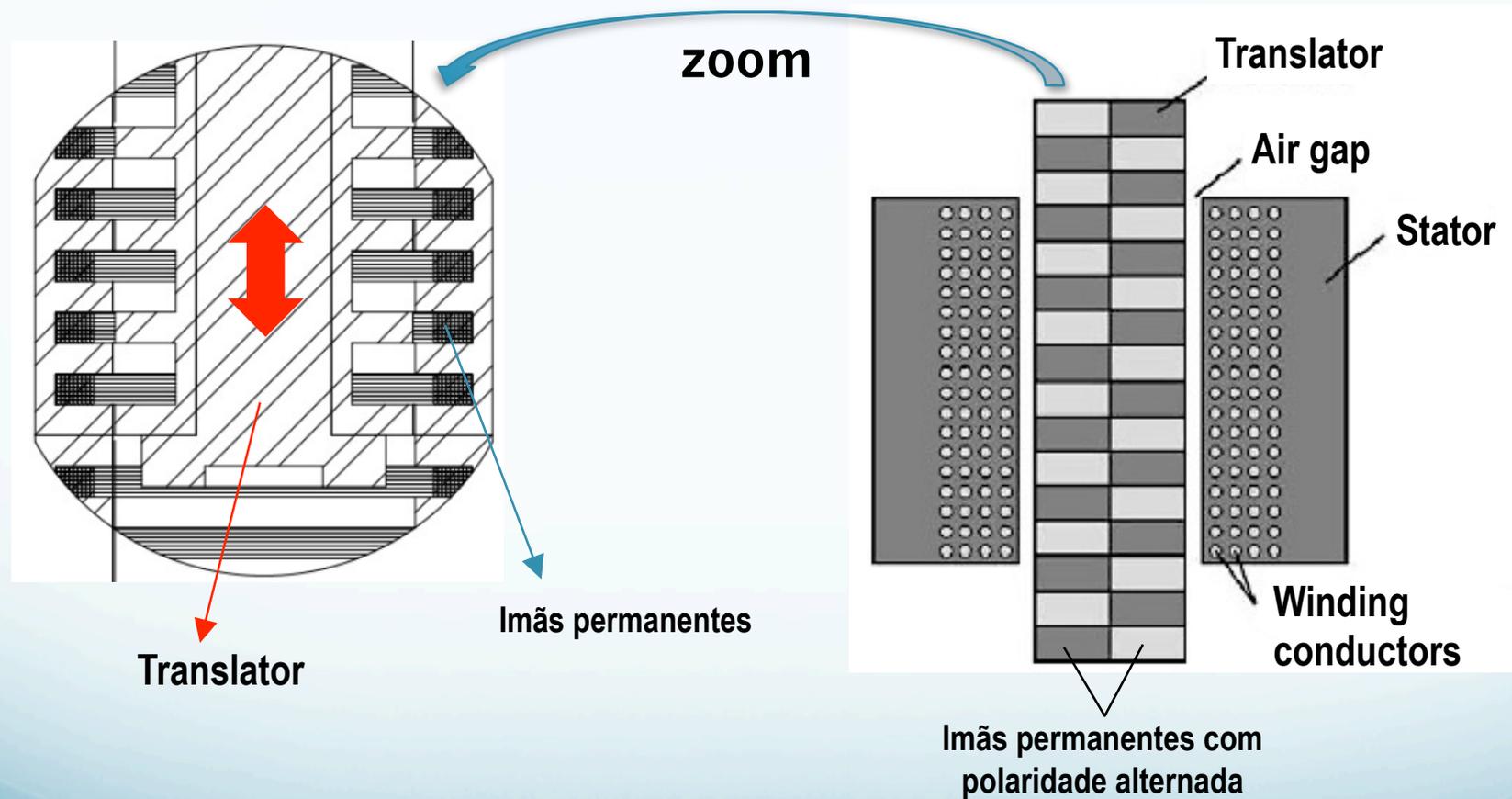


Figura 4.6a – Elementos básicos de um gerador linear

# Problema Proposto

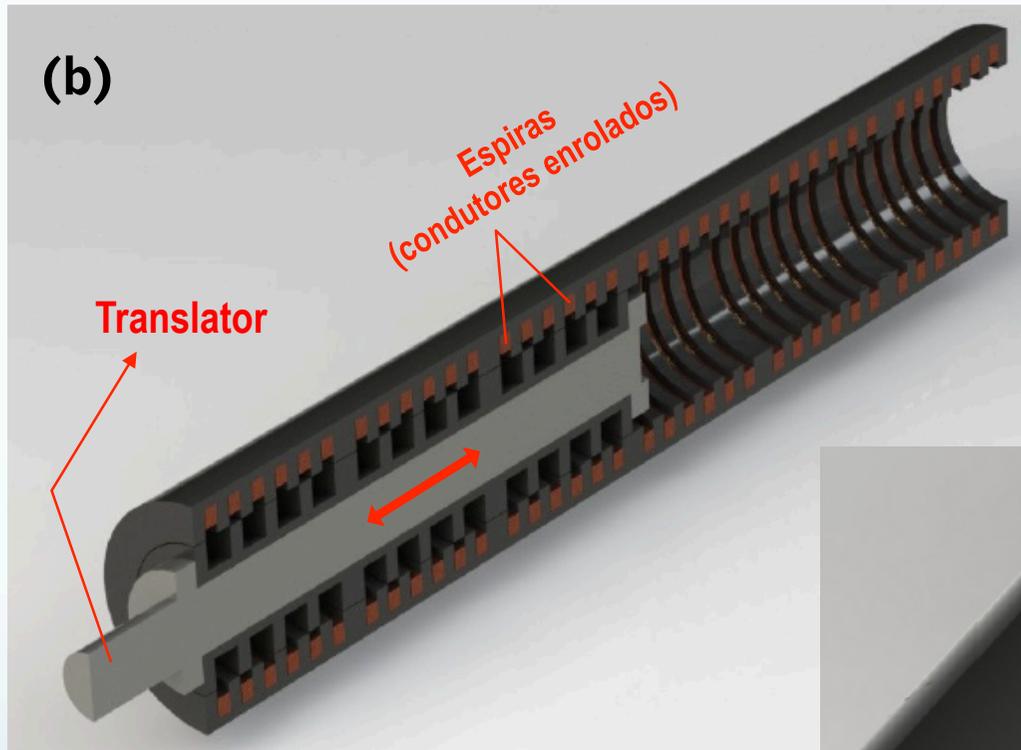
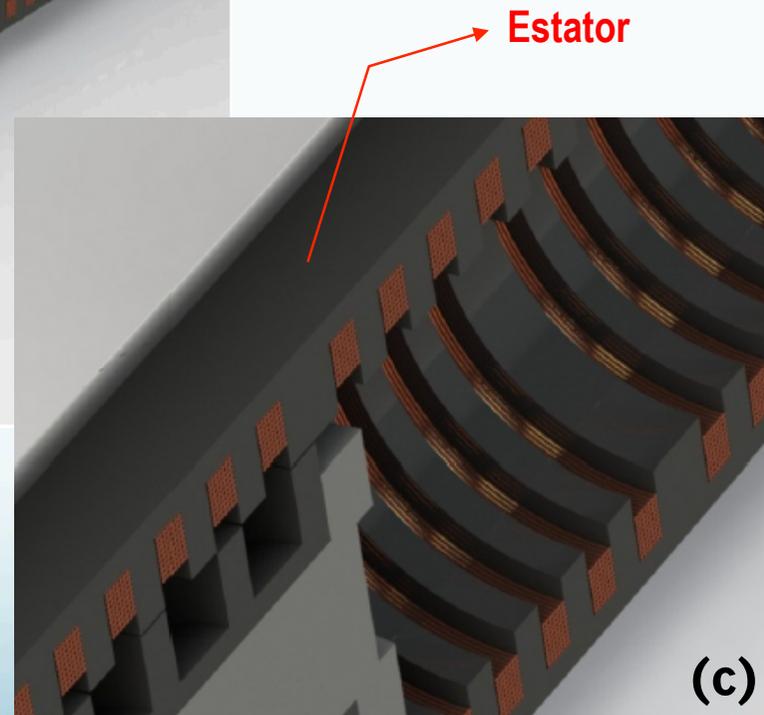


Figura 4.6 – (b) Esquema 3D da estrutura final do gerador linear de relutância variável e (c) vista aproximada do gerador linear





### Modelação mecânica do dispositivo de absorção pontual

#### Nas condições apresentadas pretende-se :

- 1) Determine o comprimento de onda ( $\lambda$ ) da onda com os parâmetros característicos mostradas na Tabela 4.1. Verifique se a condição para águas profundas é verificada;
- 2) Determine o número de onda ( $k$ ), a sua frequência ( $\omega$ ), celeridade de grupo ( $c_g$ ) e a densidade de potência contida na onda ( $J$ ) no pressuposto de que a condição de águas profundas é validada;
- 3) Verifique se se trata de um corpo é de absorção pontual. Para as características de onda em questão determine o limite superior da razão potência absorvida/volume;
- 4) Analisando a Figura 4.4 e os parâmetros geométricos que constam na Tabela 4.2, determine a massa do sistema ( $m = m_{\text{corpo}} + m_{\text{gerador}}$ );
- 5) A mola representada na Figura 4.4 auxilia e condiciona o movimento linear do corpo flutuante (e por consequência o movimento do veio do gerador). Determine a constante de rigidez da mola ( $k_s$ ) considerando que quando o corpo flutuante se situar na cava da onda, a força exercida pela mola é nula;



### Modelação mecânica do dispositivo de absorção pontual

- 6) Sabendo que o corpo acompanha sempre o deslocamento vertical da superfície da água, a sua amplitude de oscilação é metade da altura da onda. Determine a velocidade de oscilação ( $\mathbf{V}_z$ ) da parte móvel (i.e. o veio) do gerador linear;
- 7) Determine a frequência natural de vibração do sistema ( $\omega_n$ ) e avalie se o sistema está a operar (ou não) em condições de ressonância;
- 8) Admitindo um rendimento de absorção de energia de 20%, determine a potência útil ( $\mathbf{P}_u$ ) disponível para o gerador e avalie se a razão **potência útil/volume** do corpo é ou não superior ao limite superior da razão calculada na alínea (3).

## CAPÍTULO 2

### DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS PARA BOMBAGEM DE ÁGUA

*(sem utilização de baterias)*



#### Introdução

O bombeamento de água através da utilização de sistemas fotovoltaicos (FVB) tem constituído cada vez mais uma opção vantajosa, especialmente em situações onde exista um deficiente fornecimento de água através da rede pública de distribuição.

As razões podem ter origem técnica e/ou económica. Nestes casos, os sistemas FVB representam alternativas com elevado interesse no que concerne à vertente económica e social. Por exemplo, os sistemas FVB assumem um papel relevante nos países pobres ou em países com elevada instabilidade política e social onde normalmente a rede pública de distribuição de água é inexistente ou então, foi completamente destruída (cenários de guerra civil).

No processo de dimensionamento de sistemas FVB, além da influência da radiação solar incidente e da temperatura, também deve ser considerado um outro fenómeno que é típico das regiões tropicais: a variação da temperatura é inversamente proporcional à da radiação solar incidente. Neste cenário, o consumo de água é directamente proporcional à temperatura, conduzindo (ao longo do ano), a períodos extremos de deficit ou de superavit de água.

O processo de dimensionamento de sistemas FVB obedece normalmente à realização das seguintes principais etapas:

- Etapa 1** – Avaliação da quantidade de água consumida diariamente;
- Etapa 2** – Cálculo da altura manométrica;
- Etapa 3** – Avaliação do recurso solar disponível na região;
- Etapa 4** – Seleção da bomba (potência da bomba);
- Etapa 6** – Seleção do sistema fotovoltaico (potência e tipologia do sistema).

## 2. Dimensionamento de sistemas FVB

### 2.1. Avaliação da quantidade de água consumida diariamente

A dimensão e o custo de um sistema FVB dependem directamente da quantidade diária de água (em m<sup>3</sup>) que é consumida.

Os sistemas FVB mais económicos são aqueles que **não integram baterias**. Neste caso, a água só pode ser bombeada e armazenada (num reservatório) durante o período do dia onde ocorra exposição solar.

Os reservatórios são usados para armazenar a água e utilizá-la durante o período nocturno ou então nos dias onde o céu se encontre muito nublado. Normalmente, os reservatórios devem ter um volume que seja suficiente para armazenar uma quantidade de água equivalente a cerca de 3 a 5 dias de consumo. A informação referente às diferentes necessidades de consumo de água (uso doméstico ou agrícola) pode ser normalmente obtida a partir das diversas agências governamentais. A tabela 1 mostra a diferente utilização e consumos diários de água para as situações mais vulgares.

Tabela 1 - Valores típicos de consumo de água

Número	Utilização	Consumo Litros/dia
1	Homem (uso geral)	285
1	Vaca leiteira	135
1	Cada par vaca/bezerro	40 – 115
1	Cavalo	75
1	Ovelha	10
100	Galinha	15

## 2.2. Cálculo da altura manométrica

O procedimento utilizado para o dimensionamento de sistemas FVB baseia-se na aplicação de equações simples da física clássica. Na verdade, utiliza o conceito de energia potencial gravítica ( $E = m g h$ ), onde  $m$  representa a massa (em kg),  $g$  é a aceleração da gravidade ( $g = 9,8 \text{ ms}^{-2}$ ) e  $h$  refere-se a uma determinada altura vertical.

A necessidade diária de utilização de energia hídrica,  $E_{hidra}$  (em Joule) que é capaz de elevar até uma altura  $H_m$  (altura manométrica, em metros) uma determinada massa de água,  $m$  com um volume  $V$  (em  $\text{m}^3$ ) é determinada através da seguinte equação:

$$E_{hidra} = m g H_m \quad (1)$$

onde

$$m = \rho V \quad (2)$$

sendo  $\rho$  a densidade da água ( $= 1000 \text{ kg/m}^3$ ).

Substituindo a equação 2 na equação 1 obtém-se:

$$E_{hidra} = \rho g H_m V \quad (3)$$

Para as aplicações eléctricas é conveniente não explicitar a equação 3 em Joule mas sim em Wh.

Sabendo que 1Wh corresponde a 3600 J então 1 Joule corresponde a  $\frac{1}{3,6 \times 10^3}$  Wh. Deste modo, substituindo a equação 3 pelos correspondentes valores numéricos obtém-se a seguinte expressão referente à energia hídrica diária requerida:

**ENERGIA HÍDRICA DIÁRIA REQUERIDA (Wh):**

$$E_{hidra} = \left[ (1000 \times 9,81 \times H_m \times V) / 3,6 \times 10^3 \right] \quad (4)$$

$$E_{hidra} = 2,725 \times H_m \times V$$

A figura 1 representa esquematicamente um sistema FVB, utilizado por exemplo para o abastecimento de água a animais de uma quinta rural de pequena dimensão.

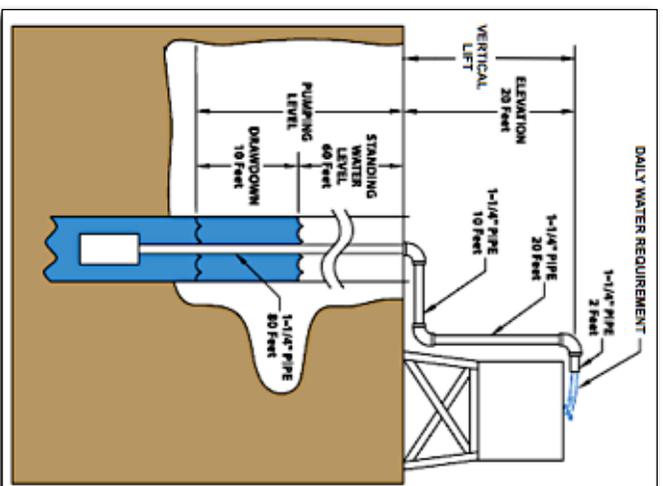


Fig. 1 – Configuração típica de um sistema FVB para bombagem de água (fonte [1])

A figura 1 identifica a altura geométrica  $h$  como sendo aquela que corresponde à soma do **desnível** (do inglês: *Vertical lift, VL*), que é considerado como sendo a altura do reservatório relativamente ao solo com o **nível de bombagem** (do inglês: *Pumping level, PL*). Por outro lado, o nível de bombagem é a distância que corresponde à soma entre o **nível estático da água** (do inglês: *Standing water level*) com o **rebaixamento** (do inglês: *Drawdown*).

O nível estático da água corresponde à distância do topo do poço até a superfície da água (no poço), numa situação em que não ocorra bombeamento. Por outro lado, o rebaixamento corresponde ao decréscimo que ocorre no nível estático da água quando esta é bombeada do poço. Por isso, pode-se escrever:

$$h = VL + PL \quad (5)$$

onde todas as grandezas que intervêm na equação 5 devem ser expressas em metros. É importante realçar que no processo de dimensionamento, a altura total a considerar corresponde à altura manométrica (do inglês: *Total dynamic head: H<sub>m</sub>*). A altura manométrica corresponde à soma da altura geométrica com mais um termo, que advém das perdas de carga (do inglês: *Friction losses, FL*). Deste modo, pode-se escrever:

$$H_m = h + FL \quad (6)$$

A perda de carga (em metros) que ocorre numa tubagem (rectilínea) decorre da resistência que é oferecida ao escoamento de um fluido (viscosidade) pela tubagem e demais acessórios (rugosidade).

Desde o século XVIII, os engenheiros hidráulicos têm estudado o comportamento e escoamento dos fluidos. Através de diversos trabalhos laboratoriais, Darcy (engenheiro hidráulico suíço) e também outros investigadores concluíram, naquela época, que a perda de carga ao longo de uma tubagem obedecia às seguintes principais condições:

- directamente proporcional ao comprimento da tubagem;
- proporcional a uma potência da velocidade de bombeamento (fluxo),  $Q$  ( $m^3/s$ ) do fluido;
- inversamente proporcional a uma potência do diâmetro da tubagem;
- função da natureza das paredes da tubagem, no caso de regime turbulento;
- independente da pressão sob a qual o fluido escoar;
- independente da posição da tubagem e do sentido de escoamento.

Naquele tempo, foram desenvolvidas diversas equações matemáticas relativas ao dimensionamento de tubagens. A maioria delas era específica para determinadas condições de trabalho.

Contudo, actualmente, o número de equações matemáticas utilizadas é bastante menor. Nesta texto será utilizada a equação de **Flamant** para o cálculo da perda de carga numa tubagem.

A equação de Flamant deve ser aplicada para água (à temperatura ambiente), em instalações domiciliares e tubagens com diâmetro variando entre 12,5 a 100 mm. Inicialmente foram desenvolvidas equações para o ferro fundido e aço galvanizado, e posteriormente para outros materiais (poliméricos) como por exemplo o PVC. A equação de Flamant é escrita da seguinte maneira:

$$FL = K \cdot \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \cdot L \quad (7)$$

em que:

$D$  – diâmetro interno da tubagem (m);

$Q$  – Fluxo ( $m^3/s$ );

$L$  – comprimento total da tubagem (m);

$FL$  – perda contínua de carga (m);

$K$  – coeficiente que depende da natureza (material) e do estado de conservação das paredes internas da tubagem.

A tabela 2 apresenta os valores do coeficiente  $K$  associado a diferentes materiais.

Tabela 2 - Valores do coeficiente  $K$  que consta da equação de Flamant

PVC	Ferro fundido e aços novos	Ferro fundido e aços usados	Cimento e amianto	Chumbo
0,000824	0,001133	0,0014	0,00095	0,00086

Importa realçar que, se o reservatório de armazenamento de água estiver eventualmente localizado até uma altura de 10 m acima do topo do poço, então é possível estimar a perda de carga através de uma regra simplificada. Neste caso, a perda de carga pode ser estimada em 5% do valor correspondente à altura geométrica,  $h$ .

### 2.3. Avaliação do recurso solar disponível na região

O desempenho de um sistema FVB depende directamente da quantidade de luz solar que incide sobre a superfície do painel solar. Na verdade, quanto maior for a intensidade da radiação solar maior será a quantidade de água que o sistema FVB conseguirá bombear. Por outro lado, a intensidade da radiação solar varia de acordo com a época do ano, com a localização e com o clima de uma dada região. Acresce ainda referir que as necessidades de consumo de água também dependem da localização e variam ainda ao longo da época do ano.

Nesta secção, apresenta-se um processo relativamente simples para realizar o dimensionamento de sistemas FVB. Neste *processo simplificado*, não são considerados os diferentes perfis mensais de consumo de água; considera-se a média anual do consumo de água,  $V_{med}$ .

Por outro lado, é importante recordar que os sistemas FVB são concebidos para operarem conjuntamente com painéis solares fotovoltaicos (fonte geradora de energia eléctrica). Neste cenário, o processo de dimensionamento simplificado consiste em considerar que o tempo de operação de um sistema para bombeamento de água corresponde (por exemplo no verão), a cerca de 5-6 horas/dia em regiões localizadas no Norte da Península Ibérica.

Neste texto, são apresentados alguns “*mapas solares*” que podem funcionar como uma “ferramenta” útil para a determinação do recurso solar. Estes mapas são apresentados nas figuras 2 (a – h).

Essencialmente os mapas fornecem um número, designado por “*número de horas de sol em ângulo ótimo*”,  $H_s$ .

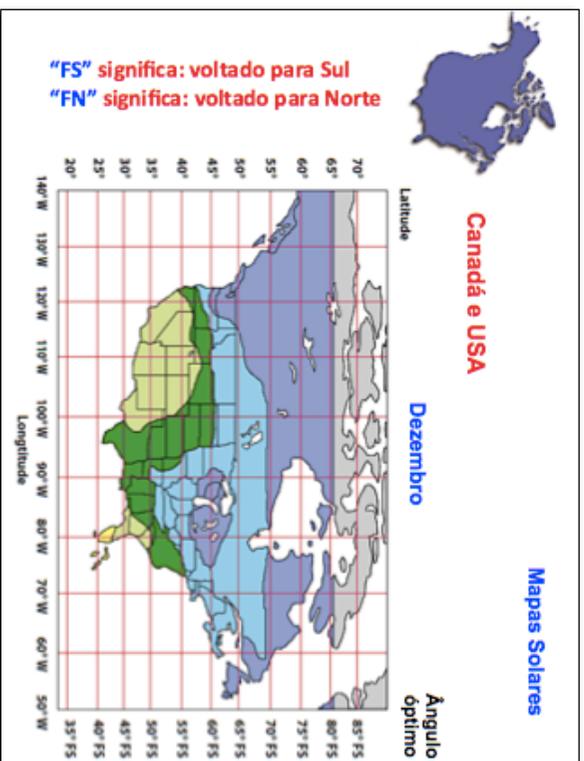


Fig. 2a – Mapa solar dos Estados Unidos da América e Canadá: **Dezembro** (fonte [1])

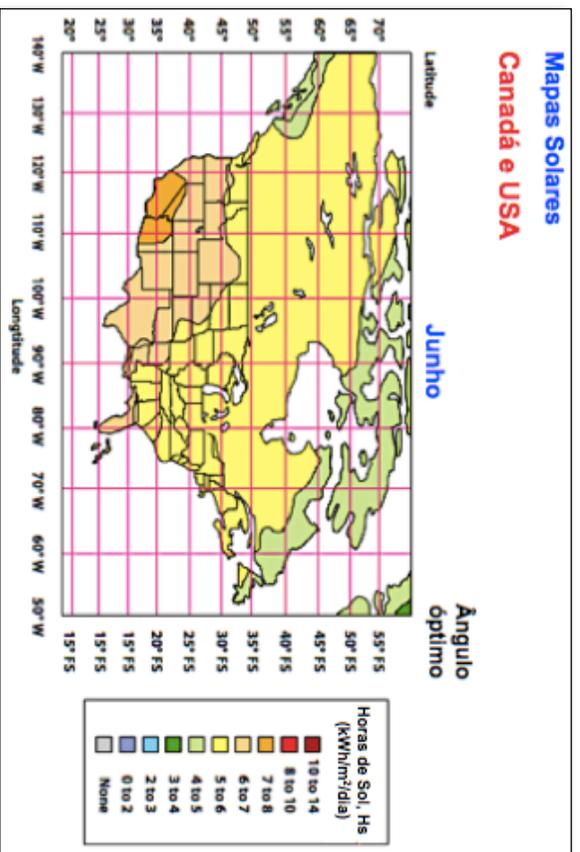


Fig. 2b – Mapa solar dos Estados Unidos da América: **Junho** (fonte [1])

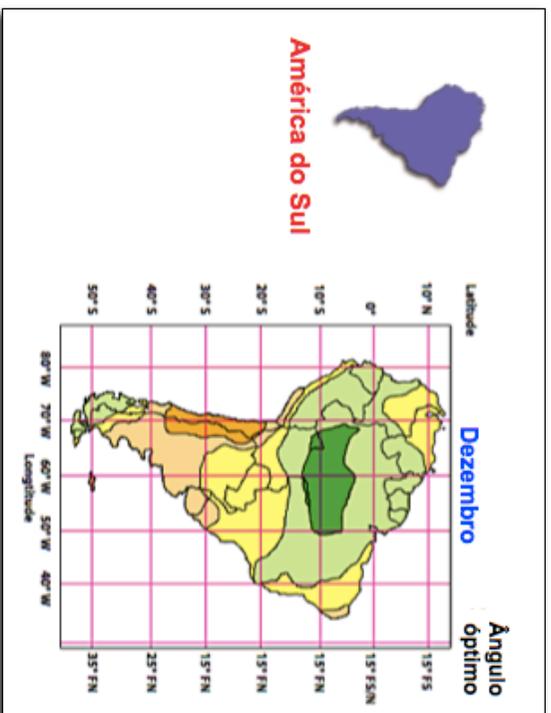


Fig. 2c – Mapa solar da América do Sul: Dezembro (fonte [1])

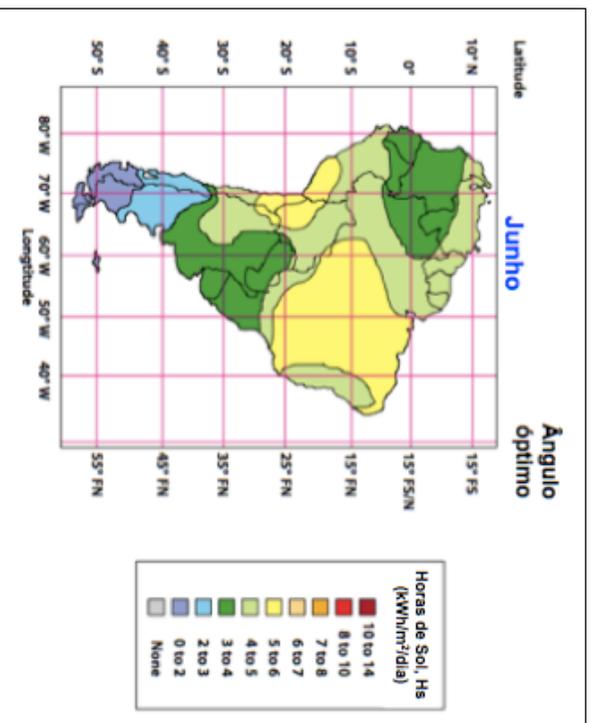


Fig. 2d – Mapa solar da América do Sul: Junho (fonte [1])

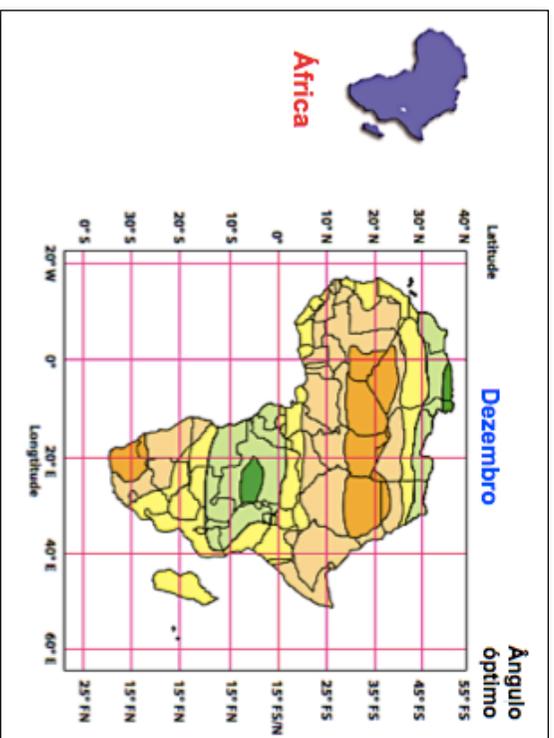


Fig. 2e – Mapa solar de África: Dezembro (fonte [1])

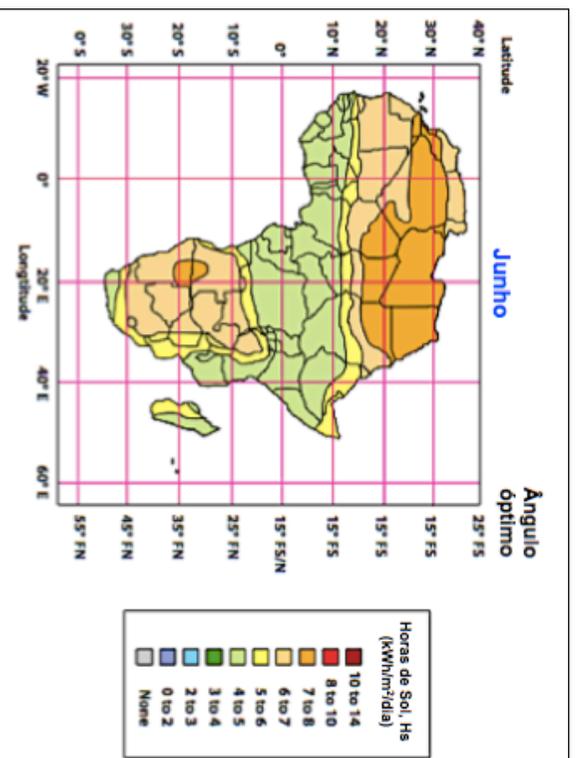


Fig. 2f – Mapa solar de África: Junho (fonte [1])

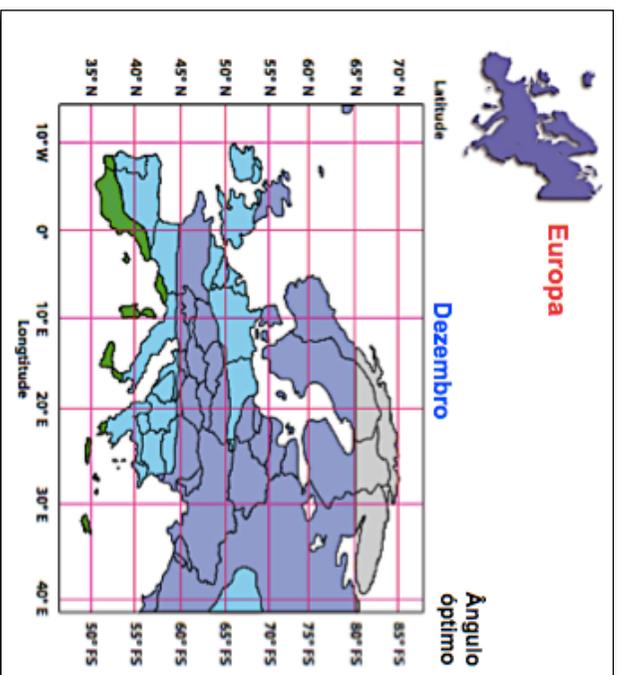


Fig. 2g – Mapa solar da Europa: Dezembro (fonte [1])

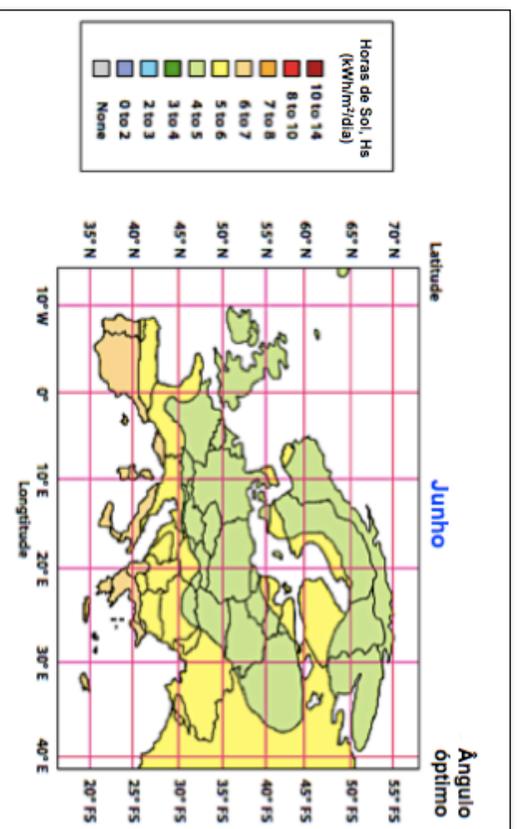


Fig. 2h – Mapa solar da Europa: Junho (fonte [1])

A inclinação dos painéis fotovoltaicos também condiciona directamente a energia que é produzida pelo sistema FVB. Com efeito, estes mapas solares só fornecem informação correcta desde que o sistema fotovoltaico seja instalado com uma inclinação igual àquela que é indicada no mapa. Os mapas solares das figuras 2 (a – h) fornecem o valor do ângulo óptimo para uma determinada época do ano referente a uma certa região.

Por outro lado, estes mapas também pressupõem que o sistema FVB está completamente exposto à luz solar durante todo o dia. Neste cenário, considera-se que o sistema FVB não se encontra parcialmente encoberto pela ocorrência de fenómenos de sombreamento que decorram por exemplo da presença de árvores, edifícios ou montanhas.

Apresentam-se assim algumas **regras simples** que permitem avaliar o ângulo ótimo (ver figura 3) em função da latitude do lugar:

- Para painéis instalados com uma inclinação igual a [latitude + 15°], a energia produzida no inverno é maximizada. No verão, o desempenho decresce em cerca de 13%.
- Painéis instalados com uma inclinação igual a [latitude - 15°] a energia produzida no verão é maximizada. No inverno, o desempenho decresce em cerca de 13%.
- Painéis instalados com uma inclinação igual à [latitude], a energia produzida é maximizada ao longo do ano. No verão e no inverno, o desempenho decresce em cerca de 4%.

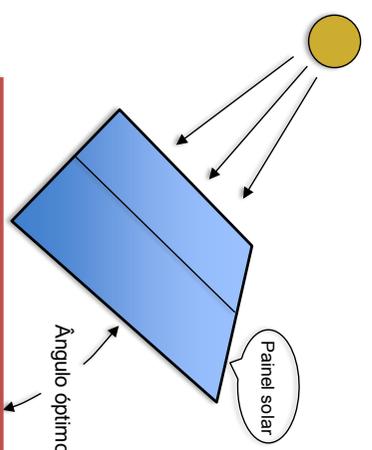


Fig. 3 - Representação esquemática do ângulo ótimo de inclinação de um painel

#### 2.4. Seleção da bomba (potência da bomba)

A energia hídrica diária que é requerida para satisfazer as necessidades de consumo de água deve ser fornecida através da utilização de uma bomba. Neste documento, apenas será considerada a utilização de bombas DC (de corrente contínua) submersíveis. A energia fornecida por uma bomba é obtida através da seguinte expressão:

#### ENERGIA DIÁRIA FORNECIDA PELA BOMBA (Wh)

$$E_{bomba} = \frac{E_{hidra}}{\eta_{bomba}} \quad (8)$$

onde  $\eta_{bomba}$  representa a eficiência da bomba (normalmente com valores entre **25 % a 45%** - i.e., perdas de 75% a 55%). As bombas da série **SD 12 – 30**, fabricadas pela empresa

KYOCERA SOLAR, correspondem àquelas que são normalmente mais utilizadas em sistemas FVB já que reclamem baixos custos de investimento.

Com efeito, trata-se de bombas com pequeno volume e que são amplamente utilizadas para o fornecimento de água a moradias ou então a pequenas quintas rurais. A figura 4 refere-se à imagem de uma bomba da série SD 12 – 30.

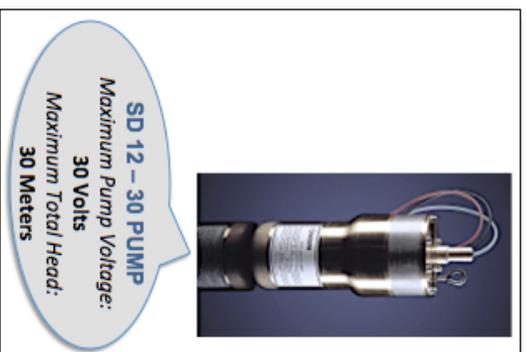


Fig. 4 – Bomba submersível fabricada pela Kyocera (fonte [1])

A figura 5 mostra um gráfico que é fornecido pelo fabricante “Kyocera Solar” onde é possível estabelecer a relação entre o fluxo de água,  $Q$  (em  $L/min$ ) com a altura manométrica e a potência da bomba que é requerida.

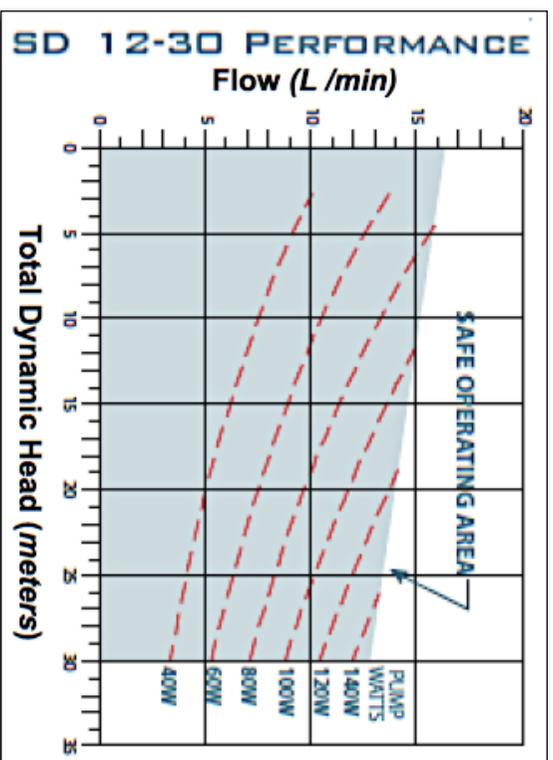


Fig. 5 – Relação entre o fluxo de água com a altura manométrica, e a potência da bomba (fonte [1])

Anteriormente foi mencionado que no processo de dimensionamento simplificado, o tempo de operação de um sistema FVB corresponde ao designado “número de *horas de sol*”,  $H_s$ . Contudo, de acordo com os mapas solares referentes às figuras 2 (a – h) verifica-se que para cada região, o número  $H_s$  varia com a época do ano.

Afim de se simplificar o processo de dimensionamento, número  $H_s$  será doravante considerado como aquele que corresponde ao **valor médio** das duas épocas do ano (Dezembro e Junho).

A energia fornecida pela bomba,  $E_{bomba}$  (em Wh) é calculada de acordo com a seguinte equação:

$$E_{bomba} = P_{bomba} \times H_s \quad (9)$$

onde  $P_{bomba}$  representa a potência (em W) da bomba submersível. Deste modo, a bomba a ser seleccionada deverá ter uma potência que verifique a seguinte expressão:

$$P_{bomba} = \frac{E_{bomba}}{H_s} \Leftrightarrow \frac{E_{hidra}}{H_s \eta_{bomba}} \quad (10)$$

Nesta fase, importa relacionar a potência da bomba com os principais parâmetros de dimensionamento: a *altura manométrica* e o *consumo de água* requerido. Deste modo, substituindo-se a equação 4 na equação 10, obtém-se:

$$P_{bomba} = \frac{2,725 H_m V_{med}}{H_s \eta_{bomba}} \quad (11)$$

onde  $V_{med}$  corresponde ao valor médio anual do consumo de água. Por outro lado, o caudal (ou fluxo),  $Q$  (m<sup>3</sup>/h) debitado por uma bomba é calculado através da seguinte equação:

$$Q = \frac{V_{med}}{H_s} \quad (12)$$

A substituição da equação 12 na equação 11, também permite determinar a potência da bomba através da utilização da seguinte equação:

$$P_{bomba} = \frac{2,725 H_m Q}{\eta_{bomba}} \quad (13)$$

## 2.5. Seleção do sistema fotovoltaico (potência do gerador FV)

O gerador FV representa o componente do sistema FVB que deverá fornecer a energia eléctrica que é necessária para o accionamento da bomba. A figura 6 mostra muito esquematicamente os principais componentes que integram um sistema FVB.

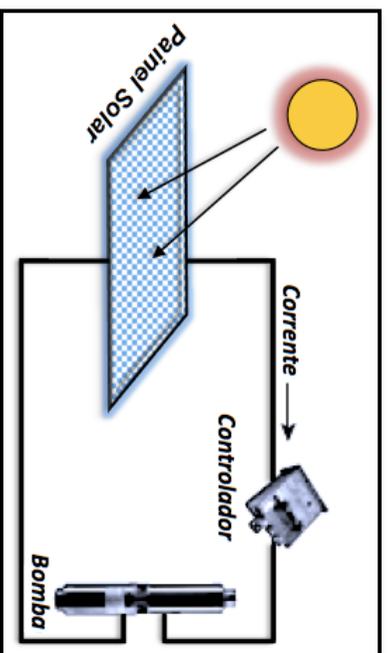


Fig. 6 – Representação esquemática de um sistema FVB

Deste modo, conhecendo-se na fase actual as necessidades de consumo de energia (ou seja, a energia da bomba), a potência  $P_{FV}$  (em W) instalada no gerador FV pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$P_{FV} = \frac{E_{bomba}}{Hs\eta_{FV}} \quad (14)$$

onde  $P_{FV}$  representa a potência nominal instalada no gerador FV (medida nas condições de referência: radiação solar incidente,  $G^r = 1000 \text{ W/m}^2$  e  $T^r = 25^\circ \text{ C}$ ) e  $\eta_{FV}$  representa o rendimento do gerador FV. Este factor está directamente relacionado com as perdas energéticas associadas ao regulador de carga (10%), e com a queda de tensão (3%) nas cablagens utilizadas pelo gerador FV.

- Perdas nas cablagens = 3%
  - Perdas no regulador de carga = 15%
- ⇒ Rendimento (cablagens):  $\eta_{cabo} = 0,97$
- ⇒ Rendimento (regulador de carga):  $\eta_{reg} = 0,85$
- ⇒ Rendimento total:  $\eta = (\eta_{cabo} \times \eta_{reg}) = 0,83$

Importa também relacionar a potência do gerador FV com os principais parâmetros de dimensionamento: a *altura manométrica* e o *consumo de água* requerido.

Deste modo, a substituição da equação 8 na equação 14, permite obter a equação que determina a potência nominal a instalar no gerador FV:

$$P_{FV} = \frac{2,275 H_m V_{med}}{H_s \eta_{FV} \eta_{bomba}} \quad (15)$$

### 2.5.1. Tipologia do sistema gerador FV

O procedimento que será utilizado na determinação da tipologia (ou seja, a quantificação do número de módulos FV e o seu modo de associação) do gerador fotovoltaico corresponde ao que se apresenta em seguida.

#### I) Determinação do número total de módulos

O **número total de módulos**,  $N$  resulta do quociente entre a potência nominal a instalar no gerador FV e a potência máxima,  $P_{max}$  de cada módulo:

$$N = \frac{P_{FV}}{P_{max}} \quad (16)$$

#### II) Determinação do número de módulos por fileira

O **número de módulos por fileira**,  $N_s$  (módulos ligados em série) resulta do quociente entre a tensão máxima DC da bomba,  $V_{max}^{bomba}$  e a tensão máxima do módulo  $V_{max}$ :

$$N_s = \frac{V_{max}^{bomba}}{V_{max}} \quad (17)$$

#### III) Determinação do número de fileiras de módulos

O **número de fileiras de módulos**,  $N_F$  (módulos ligados em paralelo) resulta do quociente entre a corrente máxima DC da bomba,  $I_{max}^{bomba}$  e a corrente máxima que atravessa cada fileira de módulos,  $I_{max}$ . Note-se que a corrente que atravessa cada fileira de módulos, é igual à corrente máxima de um módulo:

$$N_F = \frac{I_{\max}^{\text{bomba}}}{I_{\max}}$$

(18)

### 3. Estudo de caso

Este caso de estudo refere-se ao dimensionamento de um sistema FVB (*sem auxílio de baterias*) a ser instalado em Portugal, na cidade de **Braga** (Latitude: 41°32'33" Norte).

O sistema FVB a ser dimensionado será instalado numa quinta rural de pequena dimensão, que contém 20 cabeças de gado (vacas leiteiras). O sistema FVB destina-se apenas a satisfazer as necessidades básicas de consumo de água destes animais. A figura 7 e figura 8 caracterizam o caso de estudo, mostrando, respectivamente o esboço da instalação hidráulica (em PVC), e o perfil diário do consumo de água referente a um dia típico de cada mês.

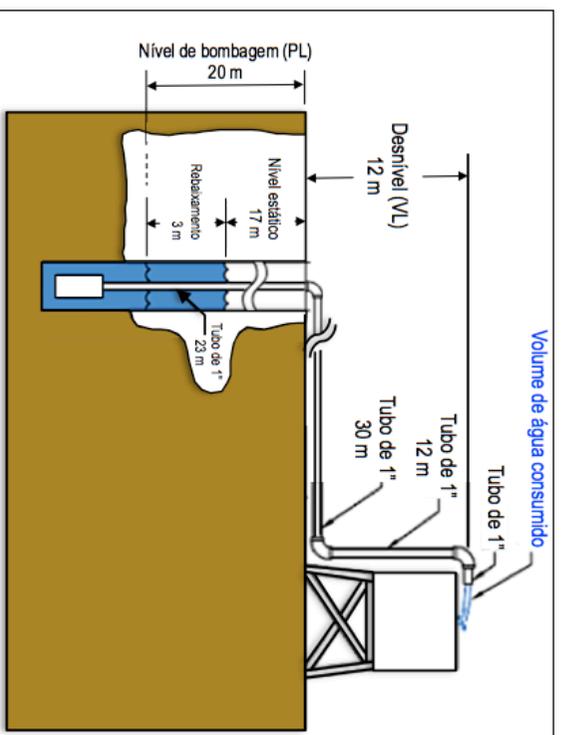


Fig. 7 – Instalação hidráulica e respectivas dimensões geométricas

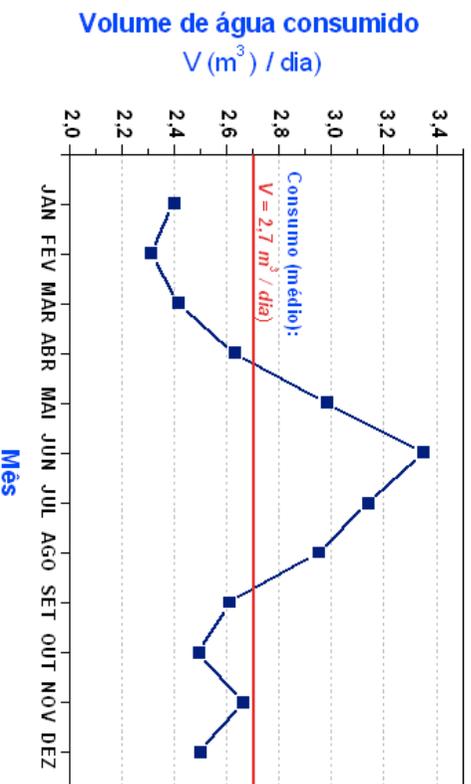


Fig.8 – Perfil diário do consumo de água referente a um dia típico de cada mês

As dimensões geométricas que são apresentadas na figura 7 (instalação hidráulica), estão listadas na tabela 3.

Tabela 3 – Dimensões geométricas da instalação hidráulica

Dimensões geométricas da instalação hidráulica	Unidades (m)
Nível estático da água ( $NE$ )	17
Rebaixamento ( $R$ )	3
Nível de bombagem ( $PL$ )	$PL = (NE + R)$
Desnível ( $VL$ )	12
Altura geométrica ( $h$ )	$h = (VL + PL)$
Comprimento do tubo dentro do poço ( $L_p$ )	23
Comprimento horizontal do tubo fora do poço ( $L_h$ )	30
Comprimento total do tubo ( $L$ )	$L = (L_p + L_h + VL)$
Diâmetro do tubo ( $D$ )	0,0267
Altura manométrica ( $H_m$ )	$H_m = (h + FL)$
	<b><math>(32 + FL) = ?</math></b>

A inspeção da tabela 3 dita que ainda não é possível calcular a altura manométrica, já que nesta fase ainda não é conhecido o valor da perda de carga,  $FL$ . Com efeito, de acordo com a equação 7, o valor da perda de carga depende do **fluxo**  $Q$  de água consumido por dia. O fluxo  $Q$  ( $m^3/s$ ) debitado por uma bomba é calculado através da seguinte equação:

$$Q = \frac{V_{med}}{Hs \times (60 \times 60)} \quad (19)$$

onde para este caso de estudo (ver figura 8),  $V_{med} = 2,7 \text{ m}^3$ . Afim de se poder calcular **fluxo**  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) de água que é consumido por dia, é ainda necessário determinar o “*número de horas de sol*”,  $H_s$ .

### 3.1. Avaliação do valor médio do “número de horas de sol”, $H_s$

As figuras 2 (g – h) correspondem aos mapas solares referentes ao *continente Europeu*. Analisando estes mapas é possível extrair a informação que se apresenta na tabela 4.

Tabela 4 – Continente Europeu: número de horas de sol correspondentes às épocas de Inverno e Verão

Época do ano	Horas de Sol ( $H_s$ )	Valor global médio de $H_s$
Inverno	[2 - 3]	(2,5 + 5,5) / 2
	<i>Média parcial</i> 2,5	
Verão	[5 - 6]	4
	<i>Média parcial</i> 5,5	

Atendendo a que nesta fase já é conhecido o valor do número  $H_s$ , a aplicação da equação 19, produz o seguinte resultado:

$$Q = \frac{2,7}{4 \times 60 \times 60} = 1,875 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s}.$$

### 3.2. Avaliação do valor da altura manométrica, $H_m$

O valor da perda de carga é avaliado através da aplicação da equação 7. Por outro lado, a utilização da equação 6 permite calcular o valor correspondente à altura manométrica. A substituição pelos correspondentes valores numéricos produz o seguinte resultado:

$$\begin{aligned}
 H_m &= h + FL \\
 H_m &= h + \left( K \cdot \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \cdot L \right) \Leftrightarrow H_m = 32 + \left[ 0,000824 \cdot \frac{(1,875 \times 10^{-4})^{1,75}}{0,0267^{4,75}} \cdot 65 \right] \\
 H_m &\approx (32 + 0,48) = 32,48 \text{ m}.
 \end{aligned}$$

### 3.3. Avaliação da potência da bomba (ou potência motriz), $P_{bomba}$

No âmbito deste estudo de caso, considera-se que o valor do rendimento da bomba é constante e igual a 45%. A potência da bomba é calculada através da utilização da equação 11, ou seja:

$$P_{\text{bomba}} = \frac{2,725 H_m V_{\text{med}}}{H_s \eta_{\text{bomba}}} \Leftrightarrow P_{\text{bomba}} = \frac{2,725 \times 32,48 \times 2,7}{4 \times 0,45} = 132,8 W \approx 0,18 \text{ cv}.$$

### 3.4. Avaliação da potência do gerador fotovoltaico, $P_{FV}$

A potência  $P_{FV}$  (em W) instalada no gerador FV é calculada a partir da equação 15. Neste estudo de caso, considera-se que o valor do rendimento do gerador FV é igual a 83%.

$$P_{FV} = \frac{2,725 H_m V_{\text{med}}}{H_s \eta_{FV} \eta_{\text{bomba}}} \Leftrightarrow P_{FV} = \frac{2,725 \times 32,48 \times 2,7}{4 \times 0,83 \times 0,45} \approx 160 W.$$

### 3.5. Determinação da tipologia do sistema gerador FV

A tipologia de um sistema gerador FV, refere-se não só à quantificação do número de módulos FV, mas também ao seu modo de ligação (associação em série ou em paralelo).

Neste estudo de caso irão ser adoptados módulos FV do fabricante KYOCERA SOLAR. A tabela 5 mostra as diferentes características do módulo fotovoltaico, referente ao modelo KC80 que se utilizará.

Tabela 5 – Características do módulo KC80 (Kyocera Solar)

Características eléctricas			
Potência de pico (watt)	$P_{max}$		80
Corrente máxima (A)	$I_{max}$		4,73
Tensão máxima (volt)	$V_{max}$		16,9
Temperatura normal de funcionamento	$NOCT$		45 °C
Variação do rendimento com a temperatura	$d\eta/dT$		-0,5 (%/°C)
Dimensões			
Comprimento (mm)	C		1422
Largura (mm)	B		653

#### a) Determinação do número total de módulos

Resulta do quociente entre a potência nominal a instalar no gerador FV e a potência máxima,  $P_{max}$  de cada módulo:

$$N = \frac{P_{FV}}{P_{max}} \Leftrightarrow N = \frac{160}{80} = 2$$

### b) Determinação do número de módulos por fileira

O número de módulos por fileira,  $N_S$  (módulos ligados em série) resulta do quociente entre a tensão máxima DC da bomba,  $V_{\max}^{bomba}$  e a tensão máxima do módulo  $V_{\max}$ .

$$N_S = \frac{V_{\max}^{bomba}}{V_{\max}} \Leftrightarrow N_S = \frac{30}{16,9} = 1,76 \rightarrow 2$$

### c) Determinação do número de fileiras de módulos

O número de fileiras de módulos,  $N_F$  (módulos ligados em paralelo) resulta do quociente entre a corrente máxima DC da bomba,  $I_{\max}^{bomba}$  e a corrente máxima que atravessa cada fileira de módulos,  $I_{\max}$ .

$$N_F = \frac{I_{\max}^{bomba}}{I_{\max}} \Leftrightarrow N_F = \frac{4}{4,74} = 0,85 \rightarrow 1$$

A tipologia (configuração dos módulos FV) adoptada é mostrada de modo esquemático na figura 9.

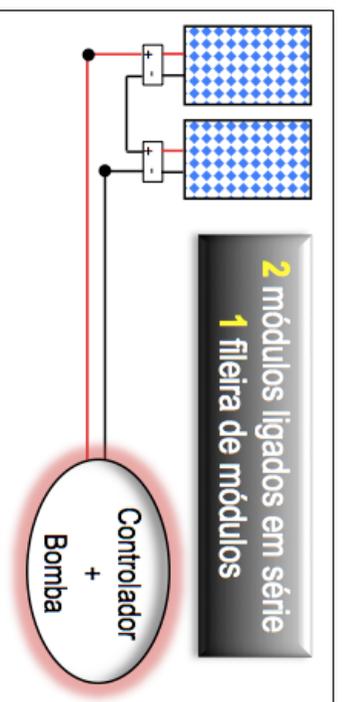


Fig.9 – Configuração adoptada: o gerador FV é constituído por 1 fileira com 2 módulos ligados em série

### 3.6. Estimativa da energia produzida pelo gerador FV, considerando a temperatura e a radiação incidente

No processo de dimensionamento de sistemas FVB através do método simplificado, apenas foi considerado o valor do consumo médio diário de água e o valor médio do número de horas de  $soT$ ,  $H_s$ . A influência da temperatura e da radiação solar incidente não foi ponderado neste

método. Contudo, é sabido que tanto a intensidade da radiação solar quanto o valor da temperatura variam ao longo da época do ano e por conseguinte, deverão influir directamente na quantidade de energia produzida pelo gerador fotovoltaico. Nesta secção, será efectuado o estudo que permite avaliar a influência da intensidade da radiação solar e da temperatura, na quantidade diária (volume) de água bombeada pelo sistema FV.

O procedimento adoptado, ou seja, as equações matemáticas utilizadas para a determinação da quantidade de energia produzida pelo gerador FV (levando em consideração a influência da intensidade da radiação solar e da temperatura), correspondem àquelas que foram aplicadas no âmbito da UC “Energia: do Carbono às Renováveis” (*estudo de sistemas fotovoltaicos autónomos*).

A Energia diariamente produzida por um gerador FV,  $E_{FV}^i$  pode expressar-se através do produto de quatro factores:

$$E_{FV}^i = P_{FV} H_{eq}^i K_T^i \eta_{FV} \quad (20)$$

onde  $P_{FV}$  representa a potência do gerador FV, ou seja, a potência máxima nas denominadas condições de referência ( $G^r = 1000 \text{ W/m}^2$  de irradiância solar e  $T^r = 25^\circ \text{C}$ ) e  $H_{eq}^i$  corresponde ao número de horas equivalentes de Sol para um determinado dia do mês “ $r$ ” (considerando por exemplo o mês de Janeiro,  $i = 1$ ). Por outro lado,  $K_T^i$  representa o factor de correcção de temperatura referente à temperatura do módulo FV,  $T_m$  para o mês “ $r$ ”. Este factor, leva em consideração a circunstância de que em condições operacionais, o rendimento dos painéis solares ser na realidade diferente daquele que indica o valor da sua potência nominal, devido ao facto de que a temperatura média de operação ser normalmente diferente de  $25^\circ \text{C}$ . Por exemplo, para o mês de Julho o factor de correcção de temperatura é igual a:

$$[ K_T^1 = 1 - 0,005 \times (T_{m,r} - 25) ]$$

As necessidades diárias de consumo de energia (ou seja, a energia da bomba,  $E_{bomba}$ ) devem ser supridas pela energia diária que é produzida pelo gerador fotovoltaico,  $E_{FV}$ . Por outro lado, a energia da bomba que é necessária para satisfazer as necessidades de consumo de água é obtida através da utilização da equação 8. Deste modo, substituindo-se a equação 4 na equação 8 obtém-se:

$$E_{bomba} = \frac{2,725 H_m V}{\eta_{bomba}} \quad (21)$$

Neste contexto, para um gerador fotovoltaico que tenha uma potência instalada igual a  $P_{FV}$ , é possível obter-se a expressão que permite calcular o volume médio diário de água que é bombeada pelo sistema FV, desde que a equação 20 seja igualada à equação 21:

$$P_{FV} H_{eq}^i K_T^l \eta_{FV} = \frac{2,725 H_m V}{\eta_{bomba}} \Rightarrow \quad (22)$$

$$V = \frac{P_{FV} H_{eq}^i K_T^l \eta_{FV} \eta_{bomba}}{2,725 H_m} \quad \text{ou} \quad V = \frac{E_{FV} \eta_{bomba}}{2,725 H_m}$$

### 3.6.1. Avaliação da radiação solar incidente

A consulta do site (<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>) permite a avaliação dos valores da intensidade da radiação solar incidente,  $I(0)$  (**em plano horizontal**) para cada dia típico dos diferentes meses do ano, conforme apresentado na tabela 6.

Tabela 6 – Valores da radiação solar incidente num plano horizontal (BRAGA)

Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abri.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
$I(0)$ [ $Wh/m^2/dia$ ]	1880	2760	4080	5390	6360	7100	7020	6210	4750	3100	2030	1560
$T_a$ ( $^{\circ}C$ )	8	8,8	11,3	12,8	16	20,1	22,2	21,7	19,6	15,5	11,5	9,3
$G(0)$ [ $Wh/m^2/dia$ ]	78,3	115	170	224,6	265	295,8	292,5	258,8	197,9	129,2	84,6	65

onde  $I(0)$  e  $G(0)$  representam respectivamente a intensidade e a densidade da radiação solar incidente **num plano horizontal**, e  $T_a$  refere-se à temperatura média do ar. É possível efectuar o cálculo da radiação solar em superfícies inclinadas a partir do conhecimento dos valores referentes às superfícies horizontais. Para este estudo de caso, o mês de Junho (Verão) corresponde àquele onde se regista o maior consumo de água (ver a figura 8 referente ao perfil de consumo de água). Neste cenário, de modo a maximizar a energia produzida no Verão pelo gerador FV, a inclinação da superfície ótima,  $\beta_{opt}$  (deve estar orientada para sul) relaciona-se com a latitude do lugar,  $\phi$  de acordo com a seguinte expressão.

$$\beta_{opt} = (\phi - 15^{\circ}) \quad (23)$$

Deste modo, o gerador FV que está esquematizado na figura 9 deverá ser instalado com um ângulo de inclinação  $\beta_{opt} = 26^{\circ}$  relativamente à superfície horizontal.

Aplicando as equações matemáticas que foram utilizadas na UC “Energia: do Carbono às Renováveis” (*estudo de sistemas fotovoltaicos autónomos*), é possível calcular os valores correspondentes à intensidade da radiação solar  $I$  ( $\beta_{opt}$ ), densidade da radiação solar  $G$  ( $\beta_{opt}$ ), número de horas equivalentes de Sol  $H_{eq}$  ( $\beta_{opt}$ ), temperatura do módulo  $T_m$  ( $\beta_{opt}$ ), factor de correcção de temperatura  $K_T$  ( $\beta_{opt}$ ) e finalmente, a energia produzida  $E_{FV}$  ( $\beta_{opt}$ ) pelo gerador FV para cada dia típico de um determinado mês. O conjunto destas grandezas é apresentado na tabela 7.

Tabela 7 – Valores das diferentes grandezas calculadas (cidade de BRAGA)

MÊS	$I (\beta_{opt})$ [Wh/m <sup>2</sup> /dl]	$G (\beta_{opt})$ [W/m <sup>2</sup> /dl]	$H_{eq} (\beta_{opt})$ [h]	$T_m (\beta_{opt})$ [°C]	$K_T (\beta_{opt})$	$E_{FV} (\beta_{opt})$ [Wh/dl]
Jan.	2070,6	86,3	2,1	10,7	1,072	294,6
Fev.	3039,8	126,7	3,0	12,8	1,061	428,4
Mar.	4493,6	187,2	4,5	17,2	1,039	620,2
Abr.	5936,4	247,3	5,9	20,5	1,022	806,0
Mai.	7004,7	291,9	7,0	25,1	0,999	929,7
Jun.	7819,7	325,8	7,8	30,3	0,974	1011,0
Jul.	7731,6	322,2	7,7	32,3	0,964	989,5
Ago.	6839,5	285,0	6,8	30,6	0,972	882,8
Set.	5231,5	218,0	5,2	26,4	0,993	689,8
Out.	3414,2	142,3	3,4	19,9	1,025	464,9
Nov.	2235,8	93,2	2,2	14,4	1,053	312,6
Dez.	1718,1	71,6	1,7	11,5	1,067	243,5

A aplicação da equação 22 permite calcular o volume  $V$  de água que é bombeada pelo sistema FV, para um dia típico referente a cada mês. Os valores calculados são apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Volume diário de água que é bombeada pelo sistema FV (cidade de BRAGA)

Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
$V$ [m <sup>3</sup> /dia]	1,50	2,18	3,15	4,10	4,73	5,14	5,03	4,49	3,51	2,36	1,59	1,24

De modo a se avaliar a influência da intensidade da radiação solar e da temperatura, na quantidade diária (volume) de água bombeada pelo sistema FVB, será efectuado um balanço diário de água, onde os resultados são apresentados em percentagem do volume efectivamente consumido. Para um dia típico de cada mês, a figura 10 compara graficamente o perfil diário do consumo de água com o volume de água que é bombeado pelo sistema FVB.

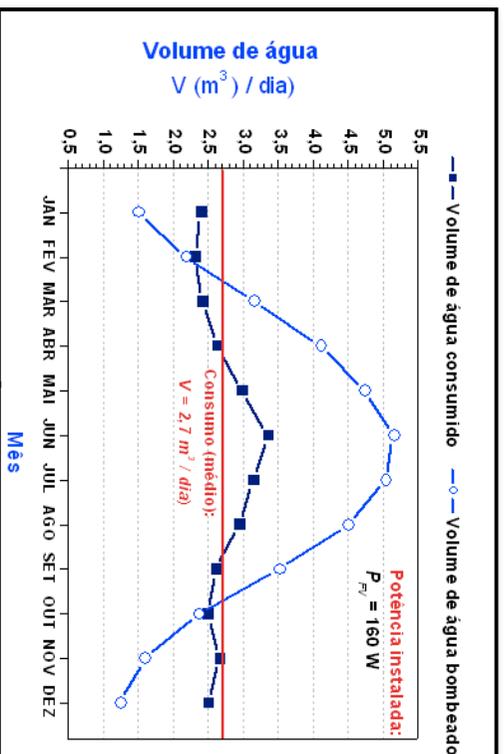


Fig.10 – Comparação entre o consumo diário de água com o volume de água que é bombeado pelo sistema FVB

A figura 11 mostra graficamente o balanço diário de água (referente a um dia típico de cada mês), sendo os resultados apresentados em percentagem do volume de água que foi efetivamente consumido.

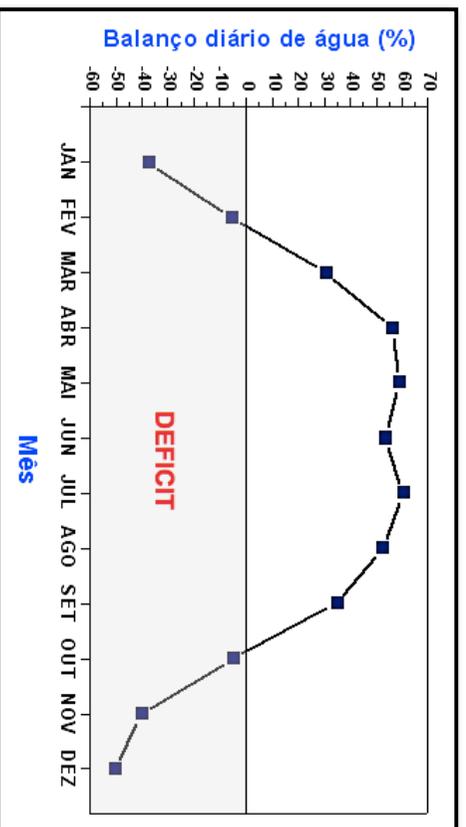


Fig. 11 – Balanço diário de água referente a um dia típico de cada mês

Analisando os resultados apresentados na figura 11, verifica-se que o facto de se contemplar os perfis de radiação e temperatura, o balanço diário de água apresenta deficit nos meses de Janeiro, Fevereiro, Outubro, Novembro e Dezembro, sendo da ordem de 50% no pior caso (Dezembro). Na verdade, este comportamento já era esperado na medida em que, estes meses do ano correspondem àqueles onde ocorre o período de menor disponibilidade energética.

O balanço diário de água tem valor positivo nos meses de Março a Setembro (sendo da ordem de 50% no melhor caso: Julho), apresentando ainda, uma quantidade de água bombeada que é muito superior àquela que é exigida para consumo directo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] [http://www.kyocerasolar.com/products/spec\\_kswaterpump.html](http://www.kyocerasolar.com/products/spec_kswaterpump.html)
- [2] <http://www.house-energy.com/Solar/Technology-Solar-Silicon.htm>