

# **Potencial energético combinado das ondas do mar e do sol para produção de energia elétrica na costa portuguesa**

**Eduardo Jorge Martins Vaz Santiago**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletrotécnica e Computadores**  
(2<sup>o</sup> ciclo de estudos)

Orientadora: Prof. Doutora Maria do Rosário Alves Calado

**Janeiro de 2021**

Potencial energético combinado das ondas do mar e do sol para produção de energia elétrica na costa portuguesa

## **Agradecimentos**

A realização do presente trabalho, representa o culminar do meu caminho académico, e como tal, não podia deixar de mencionar alguns agradecimentos. Seja pela orientação técnica e científica, seja pelo companheirismo e incentivo durante este percurso.

Em primeiro lugar, quero expor os meus sinceros agradecimentos à minha orientadora Professora Doutora Maria do Rosário Alves Calado, pelo auxílio prestado na elaboração desta dissertação e, pela sua disponibilidade de horário.

A toda a minha família que sempre acreditou e incentivou este meu percurso, especialmente à minha mãe e à minha irmã. Mãe, que sempre esteve presente e dedicada. Irmã, que deu-me suporte em todos sentidos.

Por fim aos Amigos, que não poderiam deixar de serem mencionados. Um especial agradecimento ao meu colega João Prazeres, pelo apoio e suporte académico. Foi sem dúvida um gosto, estudar e trabalhar em parceria, ao longo deste percurso.

Potencial energético combinado das ondas do mar e do sol para produção de energia elétrica na costa portuguesa

## **Resumo**

Com a presente dissertação de mestrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores, pretende-se contribuir para o desenvolvimento e investigação do potencial energético para produção de energia elétrica a partir das ondas do oceano, tendo como complemento a energia solar, na costa portuguesa continental, em sete zonas selecionadas. Assim, neste trabalho, pretende-se contribuir para os estudos já existentes nesta área científica, tendo parte deles sido conduzidos na Universidade da Beira Interior.

De forma a mitigar os efeitos da variabilidade de produção a partir da energia das ondas, adicionar ao sistema a possibilidade de aproveitamento da energia solar é uma ideia promissora. Além disso, não seriam necessárias novas infraestruturas de suporte para instalação do sistema solar fotovoltaico, ocorrendo um aproveitamento das existentes que têm como objetivo o aproveitamento da energia das ondas. Os sistemas híbridos têm muitos pontos positivos, como o aproveitamento do espaço disponível, o fornecimento de energia mais fiável, bem como um retorno de investimento mais rápido.

O estudo incide na análise mensal do potencial energético das ondas e do sol para produção de energia elétrica, permitindo verificar as melhores épocas do ano, para cada tipo de energia, e ainda analisar a variação entre as mesmas, nas zonas em análise.

Pretende-se assim disponibilizar um estudo do potencial energético da costa portuguesa, a partir de um sistema híbrido, otimizando os sistemas de conversão de energia de ambos os sistemas.

## **Palavras-chave**

Energia das ondas em Portugal; potencial energético das ondas na costa portuguesa; potencial energético do sol na costa portuguesa; sistemas híbridos renováveis na costa; potencial energético híbrido renovável

Potencial energético combinado das ondas do mar e do sol para produção de energia elétrica na costa portuguesa

## **Abstract**

This Msc. Dissertation in Electrical and Computer Engineering is intended to contribute to the development and investigation of the energetic potential of the ocean waves, having the photovoltaic energy as a complement in the Portuguese continental coast, at seven zones. With this work it is intended to contribute to the development of the renewable energies scientific field and to some already works conducted by the University of Beira Interior.

To mitigate the effects of wave variability on power output, adding solar energy seems to be a promising solution. In addition, there would be no need for new photovoltaic supporting infrastructures, taking advantage of the already existing ones. Hybrid systems have many positive points such as space optimization, a more reliable energy supply and a faster return in the investment.

This study is focused on the monthly analysis of the energy potential from the waves and the sun, allowing to know the best time of the year for each type of energy and also to analyze the gap between them, in the areas under study.

It is intended to provide a study of the energy potential from a hybrid system in the Portuguese coast, optimizing the energy conversion systems from both for waves and sun resources.

## **Keywords**

Wave energy in Portugal; wave potential on the Portuguese coast; sun potential on the Portuguese coast; Coastal hybrid renewable systems; renewable hybrid energy potential.

Potencial energético combinado das ondas do mar e do sol para produção de energia elétrica na costa portuguesa

# Índice

<b>1. Introdução</b> .....	1
1.1 Objetivos.....	3
<b>2. Enquadramento</b> .....	4
2.1 Sistemas utilizados .....	7
2.1.1 Tecnologia utilizada para a conversão da energia das ondas .....	7
2.1.2 Painéis fotovoltaicos .....	8
2.1.3 Cabos elétricos.....	8
2.2 Impacto ambiental e conflito de utilização .....	9
2.2.1 Reservas Naturais .....	9
2.2.2 Impacto visuais .....	9
2.2.3 Ruído .....	10
2.2.4 Emissões poluentes .....	11
2.2.5 Esquematização dos impactos ambientais.....	11
2.3 Zonas com potencial .....	12
2.4 O desenvolvimento em Portugal.....	13
2.5 Perspetivas futuras .....	16
<b>3. Energia das ondas</b> .....	17
3.1 Tipos de ondas formadas pelo vento.....	18
3.2 Teoria linear das ondas .....	19
3.2.1. Cinemática das partículas.....	24
3.2.2 Grupo de ondas .....	26
3.2.3 Campo de pressão.....	28
3.2.4 Energia e Potência .....	28
3.3 Conversão de energia.....	29
3.4 Energia disponível .....	30
<b>4. Análise do potencial energético das ondas</b> .....	32
4.1 Potencial energético das ondas e sua avaliação .....	32
4.2 Energia expectável nos meses em falta .....	35
4.3 Cálculo da potência útil esperada .....	38
4.4 Conclusão .....	40
<b>5. Estimativa de potência a produzir a partir do sol nas zonas em estudo..</b>	42
5.1. Potencial solar e sua avaliação .....	42
5.2. Energia solar .....	46
5.2.1 Potência solar a produzir em Aveiro .....	48
5.2.2 Potência solar a produzir em Caminha .....	50

5.2.3 Potência solar a produzir na Baía de Cascais.....	52
5.2.4 Potência solar a produzir em Esposende .....	54
5.2.5 Potência solar a produzir na Costa da Galé.....	56
5.2.6 Potência solar a produzir em Peniche .....	58
5.2.7 Potência solar a produzir no Cabo da Roca.....	60
5.3 Conclusão .....	62
<b>6. Potencial energético combinado das fontes de energia em estudo.....</b>	<b>63</b>
6.1 Exemplos de sistemas marítimos híbridos.....	64
6.1.1 Eco Wave Power .....	64
6.1.2 Marine Solar Cells.....	65
6.1.3 Ocean Hybrid Platform, SinnPower .....	66
6.2 Sistema marítimo híbrido, corpo cilíndrico flutuante com painel fotovoltaico ...	67
<b>7. Conclusão Final .....</b>	<b>70</b>
Referências .....	72
<b>Anexo A- Sistemas de corpos oscilantes.....</b>	<b>75</b>

Potencial energético combinado das ondas do mar e do sol para produção de energia elétrica na costa portuguesa

## Lista de Figuras

Figura 1.1 Estimativa de capacidade instalada para a produção de eletricidade por tecnologia em Portugal no horizonte 2030 (Resolução do Conselho de Ministros n.º 53, 2020).....	2
Figura 1.2 Mapa com as zonas em estudo. ....	3
Figura 2.1 Distribuição da densidade energética das ondas na Europa em kW/m. ....	5
Figura 2.2 Distribuição da irradiação horizontal global pelo planeta [12]. ....	6
Figura 2.3 Classificação dos dispositivos segundo a sua colocação.....	8
Figura 2.4 Zonas potencialmente utilizáveis e possíveis áreas de concessão para parques de energia das ondas na costa ocidental portuguesa [9].....	13
Figura 2.5 Zona Piloto Portuguesa.....	15
Figura 2.6 Custo espectável da energia das ondas com base na informação da Comissão Europeia (2014).....	16
Figura 3.1 Geração das ondas [24].....	18
Figura 3.2 Evolução do perfil das ondas formadas a partir do vento, ondas a) capilares, b) lineares e c) não lineares. ....	19
Figura 3.3 Notação dos parâmetros físicos bidimensionais para a teoria linear das ondas. ....	21
Figura 3.4 Trajeto elíptico descrito por uma partícula de água durante a progressão de uma onda de acordo com a teoria das ondas. ....	25
Figura 3.5 Forma do trajeto elíptico para águas a) profundas, b) intermédias e c) rasas. ....	25
Figura 3.6 Grupo de ondas. ....	27
Figura 3.7 Diferentes conceitos de conversão de energia das ondas por acionamento direto utilizando geradores lineares [4] a) absorção pontual com o fundo do oceano como sistema de 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 [7]. ....	30
Figura 4.1 Potencial energético mensal .....	35
Figura 4.2 Estudo sobre o potencial mensal durante 33 anos [31].....	36
Figura 4.3 Potencial energético mensal durante 12 meses. ....	38
Figura 4.4 Ilustração esquemática do sistema oscilante do dispositivo de conversão... ..	39
Figura 5.1 Representação esquemática das componentes constituintes da radiação global incidente numa superfície [33].....	42

Figura 5.2 Irradiação solar mensal entre 1991-2010.....	44
Figura 5.3 Irradiação solar mensal durante 2006.....	45
Figura 6.1 Fontes de energia renovável em estudo.....	63
Figura 6.2 Sistema Eco Wave Power com painel fotovoltaico incorporado.....	64
Figura 6.3 Sistema com células solares marinhas.....	65
Figura 6.4 Tipos de módulos possíveis.....	66
Figura 6.5 Módulo híbrido para absorção de energias das ondas, sol e vento.....	66
Figura 6.6 Sistema híbrido usado para calcular o potencial energético combinado das ondas e do sol.....	67
Figura A.1 Norwegian buoy [40].....	76
Figura A.2 Desenho esquemático do IPS Buoy [40].....	77
Figura A.3 Desenho esquemático do Aqua Buoy [40].....	78
Figura A.4 PowerBuoy. [ <a href="http://www.oceanpowertechnologies.com">http://www.oceanpowertechnologies.com</a> ].....	78
Figura A.5 Desenho artístico do dispositivo Wavebob. [ <a href="http://www.wavebob.com/how_wavebob_works/">http://www.wavebob.com/how_wavebob_works/</a> ].....	79

Potencial energético combinado das ondas do mar e do sol para produção de energia elétrica na costa portuguesa

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Possíveis impactos na fase de construção e instalação [7].	11
Tabela 2.2 Zonas com potencial de utilização para parques de energia das ondas na costa portuguesa continental [9].	12
Tabela 4.1 Informação de cada localização em estudo.	33
Tabela 4.2 Valores médios da altura e tempo de onda para cada zona de estudo.	34
Tabela 4.3 Potencial energético esperado mensalmente.	34
Tabela 4.4 Potencial energético esperado por tempo sazonal.	35
Tabela 4.5 Potências média e máxima sazonais num estudo de 33 anos [31].	36
Tabela 4.6 Potencial energético esperado anual.	37
Tabela 4.7 Potência útil esperada.	39
Tabela 5.1 Irradiação solar mensal em kWh/m <sup>2</sup> entre 1991-2010 [METEONORM].	44
Tabela 5.2 Irradiação solar mensal em kWh/m <sup>2</sup> em 2006.	45
Tabela 5.3 Especificações do módulo do painel NU-RD300 [35].	47
Tabela 5.4 Potência solar mensal nas zonas em estudo.	47
Tabela 5.5 Potência solar em Aveiro no mês de maio.	49
Tabela 5.6 Potência solar em Aveiro no mês de dezembro.	49
Tabela 5.7 Potência solar em Aveiro no mês de fevereiro.	50
Tabela 5.8 Potência solar em Caminha no mês de julho.	51
Tabela 5.9 Potência solar em Caminha no mês de dezembro.	51
Tabela 5.10 Potência solar em Caminha no mês de fevereiro.	52
Tabela 5.11 Potência solar na Baía de Cascais no mês de maio.	53
Tabela 5.12 Potência solar na Baía de Cascais no mês de dezembro.	53
Tabela 5.13 Potência solar em Esposende no mês de maio.	54
Tabela 5.14 Potência solar em Esposende no mês de dezembro.	55
Tabela 5.15 Potência solar em Esposende no mês de fevereiro.	55
Tabela 5.16 Potência solar na Costa da Galé no mês de maio.	56
Tabela 5.17 Potência solar na Costa da Galé no mês de dezembro.	57
Tabela 5.18 Potência solar na Costa da Galé no mês de fevereiro.	57
Tabela 5.19 Potência solar em Peniche no mês de maio.	58
Tabela 5.20 Potência solar em Peniche no mês de dezembro.	59
Tabela 5.21 Potência solar em Peniche no mês de fevereiro.	59
Tabela 5.22 Potência solar no Cabo da Roca no mês de maio.	60
Tabela 5.23 Potência solar no Cabo da Roca no mês de dezembro.	61
Tabela 5.24 Potência solar no Cabo da Roca no mês de fevereiro.	61

Tabela 6.1 Potencial energético esperado para o sistema híbrido apresentado neste capítulo. .... 68

Potencial energético combinado das ondas do mar e do sol para produção de energia elétrica na costa portuguesa

## Nomenclaturas

Símbolo	Designação	Unidades SI
$a_x$	Componente da aceleração da partícula de água segundo $x$	$m^2/s$
$a_z$	Componente da aceleração da partícula de água segundo $z$	$m^2/s$
$C$	Celeridade	$m/s$
$C_g$	Celeridade de grupo	$m/s$
$d$	Diâmetro do corpo flutuante	$m$
$E$	Energia total da onda	$J$
$E_c$	Energia cinética da onda	$J$
$E_p$	Energia potencial da onda	$J$
$E_\lambda$	Densidade de energia da onda	$J/m^2$
$f$	Frequência	$Hz$
$G$	Irradiação solar	$Wh/m^2$
$g_a$	Aceleração da gravidade	$m/s^2$
$G_{ref,NOCT}$	Irradiância de referência em condições de funcionamento nominal	$W/m^2$
$G_{ref,STC}$	Irradiância de referência em condições de funcionamento nominal	$W/m^2$
$h$	Profundidade	$m$
$H$	Altura da onda	$m$
$H_s$	Altura significativa da onda	$m$
$J_w$	Densidade de potência	$W/m$
$k$	Número de onda	$m^{-1}$
$L$	Indutância	$H$
$NOCT$	Temperatura da célula em condições de funcionamento nominal	$^{\circ}C$
$N_s$	Número de módulos fotovoltaicos em série	
$N_p$	Número de módulos fotovoltaicos em paralelo	
$P$	Campo de pressão criado pela água	$Pa$
$p$	Potência contida na onda	$W$
$P_{solar}$	Potência solar	$W$
$P_{PV,STC}$	Potência fotovoltaica em condição padrão de teste	$W$
$P_r$	Potência radiada	$W$
$P_u$	Potência útil absorvida	$W$
$P_v$	Perda de potência devido a efeitos viscosos	$W$
$P_w$	Potência associada à força induzida pela onda no corpo flutuante	$W$
$t$	Tempo	$s$

$T$	Período	s
$T_{amb}$	Temperatura ambiente	°C
$T_{cell}$	Temperatura da célula	°C
$T_{ref,STC}$	Temperatura de referência em condições padrão de teste	°C
$T_{ref,NOTC}$	Temperatura de referência em condições de funcionamento nominal	°C
$u_p$	Componente da velocidade da partícula de água segundo $x$	m/s
$w_p$	Componente da velocidade da partícula de água segundo $z$	m/s
$X$	Coordenada horizontal	
$Z$	Coordenada vertical	
$E$	Deslocamento vertical de uma partícula de água	m
$Z$	Deslocamento horizontal de uma partícula de água	m
$H$	Deslocamento vertical da superfície da onda	m
$\Lambda$	Comprimento de onda	m
$P$	Massa específica da água do oceano	kg/m <sup>3</sup>
$\Omega$	Frequência angular	rad/s
$\Phi$	Potencial de velocidade	m <sup>2</sup> /s
$\alpha_{VOC}$	Coefficiente de temperatura em circuito aberto	V/°C

Potencial energético combinado das ondas do mar e do sol para produção de energia elétrica na costa portuguesa

## **Lista de Acrónimos**

AWC	Archimedes Wave Swing
BBC	“Botton Boundary Condition” - Condição de fronteira do fundo do oceano
CAO	Coluna de água oscilante
DSBC	“Dinamic Surface Boundary Condition” – Condição de fronteira dinâmica da superfície
EU	União Europeia
EWP	Eco wave power
FER	Fonte de energia renovável
INET	Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
IP68	“Ingress Protection against solid and liquids” - Proteção contra entrada de sólidos e líquidos
IPMA	Instituto Português do Mar e Atmosfera
IST	Instituto Superior Técnico
KSBC	“Kinematic Surface Boundary Condition” – Condição de fronteira cinemática da superfície
LNETI	Laboratório Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
OWC	"Oscillating Water Column" - Coluna de água oscilante
SWL	“Still Water Level” – Nível de água calma
UBI	Universidade da Beira Interior

Potencial energético combinado das ondas do mar e do sol para produção de energia elétrica na costa portuguesa

## **1. Introdução**

A sociedade atual necessita de enormes quantidades de energia para garantir o funcionamento dos diferentes setores e para que os seus membros tenham uma boa qualidade de vida. Com o aumento do consumo energético, especialmente devido às economias emergentes que usam maioritariamente combustíveis fósseis, temos assistido a uma pressão a nível mundial para uma produção de energia renovável mais elevada. Com o aumento da poluição e dos seus efeitos, o recurso a combustíveis fósseis é insustentável e as energias renováveis são cada vez mais uma aposta global.

As fontes de energia renováveis, como o próprio nome indica, assentam na utilização de recursos renováveis para produção de energia elétrica. Os recursos naturais, tais como o sol, o vento, a chuva, as marés e a energia geotérmica são limitados pela quantidade de energia possível de extrair, contudo são inesgotáveis. Importante é também referir que estas envolvem danos mínimos para o meio ambiente.

Muito se tem discutido nos últimos anos sobre a evolução das energias renováveis e a necessidade de apostar nas mesmas. Portugal, a pensar num futuro com eficiência energética, e para alcançar as metas do Acordo de Paris, tem investido fortemente nas energias renováveis. Em 2016, com 54% da energia consumida, Portugal foi o 3º estado membro da União Europeia que mais usou energias renováveis, tendo recebido em 2019 um troféu internacional por estes esforços de mudança e de eficiência energética [1].

No âmbito das energias renováveis, a energia das ondas é a que tem maior potencial para progresso. Esta ultrapassa, em larga escala, a potencialidade energética e os benefícios obtidos através de outros recursos renováveis, eólica e solar. Além disso, permite-nos obter uma maior previsibilidade, estabilidade na energia gerada e com menor impacto visual. Condições estas que permitem considerar a energia das ondas como uma ótima opção para substituir a eletricidade não renovável a longo prazo [2]. Apesar dos benefícios inerentes, é um tipo de tecnologia que ainda não está “amadurecida”. Por esse facto, é importante alargar esta “visão”.

A eletricidade proveniente da tecnologia fotovoltaica (PV) ainda corresponde a uma pequena fração da produção total. No entanto, tem-se verificado um elevado crescimento ao longo dos anos. Em 2019, a fotovoltaica foi a fonte que apresentou maior crescimento, ultrapassando pela primeira vez 1 TWh de produção anual [3].

No que se refere ao sector de energia em Portugal, existe uma expectativa de que as energias renováveis irão ter uma contribuição a rondar os 80% na produção de eletricidade até 2030 [4]. Esta contribuição é ilustrada na Figura 1.1, com maior contribuição das seguintes energias: eólica, solar e hídrica. Sendo a solar a que demonstra maior potencial de crescimento e, por isso, é importante o estudo desta energia. Apesar de não se verificar ainda uma grande presença da energia das ondas, pretendemos mostrar o seu potencial neste segmento, bem como contribuir para o aumento dos estudos em torno deste tema.

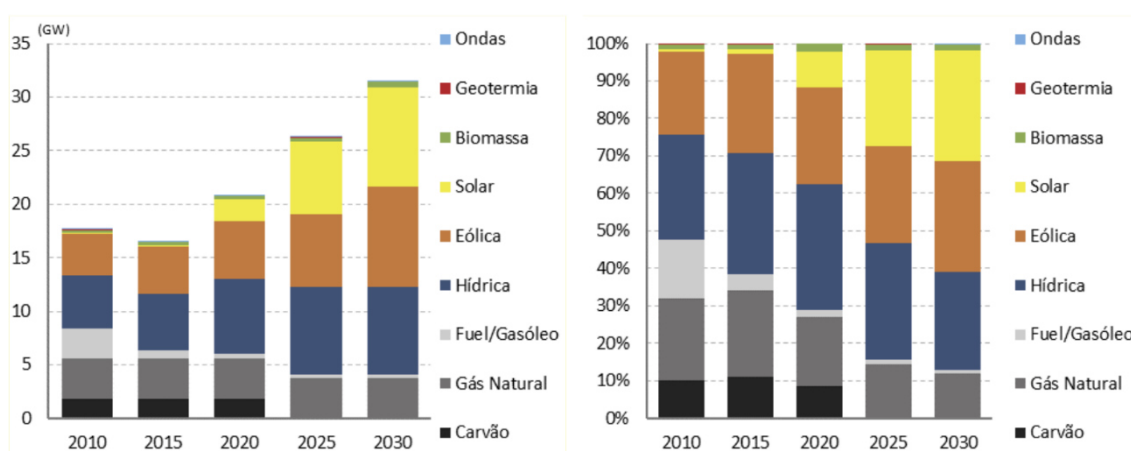


Figura 1.1 Estimativa de capacidade instalada para a produção de eletricidade por tecnologia em Portugal no horizonte 2030 (Resolução do Conselho de Ministros n.º 53, 2020).

## 1.1 Objetivos

O presente estudo tem como objetivo principal abordar e analisar as disponibilidades de potência das ondas do mar e do sol, tendo em conta a implementação de sistemas de produção híbridos junto à costa. Para esta análise, considerar-se-ão sete zonas localizadas ao longo da costa portuguesa: Aveiro, Baía de Cascais, Cabo da Roca, Caminha, Costa da Galé, Esposende e Peniche. Os dados serão recolhidos ao longo de um ano, considerando os parâmetros ambientais, junto do IPMA. Quanto aos dados meteorológicos relativos à incidência solar serão obtidos de várias fontes online gratuitas, como por exemplo o Meteonorm [5] e o HelioClim-3 [6].



Figura 1.2 Mapa com as zonas em estudo.

## **2. Enquadramento**

### **Introdução**

Os oceanos são caracterizados por uma diversidade e abundância de energia. As energias em causa vão desde a energia das marés, a energia térmica solar, a energia das correntes marítimas até à energia das ondas. Esta última resulta do efeito do vento na superfície do oceano e aparenta ser a mais promissora de todas. A sua formação deve-se à interação entre o vento e a água, podendo viajar milhares de quilómetros no alto mar praticamente sem perdas [7].

Já é do nosso conhecimento o potencial de Portugal na energia das ondas. Contudo, ainda não se tira o devido partido dos nossos recursos energéticos. Consequentemente, não estamos a promover o crescimento económico e o desenvolvimento sustentável. Deste modo, é imperativo prolongar os estudos já existentes (protocolos com investigadores de outros Países para realização de testes em Portugal com o objetivo de promover a tecnologia) e mostrar confiança aos investidores [8].

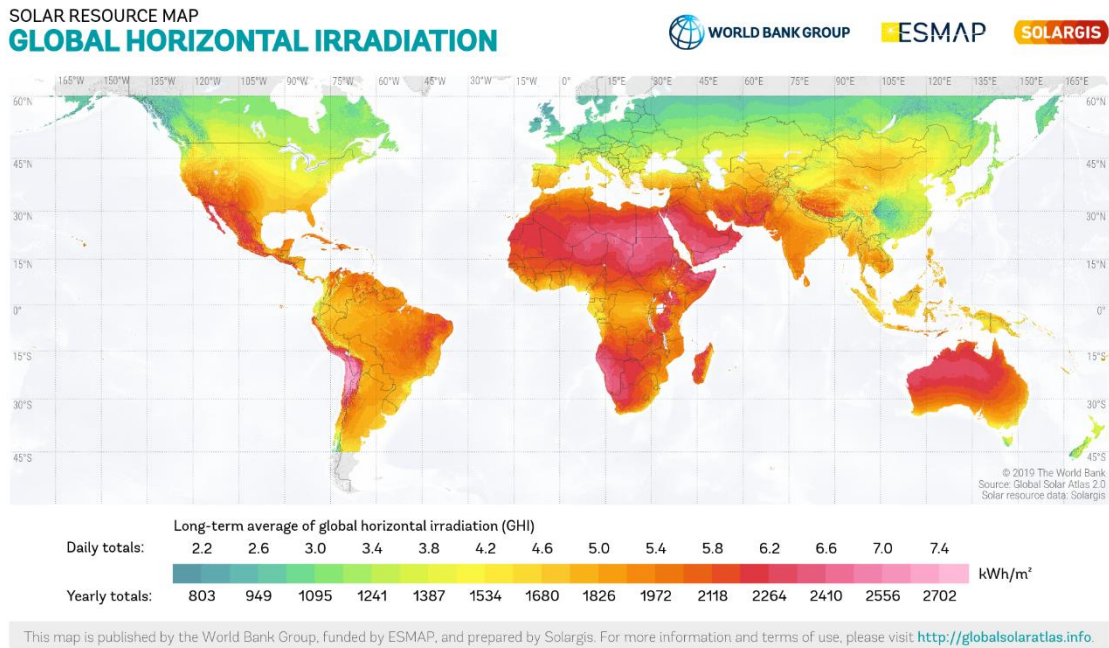
As ondas são o recurso natural que mais potencial energético renovável oferece, tornando-se num importante recurso energético a nível nacional, europeu e mundial. A nível mundial é estimado existir aproximadamente 2 TW, na Europa 300 GW e em Portugal 21 GW, sendo 15 GW na costa, Figura 2.1. Em Portugal, a densidade média de energia contida nas ondas é de 40 kW/m o que se traduz em ser uma região de médio-alto potencial (viável quando os valores são acima dos 15-20 kW/m) [9].



Figura 2.1 Distribuição da densidade energética das ondas na Europa em kW/m.

No que diz respeito ao aproveitamento de energia fotovoltaica, Portugal, com a sua grande exposição solar, torna-se um dos países mais rentáveis da Europa, Figura 2.2. Tendo em conta estas características, podemos rentabilizar os sistemas de conversão de energia das ondas, usando os mesmos como plataforma para instalação de painéis fotovoltaicos. Estes últimos, localizados no mar em vez de na terra, podem ser mais produtivos, uma vez que a temperatura atingida pelas células do painel será inferior [10]. Tendo em conta este facto, poder-se-á gerar até mais 10% de energia em sistemas instalados no mar [11]. Outra situação a referir, é a não utilização de novos espaços em terra, podendo estes ser utilizados para outra finalidade. As limitações serão o sobrecusto de manutenção e a necessidade de adequação a condições ambientais adversas (ondas causadas por vento e corrosão pela água).

Potencial energético combinado das ondas do mar e do sol para produção de energia elétrica na costa portuguesa



*Figura 2.2 Distribuição da irradiação horizontal global pelo planeta [12].*

O nosso país tem uma longa costa, com uma área marítima aproximada de 1,7 milhões de km<sup>2</sup> [13]. A costa considera-se como uma região com recurso energético médio-alto, acrescentando ainda que a maior parte da energia consumida no país é precisamente nas zonas do litoral, ficando assim o recurso gerador perto dos consumidores. No entanto, é necessário avaliar os impactos ambientais, as atividades de pesca, a navegabilidade das embarcações e o acesso e os custos de ligação à rede elétrica.

## **2.1 Sistemas utilizados**

### **2.1.1 Tecnologia utilizada para a conversão da energia das ondas**

Ao longo do tempo têm sido desenvolvidas inúmeras técnicas de extração de energia das ondas, patenteadas por todo o mundo, não apresentando concorrência entre si. Contudo, esta situação poderá ter outros contornos no futuro, tendo em conta o crescente interesse por parte de empresas e de instituições de investigação no sentido de criarem novas tecnologias de conversão [7].

Os dispositivos de conversão de energia das ondas podem ser classificados por diferentes critérios, um deles consoante a técnica de extração. Consideram-se assim três grupos: Coluna de água oscilante, CAO ("OWC - Oscillating Water Column"); Corpos oscilantes ("Oscillating Bodies") e Galgamento ("Overtopping Devices") [7].

Neste trabalho, o modelo a propor será baseado num sistema de corpo flutuante, conjugado com painéis fotovoltaicos, e, por isso, importa aprofundar este tema. Os sistemas podem ainda ser subclassificados consoante a colocação da estrutura relativamente à direção das ondas incidentes ou, devido ao tipo de movimento do dispositivo face às ondas incidentes (Figura 2.3). Para a primeira classificação, segundo [14,15] os dispositivos podem inserir-se em três grupos: Absorção pontual ("Point absorber"); Terminal ("Terminator") e Atenuador ("Attenuator"). Segundo a classificação que tem como base o movimento do dispositivo face às ondas incidentes, estes podem ser classificados como: Dispositivo de Elevação ("Heaving device"); Dispositivo de Progressão ("Surging device") e Dispositivo de rotação ("Pitching device").

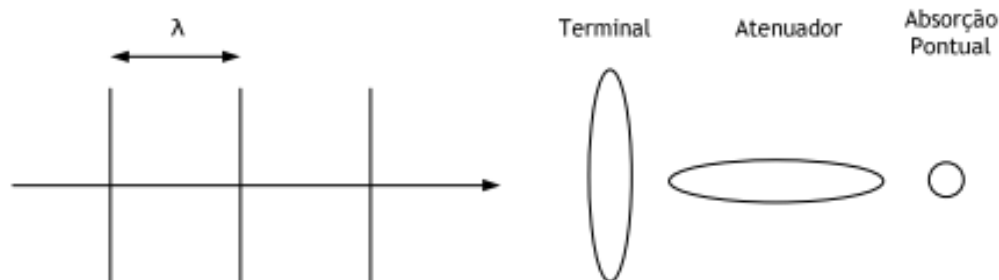


Figura 2.3 Classificação dos dispositivos segundo a sua colocação.

No Anexo A desta dissertação, encontra-se a descrição do princípio de funcionamento dos vários tipos de dispositivos de elevação, a partir de corpos oscilantes, que por natureza tendem a ser flutuantes.

### 2.1.2 Painéis fotovoltaicos

Existe uma variedade nos painéis a utilizar, contudo, a maioria das instalações têm painéis à base de silício cristalino. O silício monocristalino é o mais antigo, e ainda domina o mercado [16]. Tipicamente, apresenta eficiências entre os 13% e os 19% e é utilizado em todo o tipo de aplicações terrestres de média e elevada potência [17].

Em laboratório, os melhores módulos são baseados em silício monocristalino, com uma eficiência de 24.4% [18].

### 2.1.3 Cabos elétricos

Os cabos, assim como outras componentes do sistema, que ligam o sistema à rede elétrica, têm de ser resistentes à água e humidade, uma vez que estão constantemente envoltos num ambiente aquático. Têm por isso de ser especialmente concebidos para aguentar as condições a que estão expostos. A conexão entre a plataforma e a rede é feita a partir de cabos elétricos submarinos. Estes devem ser enterrados e devidamente protegidos para minimizar a ocorrência de danos, que podem ocorrer facilmente devido ao tráfego marítimo.

## **2.2 Impacto ambiental e conflito de utilização**

De acordo com estudos efetuados em sistemas piloto de conversão de energia das ondas, estima-se que o impacto ambiental é baixo em zonas com batimétricas entre 50 e 80 m [9]. Além disso, existe a possibilidade de criação de recifes artificiais, o que irá atrair a vida aquática, ou seja com impacto positivo no solo.

Ao longo da costa portuguesa existem zonas protegidas, denominadas como áreas de “reservas marinhas” ou “parques marinhos”. As mesmas estão protegidas para a sua própria sustentabilidade, impedindo assim a implementação de dispositivos conversores de energia elétrica. Como tal, a implementação de um dispositivo de conversão de energia das ondas terá de ter em consideração estes fatores, como a escolha da sua localização.

### **2.2.1 Reservas Naturais**

Em sequência do referido no ponto anterior, as áreas protegidas e a biodiversidade marinha têm de ser respeitadas e, como tal, não devem ser afetadas negativamente com a exploração de energia das ondas. Segundo [9], a Reserva Natural das Berlengas, o Parque Natural do Sudoeste Alentejano e a Costa Vicentina, com 50 m de profundidade, são identificadas como zonas protegidas.

São também identificadas outras zonas. Apesar de não atingirem os 50m, não deixam de merecer a devida atenção. São elas a Reserva Natural da Arrábida, a Paisagem Protegida do Litoral de Esposende, a Reserva Natural das Dunas de S. Jacinto, o Parque Natural de Sintra-Cascais e a Paisagem Protegida da Arriba Fóssil da Costa da Caparica.

Assim, existem situações a confrontar com a implementação de sistemas de energia das ondas, ou seja, a possibilidade da sua inviabilidade em determinadas zonas marítimas.

### **2.2.2 Impacto visuais**

Este tópico é de algum modo menos relevante, mas a ser considerado. Teremos de ter em atenção o ponto paisagístico, ou seja, evitar o desagrado visual para a população. Ao implementar o sistema de ondas, terá de ser bem avaliado a dimensão do parque e a

altura do dispositivo acima do nível da água. Contudo, nada comparável com as turbinas eólicas. No caso em estudo, os dispositivos teriam uma altura acima da superfície da água de poucos metros. Além dos dispositivos, é de ter em mente a sua sinalização que também terá o seu impacto visual. Esta ponderação será analisada de forma diferenciada. Nomeadamente nas áreas costeiras, importantes para fins recreativos, o impacto será mais evidente.

Assim sendo, o impacto visual não será um obstáculo para projetos de energia das ondas, principalmente se afastados da costa. Na implementação dos painéis fotovoltaicos, o impacto visual será mínimo, visto estarem bastante distantes da população.

### **2.2.3 Ruído**

O ruído é um fator variável. Ou seja, o seu grau vai estar diretamente relacionado com o funcionamento dos dispositivos de energia, a tecnologia a utilizar, a distância dos dispositivos aos recetores, a direção do vento e o estado da rebentação das ondas. Nalgumas situações podemos ter “mão” para evitar ao máximo o ruído; já noutras, que dependem do estado da natureza no momento, isso poderá não acontecer.

Este impacto poderá originar alguma não aceitação pública, caso o ruído se torne incomodativo e poderá provocar algum afastamento de aves e redução de habitat de espécies marinhas.

A questão da não aceitação pública não será uma questão muito adversa, uma vez que os dispositivos estarão distantes da costa e a distância a ser percorrida pelo som será maior debaixo de água. A mais pertinente a analisar será para as espécies marinhas, ou seja, ver se a frequência do ruído emitido é perceptível para as mesmas, dificultando as suas comunicações.

A fase mais crítica é aquando da instalação do equipamento. Não deixando de ser uma situação temporária, há que estudar o melhor procedimento para minimizar o impacto do ruído. Nomeadamente, escolher a melhor época do ano para executar a obra. Após esta fase estar concluída, a ordem natural do habitat circundante será restabelecida.

## 2.2.4 Emissões poluentes

Relativamente à questão da emissão de poluentes, todos os dispositivos que produzem energia renovável não emitem qualquer tipo de poluente durante a produção de energia; contudo, a produção dos componentes e a instalação dos mesmos passam por processos poluentes ou modificam o habitat existente. A implementação destas tecnologias envolve:

- extração e movimentos de terras (caso dos dispositivos costeiros);
- processamento de materiais;
- produção e transporte de componentes;
- construção e operação do dispositivo;
- desmantelamento;
- tratamento dos resíduos resultantes.

## 2.2.5 Esquematização dos impactos ambientais

A Tabela 2.1 esquematiza os possíveis impactos ambientais resultantes da instalação de sistemas de conversão de energia das ondas.

Tabela 2.1 Possíveis impactos na fase de construção e instalação [7].

<b>Construção e Instalação</b>		
<b>Operação</b>	<b>Possíveis Impactos</b>	<b>Medidas de Minimização</b>
Instalação de cabos submarinos	Efeitos semelhantes nas turbinas eólicas offshore: perturbação (temporária) de alguns habitats nas imediações do cabo	Evitar a colocação de cabos submarinos em zonas referenciadas
Instalação de cabos na costa	Efeitos semelhantes nas turbinas eólicas offshore: perturbação (temporária) de alguns habitats nas imediações do cabo	Evitar a colocação de dispositivos e toda a sua estrutura envolvente em zonas referenciadas
Instalação do sistema de amarração	Efeitos semelhantes na amarração de navios: perturbação (temporária) de alguns habitats	Evitar a colocação de blocos de amarração (âncoras) em zonas referenciadas
Construção do dispositivo	Impactos diversos (visuais, ruído, ...)	Sempre que possível evitar a construção do dispositivo no local
Tráfego marítimo durante a instalação	Aumento do tráfego marítimo durante a instalação de dispositivos não costeiros, o que pode afetar uma gama variada de espécies	Evitar a instalação de dispositivos em períodos relevantes para as espécies locais (migrações, períodos de descanso, ...)

## 2.3 Zonas com potencial

Tendo em conta o estudo sobre os conflitos entre os sistemas de conversão de energia das ondas e os fatores condicionantes anteriormente referidos, foram identificadas as zonas com maior potencial para a instalação dos sistemas, apresentadas na Tabela 2.2. As zonas marcadas representam uma área total de 335 km, da qual pelo menos 20% está reservada para corredores de navegação local.

A Figura 2.4 mostra as zonas potencialmente utilizáveis e as possíveis áreas de concessão para parques de energia das ondas na costa ocidental portuguesa.

Tabela 2.2 Zonas com potencial de utilização para parques de energia das ondas na costa portuguesa continental [9].

Zona	Localização	Comprimento	Profundidade
a. Zonas Prioritárias (Sem interferência significativa com outros usos)			
1	Entre Caminha e Viana do Castelo	8 km	50 m
2	Entre Viana do Castelo e Póvoa de Varzim	38 km	50 m
3	Entre Aveiro e Figueira da Foz	24 km	50 m
4	Entre Figueira da Foz e Nazaré	46 km	50 m
5	Entre Nazaré e Peniche	22 km	50 m
6	Entre Peniche e Cascais	71 km	50 m
7	Entre Sesimbra e Sines	28 km	60 – 80 m
b. Zonas de segunda prioridade (Possíveis conflitos de usos com a pesca de arrasto)			
8	Entre Douro e Aveiro	16 km	50 m
c. Zonas de segunda fase (Sem conflitos de usos, mas com eventuais dificuldades de ligação à rede elétrica)			
9	Entre Sines e Sagres	82 km	60 – 80 m

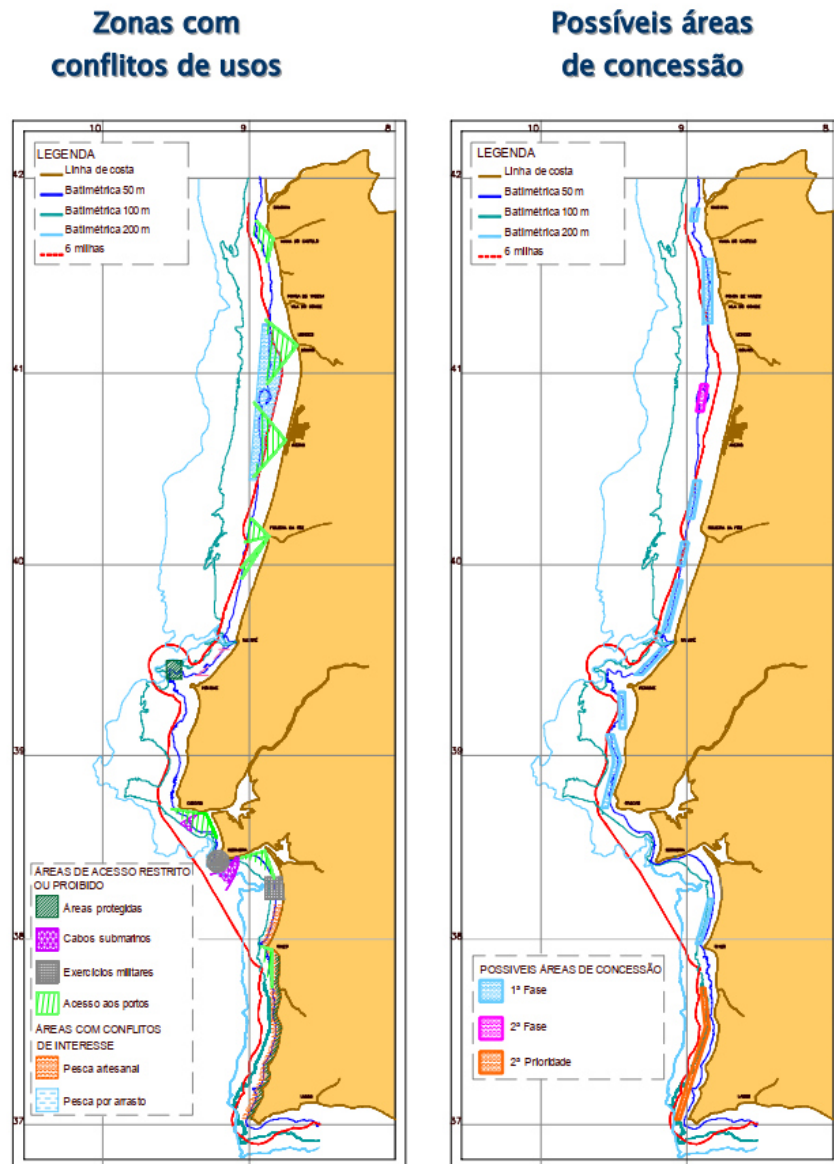


Figura 2.4 Zonas potencialmente utilizáveis e possíveis áreas de concessão para parques de energia das ondas na costa ocidental portuguesa [9].

## 2.4 O desenvolvimento em Portugal

Portugal foi um dos países pioneiros a estudar a energia das ondas. Este facto está diretamente associado às características energéticas das ondas na costa portuguesa. É de se deixar uma nota que a atividade de investigação nesta vertente iniciou-se já em 1988 no IST, na sequência de uma invenção portuguesa. Invenção essa que teve como objetivo mostrar, através de um pequeno tanque em que as ondas eram geradas manualmente, que era possível criar assim uma central de coluna de água oscilante. Tendo esta base, e

com o desenvolvimento de métodos analíticos, conseguiu-se verificar a interação de ondas com os sistemas de aproveitamento de energia. Posteriormente, após ensaios experimentais, construiu-se uma central de coluna de água oscilante (CAO) na Ilha do Pico entre 1998 e 2000. Para esta realização foram concedidos vários apoios ao projeto, desde financeiros a suporte técnico-científico.<sup>1</sup>

Numa outra fase, deu-se mais um passo neste progresso, que foi o estudo e desenvolvimento da turbina Wells. Surgiu assim o departamento de energias renováveis do INET (à data LNETI), grupo com o objetivo primordial de estudar o recurso energético das ondas em Portugal.

Posteriormente à construção da central na Ilha do Pico (Açores), a equipa IST/INETI na área da energia das ondas participou na construção de uma central na Ilha de Islay (Escócia) em 2001, e na central AWC ao Largo da Póvoa de Varzim em 2004. É ainda de referir que esta equipa continuou a revelar uma grande contribuição nesta área, em conferências, simpósios, projetos de investigação, desenvolvimento de dissertações de mestrado e teses de doutoramento, bem como em publicações de artigos científicos, tendo tido um importante impacto a nível nacional, europeu e mundial [7].

Relativamente aos sistemas de conversão existentes à escala real, existem os já mencionados Pico OWC e AWS, o Pelamis, o WaveRoller, o Powerbuoy e o Wavebob. Os últimos três sistemas foram financiados pela UE para demonstração dos sistemas à escala real e ligados à rede elétrica [19].

Neste âmbito, o Governo Português foi revelando o interesse nas energias renováveis e, em 2008, criou uma zona piloto, Figura 2.5, dedicada à instalação e estudo de dispositivos de energia das ondas. Essa zona piloto situa-se em São Pedro de Moel, com uma área de 320km<sup>2</sup>, na qual a profundidade da água varia entre os 30 e 90m. A mesma destina-se a auxiliar o desenvolvimento e otimização de sistemas para a conversão da energia de ondas em energia elétrica [20].

---

<sup>1</sup> “Apoio financeiro da EU, do estado português, da Eletricidade dos Açores e da Eletricidade de Portugal, empresas que, conjuntamente com o IST, o INETI (Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação), a Profabril e a EFACEC, forneceram o suporte técnico-científico ao projeto”.

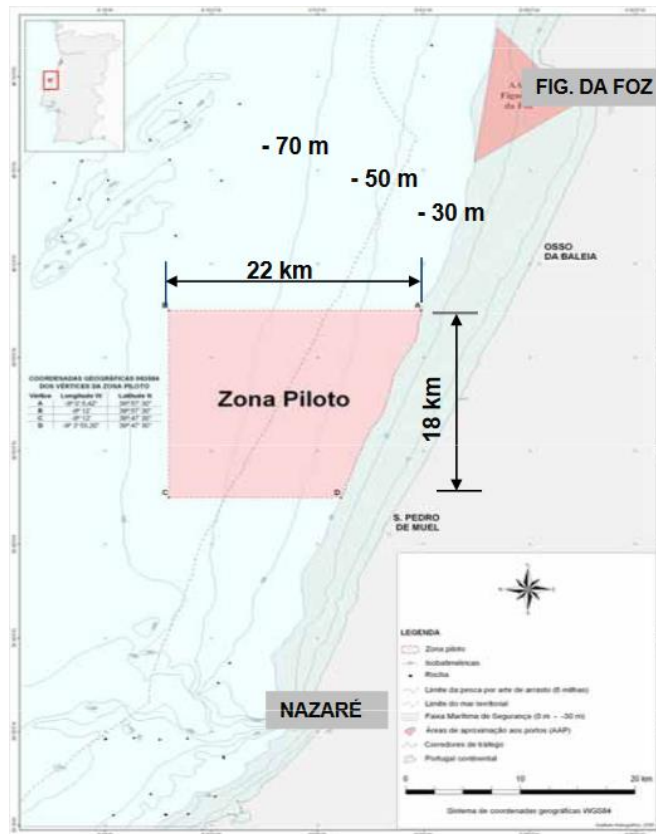


Figura 2.5 Zona Piloto Portuguesa.

## 2.5 Perspetivas futuras

A indústria da energia das ondas está a evoluir, tanto em Portugal como na Europa. E apesar de estar em fase de estudo, já se consegue ver um potencial contributo para a economia, assim como para o crescimento das energias renováveis e para a independência energética. Contudo, esta indústria ainda não tem capacidade para competir economicamente com as energias fósseis e renováveis, devido ao seu preço extremamente elevado. Este facto ocorre por se tratar de uma tecnologia emergente e ainda em desenvolvimento [21]. No entanto, é de referir que com um investimento contínuo se poderá conseguir uma otimização nos dispositivos [22], de forma a tornar esta tecnologia mais rentável e robusta. Conseguir-se-á assim uma diminuição dos custos capitais, tornando a indústria da energia das ondas viável antes de 2050, como se ilustra na Figura 2.6. Como tal, é preciso continuar a investir e a incentivar projetos nesta área, de forma a que esta tecnologia seja viável num futuro próximo.

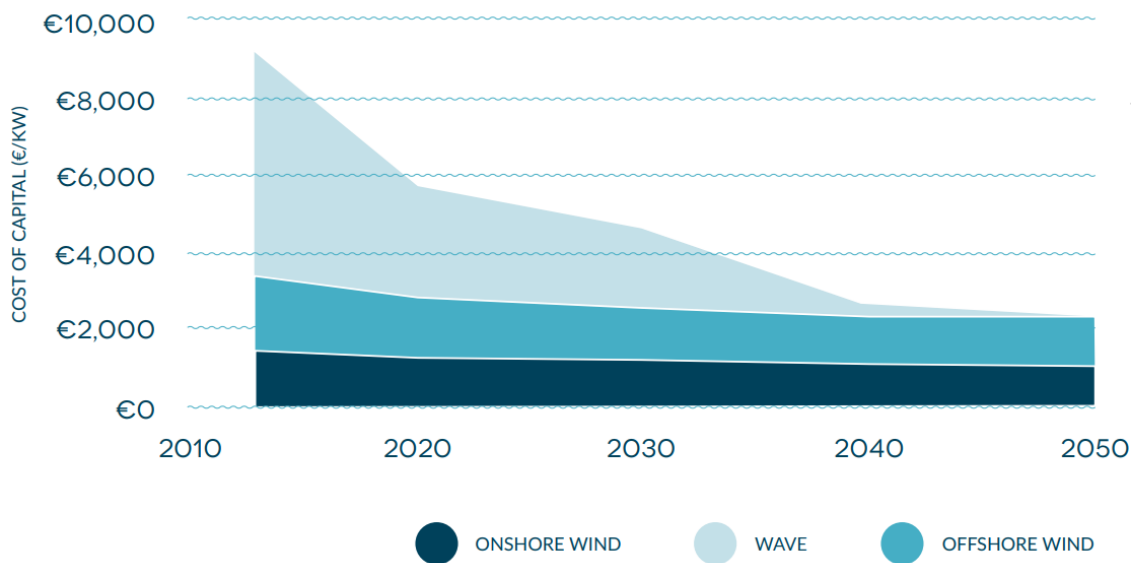


Figura 2.6 Custo espectável da energia das ondas com base na informação da Comissão Europeia (2014).

### **3. Energia das ondas**

A formação de ondas ocorre quando a superfície da água é perturbada na direção vertical e a força gravítica atua de modo a restabelecer a superfície da água para a sua posição original.

Durante este processo, a inércia subjacente à massa de água faz com que a superfície volte para a sua posição de equilíbrio, estabelecendo um movimento oscilatório. Esta oscilação perturba as massas de água adjacentes, causando a propagação frontal da onda [23].

Uma onda na superfície da água é gerada por alguma força perturbadora que normalmente é causada pelo vento, um navio em movimento, um distúrbio sísmico ou a atração gravitacional do sol e lua.

Estas forças transmitem energia à onda, que, por sua vez, transmite a energia através da superfície da água até atingir um obstáculo, como uma estrutura ou a costa, que faz com que a energia seja reutilizada ou dissipada.

As diferentes forças geradoras de ondas produzem ondas com períodos e alturas diferentes. As ondas geradas pelo vento têm um período que varia entre 1 a 30 segundos e com alturas inferiores a 3 metros; quando formadas por tempestades marítimas poderão exceder os 6 metros e com um período entre os 5 a 15 segundos. As ondas provocadas por navios têm períodos inferiores, tipicamente entre os 1 a 3 segundos, com alturas que raramente excedem o metro. Ondas geradas por atividade sísmica (tsunamis) têm períodos longos, entre 5 minutos até uma hora, com alturas inferiores a 60 centímetros, mas com a aproximação à costa, podem aproximar-se de valores superiores a 3 metros, dependendo da topografia da costa. As ondas formadas pela atração gravítica entre a terra e a lua são denominadas marés e têm um período entre 12 a 24 horas, com alturas baixas longe da costa. No entanto, com a aproximação da costa, pode atingir valores superiores a 6 metros [23].

O tipo de onda que vai ser aqui estudada é a onda com origem no vento, uma vez que são as que mais se manifestam na superfície do oceano e têm maior potencialidade para produção de energia.

### 3.1 Tipos de ondas formadas pelo vento

As ondas em estudo nesta dissertação são geradas pelo vento. Como tal, elas são essencialmente ondas devidas à energia solar concentrada. A energia do sol aquece o ar, levando a diferenças de pressão que são os “motores” que originam o vento, Figura 3.1.

Uma vez criadas, as ondas podem viajar milhares de quilómetros com pouca perda de energia, a menos que encontrem ventos de frente. Com a aproximação da zona costeira, a intensidade da energia diminui devido a interação com o solo. Contudo, a mesma pode ser compensada por fenómenos naturais [24].

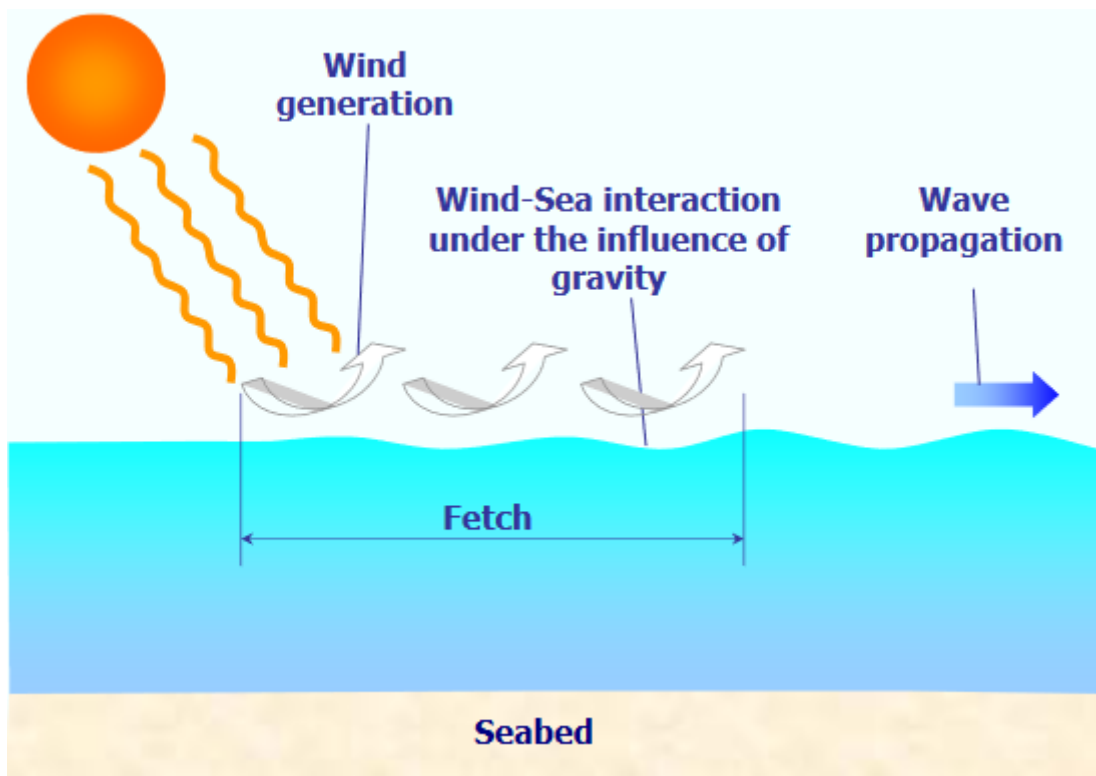


Figura 3.1 Geração das ondas [24].

Quando o vento sopra sobre um pedaço de água, criam-se pequenas diferenças de pressão na superfície do oceano, criando pequenas irregularidades ou pequenas ondulações que se chamam ondas capilares. Com o aumento da intensidade do vento, a pressão na superfície do oceano aumenta também, criando ondas com um movimento

idêntico a uma senoide, e que podem ser representadas matematicamente por equações lineares devido à simplicidade do seu perfil. Quando o vento atinge velocidades superiores, a altura e comprimento de onda aumentam devido ao gradiente de pressão horizontal, que origina uma separação do escoamento de ar no sotavento da crista da onda. Estas, apresentam uma crista afunilada e uma cava ampla, representando o perfil mais aproximado das ondas do oceano, designando-se de ondas não lineares. Estes três perfis de ondas são ilustrados na Figura 3.2.

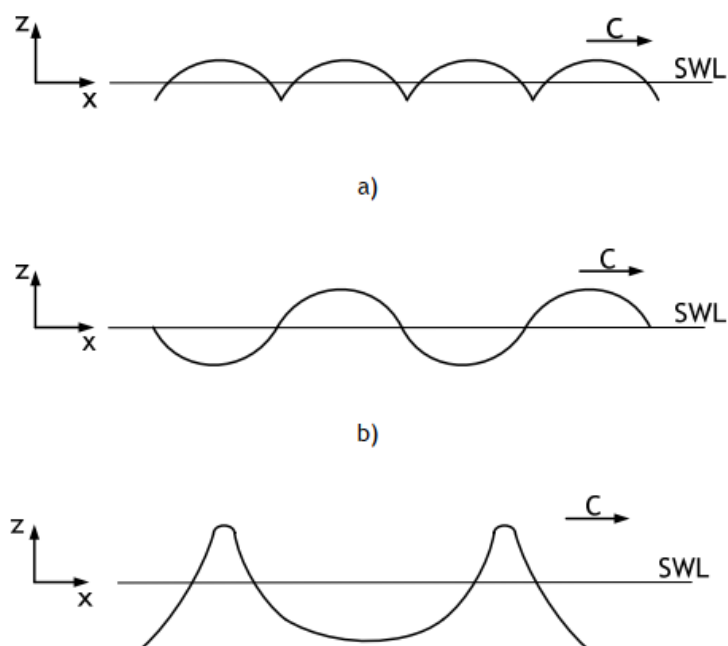


Figura 3.2 Evolução do perfil das ondas formadas a partir do vento, ondas a) capilares, b) lineares e c) não lineares.

### 3.2 Teoria linear das ondas

A teoria linear das ondas é destinada a ondas com um perfil semelhante a uma senoide, diferente do estudo desta dissertação, que podem, contudo, ser avaliadas como tal, assumindo que o seu comportamento não linear é desprezado. Assim, as ondas são analisadas segundo o mesmo princípio das ondas sinusoidais e podem ser descritas por expressões lineares, de modo a simplificar a sua avaliação.

Esta teoria é fundamentada assumindo determinados pressupostos que são especificados em [23] e que de uma forma sucinta são os seguintes:

- A água é homogénea e incompressível, O comprimento da onda é longo o suficiente de modo a que as forças de tensão superficial são desprezáveis (i.e., comprimentos de onda superiores a 3 centímetros).
- O escoamento é irrotacional. A água não sofre tensões de corte na superfície livre (zona de interação entre o ar e a água) nem no fundo do oceano. Não são consideradas outras ondas formadas pelos efeitos do vento e a água escorrega livremente no fundo do oceano e em outras superfícies sólidas e fixas. Deste modo, o potencial de velocidade  $\Phi$  deve satisfazer a equação de Laplace (3.1) para um escoamento bi-dimensional:

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.1)$$

em que  $x$  e  $z$  são as coordenadas horizontal e vertical, respetivamente.

- O fundo do oceano é estacionário, impermeável e horizontal. Portanto, o fundo não adiciona, não remove e nem reflete energia às ondas.
- A pressão ao longo da superfície livre da água é constante, sendo desprezável o gradiente de pressão aerostático entre a crista e a cava das ondas.
- A altura das ondas é pequena comparada com o seu comprimento e com a profundidade do oceano.

A formulação da teoria linear das ondas resulta da solução da equação (3.1), apoiando-se em três condições de fronteira, duas para a superfície livre e uma para o fundo do oceano.

As condições de fronteira são:

- Condição de fronteira cinemática da superfície (KSBC) – qualquer partícula de água que se situe na superfície livre mantém-se nessa superfície, apesar de esta sofrer ondulação devido à propagação da onda.
- Condição de fronteira dinâmica da superfície (DSBC) – o valor da pressão relativa na superfície livre é nulo para qualquer posição e instante de tempo.
- 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.

As propriedades hidrodinâmicas, indicadas neste capítulo, são derivadas da teoria linear das ondas. A sua formulação encontra-se fora do âmbito desta dissertação, sendo apenas indicadas as expressões matemáticas relevantes e parâmetros físicos associados. A formulação da teoria linear das ondas, assim como das expressões dela derivadas, encontra-se detalhada em [23, 25-28].

As ondas do oceano são caracterizadas por propriedades físicas que permitem a determinação das restantes propriedades hidrodinâmicas. O nível de água calma (SWL) representa o nível superfície da água do oceano ausente de ondulação (em condições calmas). O valor da sua cota no referencial é cartesiano e 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 3.3. A onda move-se a uma velocidade de fase ou celeridade  $C$  dada por:

$$C = \frac{\lambda}{T} \quad (3.2)$$

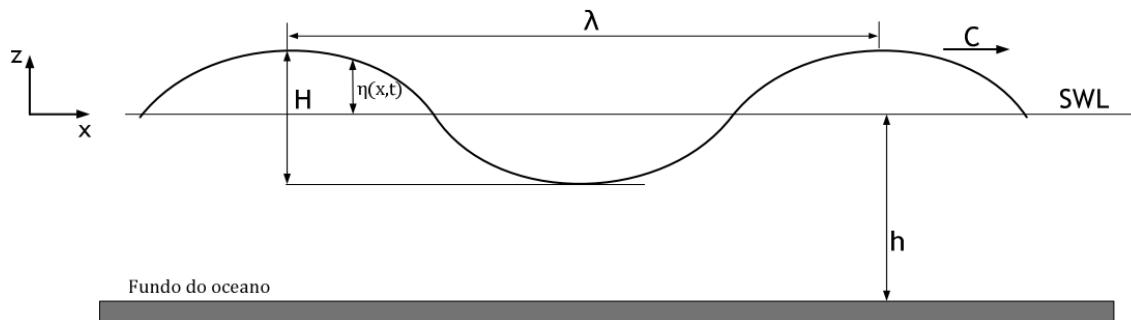


Figura 3.3 Notação dos parâmetros físicos bidimensionais para a teoria linear das ondas.

Na determinação das propriedades hidrodinâmicas das ondas são utilizados alguns parâmetros adimensionais que caracterizam a onda, como o número de onda, a frequência angular e a inclinação. O número de onda  $k$  define a quantidade de ondas por unidade de distância segundo o eixo do  $x$ .

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

A frequência angular das ondas  $\omega$ , ou seja, o número ondas por unidade de tempo é dado por:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f = kC \quad (3.4)$$

A inclinação da onda é definida como a razão entre a sua altura e o seu comprimento. Este parâmetro indica o quanto a onda é afunilada e calcula-se de acordo com:

$$\text{Inclinação da onda} = \frac{H}{\lambda} \quad (3.5)$$

O potencial de velocidade  $\Phi$  é uma função escalar utilizada em mecânica dos fluidos que define o integral do vetor velocidade ao longo de uma distância. O vetor 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 vetor velocidade ( $u_p$ ,  $v_p$  e  $w_p$ ) para apenas uma ( $\Phi$ ) facilitando assim a sua computação. Assim, a equação da continuidade pode ser expressa pela equação de Laplace (3.1), a qual já apresenta uma solução analítica geral. A teoria linear das ondas é formulada resolvendo a equação (3.1) com as condições fronteiras apropriadas, cujo procedimento não faz parte do contexto desta dissertação, como já foi referido. Através da solução da equação (3.1) é possível derivar o potencial de velocidade para a teoria linear das ondas. Este é dado por:

$$\Phi = \frac{H g_a}{2 w} \frac{\cos h[k(z+h)]}{\cos h(kh)} \sin(kx - wt) \quad (3.6)$$

A equação do deslocamento vertical superfície da onda é dada por:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - wt) \quad (3.7)$$

Para a teoria linear das ondas, a frequência angular, o comprimento de onda e a celeridade podem ser expressos em função do número de onda pelas seguintes relações:

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

$$\lambda = \frac{g_a T^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \quad (3.9)$$

$$C = \frac{g_a T}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \quad (3.10)$$

O valor do comprimento de onda não pode ser calculado analiticamente, sendo necessário recorrer a processos iterativos de tentativa e erro para obter a solução.

As relações (3.8) a (3.10) 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.

As propriedades hidrodinâmicas das ondas variam consoante a profundidade da zona marítima em que se propagam. Esta é caracterizada pela profundidade relativa dada pela razão entre a profundidade e o comprimento da onda ( $h/\lambda$ ). Tendo em conta este parâmetro adimensional, as ondas podem propagar-se em três regiões distintas:

Água rasa	$\frac{h}{\lambda} < \frac{1}{20}$	$\rightarrow \tanh(kh) \approx \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)$
Água intermédia	$\frac{1}{20} < \frac{h}{\lambda} < \frac{1}{2}$	$\rightarrow \tanh(kh) \approx \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)$
Água profunda	$\frac{h}{\lambda} > \frac{1}{2}$	$\rightarrow \tanh(kh) \approx 1$

Tendo em conta as relações anteriores, em águas profundas, as equações da dispersão (3.8) a (3.10) reduzem-se a:

$$\omega = \sqrt{g_a k} \quad (3.11)$$

$$\lambda = \frac{g_a T^2}{2\pi} \quad (3.12)$$

$$C = \frac{g_a T}{2\pi} \quad (3.13)$$

Neste caso, em que  $h/\lambda > 0.5$ , as ondas não interagem com o fundo do oceano sendo as suas características totalmente independentes da profundidade.

No caso de águas rasas, para  $h/\lambda < 0.05$ , a celeridade e comprimento de onda já dependem da profundidade, ficando:

$$\omega = \sqrt{g_a k^2 h} \quad (3.14)$$

$$\lambda = T \sqrt{g_a h} \quad (3.15)$$

$$C = \sqrt{g_a h} \quad (3.16)$$

### 3.2.1. Cinemática das partículas

Segundo a teoria linear, à medida que a onda se propaga, as partículas de água descrevem uma trajetória orbital (Figura 3.4). 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. Para águas intermédias e rasas, a órbita toma a forma de uma elipse, que se torna mais achatada com o aumento da profundidade (Figura 3.5).

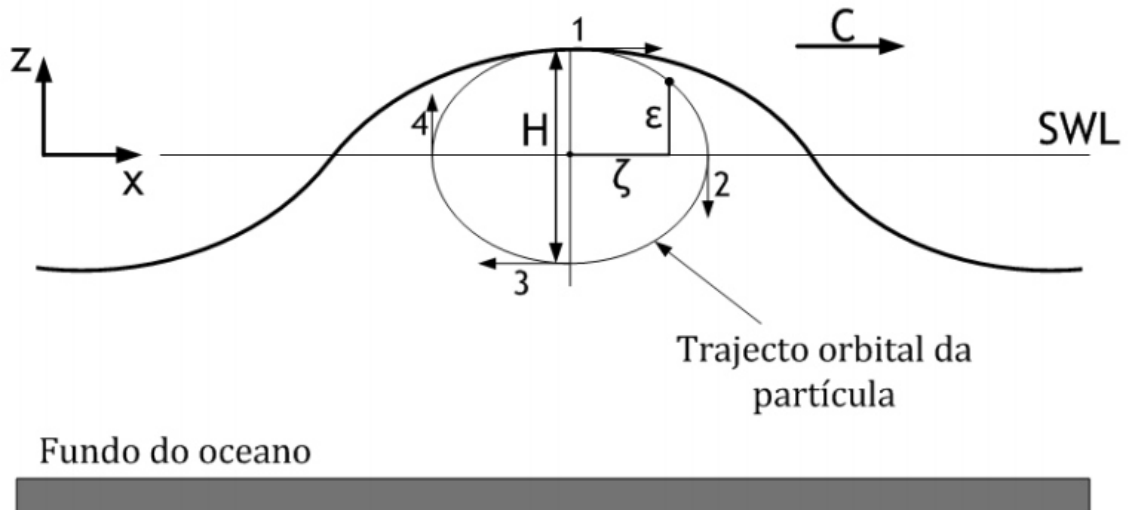


Figura 3.4 Trajeto elíptico descrito por uma partícula de água durante a progressão de uma onda de acordo com a teoria das ondas.

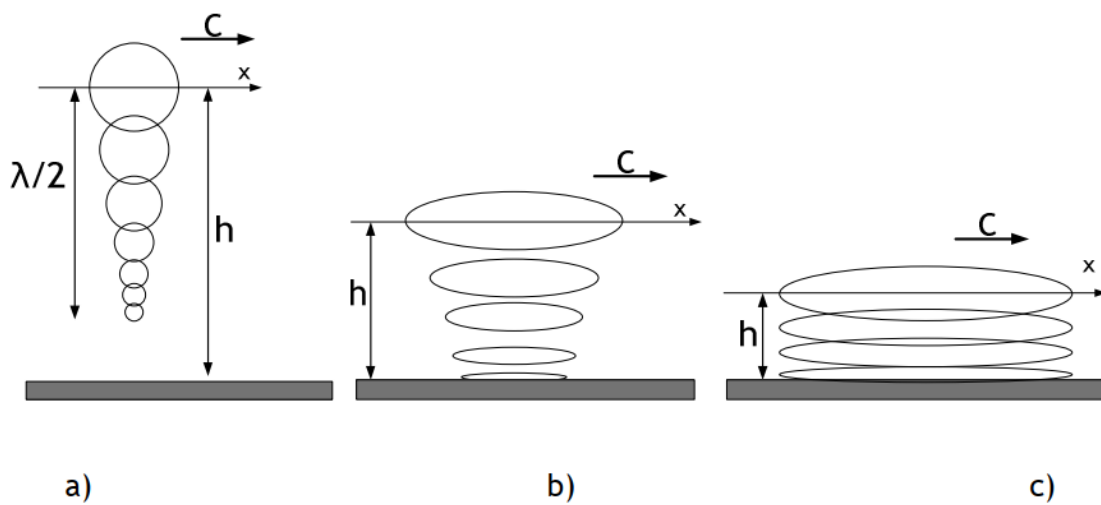


Figura 3.5 Forma do trajeto elíptico para águas a) profundas, b) intermédias e c) rasas.

No caso bidimensional, as componentes horizontal e vertical da velocidade, aceleração e deslocamento podem ser obtidas a partir do potencial de velocidade derivado da teoria linear das ondas. As componentes da velocidade horizontal e vertical das partículas são dadas, respetivamente, por:

$$u_p = \frac{\pi H}{T} \frac{\cos h[k(z+h)]}{\sin h(hd)} \cos(kx - wt) \quad (3.17)$$

$$w_p = \frac{\pi H}{T} \frac{\sin h[k(z+h)]}{\sin h(hd)} \sin(kx - wt) \quad (3.18)$$

Para as componentes da aceleração tem-se:

$$a_x = \frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\cos h[k(z+h)]}{\sin h(hd)} \sin(kx - wt) \quad (3.19)$$

$$a_z = \frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\sin h[k(z+h)]}{\sin h(hd)} \cos(kx - wt) \quad (3.20)$$

A órbita descrita pela partícula apresenta deslocamentos vertical e horizontal, relativamente ao centro, expressos por:

$$\zeta = \frac{-H}{2} \frac{\cos h[k(z+h)]}{\sin h(hd)} \sin(kx - wt) \quad (3.21)$$

$$\varepsilon = \frac{H}{T} \frac{\cos h[k(z+h)]}{\sin h(hd)} \cos(kx - wt) \quad (3.22)$$

### 3.2.2 Grupo de ondas

As propriedades até agora mencionadas referem-se apenas a uma onda regular individual. No entanto, as ondas propagam-se em grupos de várias ondas individuais. Considerando a hipótese de fluido irrotacional, na qual se baseia a teoria linear, os grupos de onda são constituídos por ondas regulares sobrepostas formando, neste caso, um padrão irregular (Figura 3.6).

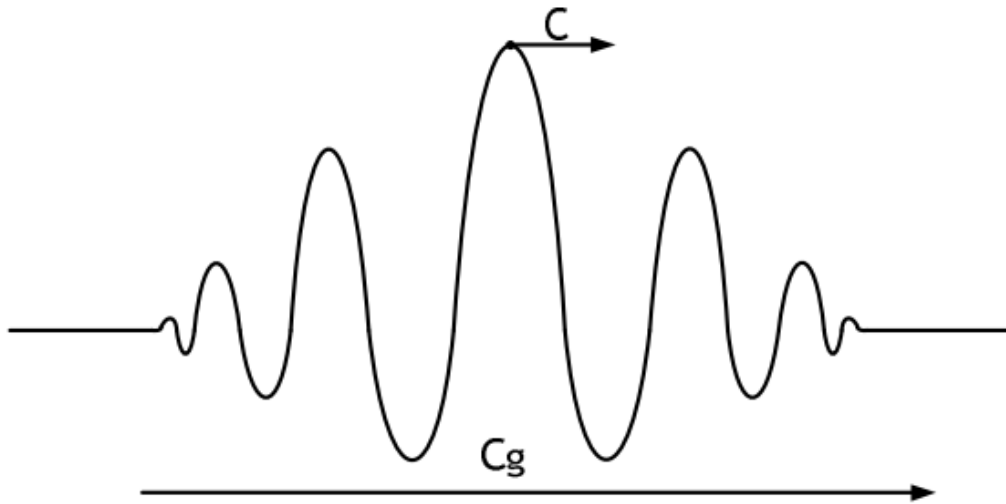


Figura 3.6 Grupo de ondas.

À medida que o grupo de onda 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 é menor que a celeridade de uma onda regular contida no grupo, sendo dada por:

$$C_g = \frac{c}{2} \left[ 1 + \frac{2kh}{\sin h(2kh)} \right] \quad (3.23)$$

Para águas profundas, a expressão dentro de parênteses na equação (3.23) torna-se igual à unidade. Portanto, para um grupo de ondas que se propaga nesta zona, a celeridade do grupo é metade da celeridade da onda individual.

$$C_g = \frac{c}{2} \quad (3.24)$$

Em águas rasas a celeridade do grupo mantém-se igual à celeridade da onda individual, ficando:

$$C_g = C \quad (3.25)$$

### 3.2.3 Campo de pressão

O campo de pressão originado pelas ondas do oceano,  $P$ , é dado por:

$$P = -\rho g_a z + \frac{\rho g_a H}{2} \left[ \frac{\cos hk(h+z)}{\cosh(kh)} \right] \cos(kx - wt) \quad (3.26)$$

Em que, no segundo membro da equação, 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. Em águas profundas, a pressão dinâmica anula-se para distâncias superiores a  $\lambda/2$  abaixo do nível da água atuando, neste caso, apenas a pressão hidrostática [23].

### 3.2.4 Energia e Potência

As ondas do oceano representam energia mecânica em transição. Esta energia mecânica resulta da soma das energias cinética e potencial das ondas superficiais. Trata-se de uma característica fundamental a ser considerada em sistemas de conversão de energia, uma vez que condiciona o projeto e desempenho do dispositivo de conversão.

De acordo com a teoria linear das ondas, a energia cinética  $E_C$  é dada por:

$$E_C = \frac{\rho g_a H^2 \lambda L}{16} \quad (3.27)$$

Sendo a energia potencial  $E_p$  expressa por:

$$E_p = \frac{\rho g_a H^2 \lambda L}{16} \quad (3.28)$$

Que é igual à energia cinética. A energia total contida numa onda fica:

$$E = E_C + E_p = \frac{\rho g_a H^2 \lambda L}{8} \quad (3.29)$$

Torna-se útil expressar a energia por unidade de superfície de área, ou seja, por comprimento de onda considerando uma largura unitária. Assim a energia é definida em termos de densidade  $E_\lambda$ , sendo dada por:

$$E_\lambda = \frac{E}{\lambda \times 1} = \frac{\rho g a H^2}{8} \quad (3.30)$$

Como as ondas do oceano representam energia mecânica em transição, torna-se relevante determinar a taxa de transporte de energia na direção de propagação das ondas, designada como fluxo de energia ou potência. O fluxo de energia é determinado pelo produto da força induzida no plano normal à direção de propagação da onda e pela velocidade horizontal das partículas de água nesse plano. A força induzida pela onda resulta da pressão dinâmica.

Derivada da teoria linear das ondas, a expressão para o fluxo de energia associada às ondas do oceano é dada por:

$$P = \frac{\rho g a H^2 C L}{16} \left[ 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \quad (3.31)$$

Em função da celeridade de grupo, fica:

$$P = \frac{\rho g a H^2 C_g L}{8} \quad (3.32)$$

A expressão anterior pode ainda ser expressa em densidade de potência, ou seja, por largura de onda, ficando:

$$J_w = \frac{P}{L} = \frac{\rho g a H^2 C_g}{8} = E_\lambda C_g \quad (3.33)$$

### 3.3 Conversão de energia

Neste subcapítulo, retratamos a conversão da energia das ondas em energia elétrica através do acionamento direto do gerador. Segundo [7] existem vários conceitos no que respeita à conversão de energia por acionamento direto. Contudo, a maioria é composta por corpos de absorção pontual acoplados à parte móvel do gerador. Estes corpos de absorção pontual podem ser submersos ou flutuantes. No caso dos corpos flutuantes, estes movem-se tendo em conta uma estrutura de referência, sendo esta flutuante ou fixa

no fundo do oceano (Figura 3.7a), b), c)). Já no caso dos sistemas submersos, estes variam conforme a ondulação da superfície do oceano, isto porque a oscilação vertical da parte móvel, relativamente à fixa, deve-se à pressão causada pela coluna de água que se encontra acima do sistema (Figura 3.7d)). Estes dispositivos de conversão são caracterizados por baixas velocidades de operação e grandes forças de reação.

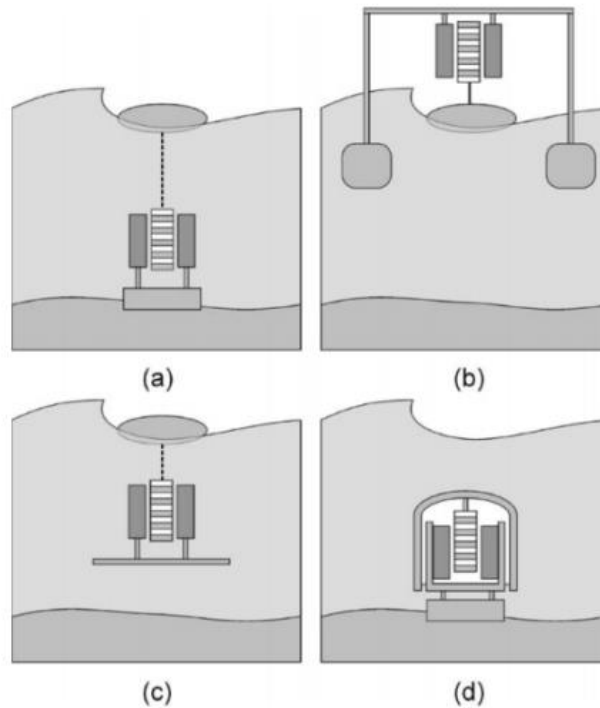


Figura 3.7 Diferentes conceitos de conversão de energia das ondas por acionamento direto utilizando geradores lineares [4] a) Absorção pontual com o fundo do oceano como sistema de referência, b) absorção pontual com estrutura flutuante como referência, c) absorção pontual com placa de amortecimento submersa como sistema de referência, d) reservatório de gás submerso com o fundo do oceano como referência [7].

### 3.4 Energia Disponível

O sistema de absorção pontual abordado nesta dissertação utiliza o conceito ilustrado na Figura 3.7 a), ou seja, será um corpo flutuante com o fundo do oceano como referência. Este corpo é responsável pela extração da energia das ondas de forma a ser convertida em energia elétrica pelo gerador.

Do total da potência fornecida pelas ondas, há que referir que apenas uma parte é transferida pelo corpo para o gerador. Isto porque, existe uma parte da energia disponível que acaba por ser perdida, limitando assim a energia útil para conversão. Esta perda é provocada por fenómenos de radiação e por efeitos viscosos da água do mar. Sendo assim, desprezando-se as perdas de energia em componentes mecânicos, a potência útil absorvida  $P_u$ , disponível para o gerador é:

$$P_u = P_w - P_r - P_v \quad (3.34)$$

Em que  $P_w$  é associada à força induzida pela onda,  $P_r$  é a potência radiada e  $P_v$  a perda de potência devido aos efeitos viscosos. Segundo [29], em termos práticos, demonstra-se que apenas 20% da densidade de energia disponível na onda é efetivamente aproveitada pelo corpo. Sendo assim, a potência útil absorvida pelo corpo cilíndrico é dada por:

$$P_u = 0,2 \times J_w \times d_c \quad (3.35)$$

Em que  $d_c$  é o diâmetro do corpo flutuante e  $J_w$  a densidade de potência.

## 4. Análise do potencial energético das ondas

### 4.1 Potencial energético das ondas e sua avaliação

O comportamento das ondas é avaliado através de parâmetros marítimos provenientes de 7 locais diferentes. Para todos os locais, cada parâmetro, altura significativa ( $H_s$ ) e período médio ( $T$ ), é descrito por 973 observações, as quais foram recolhidas diariamente em períodos de 6 horas. Os dados, fornecidos pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera, foram recolhidos durante um período de 8 meses, que teve início a 1 de julho de 2010 e terminou a 1 de março de 2011. As observações foram recolhidas em Aveiro, Baía de Cascais, Cabo de Roca, Caminha, Costa de Gale, Esposende e Peniche (Figura 1.2). A principal razão pela qual estes locais foram selecionados para estudo, deve-se ao seu grande potencial de utilização de sistemas de conversão de energia das ondas como indicado na secção 2.3.

Com base nos valores fornecidos pelo IPMA, permitiu-nos construir a tabela 4.1 onde se encontram as coordenadas de cada zona em estudo, assim como, o intervalo de valores correspondente às observações recolhidas. Através da ferramenta *Microsoft Office Excel* calculamos a altura e tempo médio de onda em cada zona, observados na Tabela 4.2.

Para o cálculo do potencial energético usamos as equações apresentadas no capítulo anterior com o apoio da ferramenta *Matlab* [30], elaboramos as Tabelas 4.3 e 4.4. Na Tabela 4.3 vemos o potencial energético esperado mensalmente por zona, e na Tabela 4.4 por época sazonal.

Por fim, de forma a observar o potencial energético por zona e por mês, elaboramos a Figura 4.1.

Tabela 4.1 Informação de cada localização em estudo.

Local	Coordenadas	Profundidade $h$ (m)	Observações	
			Altura significativa $H_s$ (m)	Período Médio $T$ (m)
Aveiro	<i>Latitude</i> 40° 38.6" N <i>Longitude</i> 8° 46.7' W	12	[1 - 10,5]	[5,2 - 14,7]
Baía de Cascais	<i>Latitude</i> 38° 41.1" N <i>Longitude</i> 9° 24.9' W	11	[0,4 - 8,2]	[4,5 - 14,4]
Cabo da Roca	<i>Latitude</i> 38° 46.8" N <i>Longitude</i> 9° 31.0' W	40	[1 - 9,5]	[5,1 - 14,1]
Caminha	<i>Latitude</i> 41° 51.3" N <i>Longitude</i> 8° 53.3' W	18	[0,8 - 10]	[4,9 - 14,7]
Costa de Galé	<i>Latitude</i> 38° 15.4" N <i>Longitude</i> 8° 47.7' W	20	[0,6 - 7,1]	[4,4 - 13,4]
Esposende	<i>Latitude</i> 41° 30.0" N <i>Longitude</i> 8° 50.0' W	30	[0,9 - 9,3]	[5 - 13,8]
Peniche	<i>Latitude</i> 39° 20.3" N <i>Longitude</i> 9° 22.7' W	14	[0,6 - 9,7]	[5 - 14,5]

Potencial energético combinado das ondas do mar e do sol para produção de energia elétrica na costa portuguesa

Tabela 4.2 Valores médios da altura e tempo de onda para cada zona de estudo.

Local	Valores médios mensais							
	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Janeiro	Fevereiro
Aveiro	$H_s=1,85m$	$H_s=1,67m$	$H_s=1,62m$	$H_s=2,44m$	$H_s=3,04m$	$H_s=2,27m$	$H_s=2,19m$	$H_s=3,44m$
	$T=7,10s$	$T=6,57s$	$T=7,68s$	$T=8,78s$	$T=9,32s$	$T=9,03s$	$T=8,91s$	$T=10,67s$
Baía de Cascais	$H_s=0,93m$	$H_s=0,80m$	$H_s=0,97m$	$H_s=1,78m$	$H_s=1,96m$	$H_s=2,81m$	$H_s=1,98m$	$H_s=2,59m$
	$T=6,42s$	$T=6,23s$	$T=7,61s$	$T=8,58s$	$T=9,10s$	$T=9,14s$	$T=8,93s$	$T=10,70s$
Cabo da Roca	$H_s=1,91m$	$H_s=1,63m$	$H_s=1,66m$	$H_s=2,36m$	$H_s=2,84m$	$H_s=2,78m$	$H_s=2,25m$	$H_s=2,25m$
	$T=6,78s$	$T=6,57s$	$T=7,19s$	$T=8,25s$	$T=8,80s$	$T=8,46m$	$T=8,28s$	$T=8,28s$
Caminha	$H_s=1,68m$	$H_s=1,51m$	$H_s=1,50m$	$H_s=2,34m$	$H_s=2,90m$	$H_s=2,17m$	$H_s=2,08m$	$H_s=3,23m$
	$T=6,89s$	$T=6,39s$	$T=7,53s$	$T=8,58s$	$T=9,19s$	$T=8,65s$	$T=8,54s$	$T=10,50s$
Costa de Galé	$H_s=1,19m$	$H_s=1,03m$	$H_s=1,14m$	$H_s=1,71m$	$H_s=1,81m$	$H_s=2,16m$	$H_s=1,78m$	$H_s=2,40m$
	$T=5,77s$	$T=5,79s$	$T=6,68s$	$T=7,8s$	$T=7,91s$	$T=8,40s$	$T=8,31s$	$T=9,84s$
Esposende	$H_s=1,71m$	$H_s=1,57m$	$H_s=1,53m$	$H_s=2,34m$	$H_s=2,80m$	$H_s=2,37m$	$H_s=2,17m$	$H_s=3,24s$
	$T=6,68s$	$T=6,30s$	$T=7,22s$	$T=8,15s$	$T=8,65s$	$T=8,37s$	$T=8,14s$	$T=9,79m$
Peniche	$H_s=1,31m$	$H_s=1,17m$	$H_s=1,25m$	$H_s=2,09m$	$H_s=2,49m$	$H_s=2,17m$	$H_s=1,96m$	$H_s=3,05m$
	$T=7,18s$	$T=6,64s$	$T=8,00s$	$T=8,97s$	$T=9,47s$	$T=9,27s$	$T=9,09s$	$T=10,91s$

Tabela 4.3 Potencial energético esperado mensalmente.

Mês/Zona	Potência Mensal kW/m						
	Aveiro	Baía de Cascais	Cabo da Roca	Caminha	Costa da Galé	Esposende	Peniche
Jul	28.73	6.56	24.39	22.17	8.51	19.26	14.55
Ago	21.62	4.70	17.19	16.15	6.41	15.31	10.62
Set	23.62	8.35	19.54	19.79	9.59	16.67	14.74
Out	59.21	30.56	45.31	55.57	26.66	44.00	45.17
Nov	95.32	38.36	69.98	90.97	30.24	66.87	66.54
Dez	52.16	79.03	64.47	48.17	46.19	46.36	49.83
Jan	48.15	38.73	41.33	43.70	30.99	37.79	40.11
Fev	130.65	72.30	97.32	125.09	66.57	100.71	108.16

Tabela 4.4 Potencial energético esperado por tempo sazonal.

Zona	Potência sazonal kW/m		
	Inverno	Verão	Outono
Aveiro	230.96	50.35	178.15
Baía de Cascais	190.06	11.26	77.27
Cabo da Roca	203.12	41.58	134.83
Caminha	216.96	38.32	166.33
Costa da Galé	143.75	14.92	66.49
Esposende	184.86	34.57	127.54
Peniche	198.10	25.17	126.45

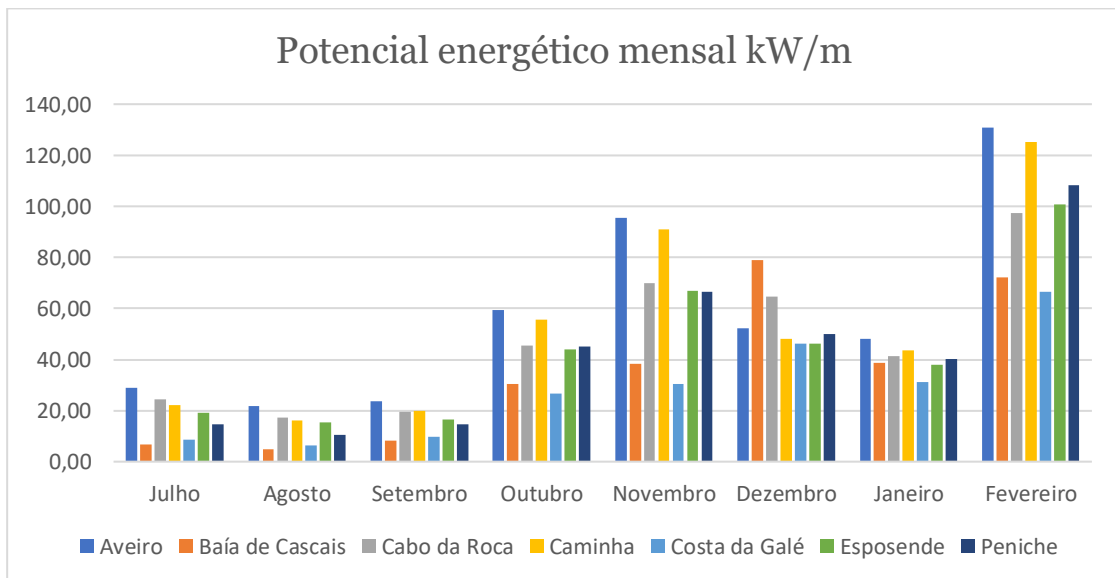


Figura 4.1 Potencial energético mensal.

## 4.2 Energia expectável nos meses em falta

A partir de um estudo do potencial energético das ondas na costa portuguesa durante trinta e três anos, verificamos que a época da primavera e do outono têm valores bastante aproximados como podemos observar na Figura 4.2 [31]. Uma vez que temos em falta os valores referentes à primavera, decidimos usar os valores do outono para preencher os meses primaveris, conseguindo assim uma análise anual.

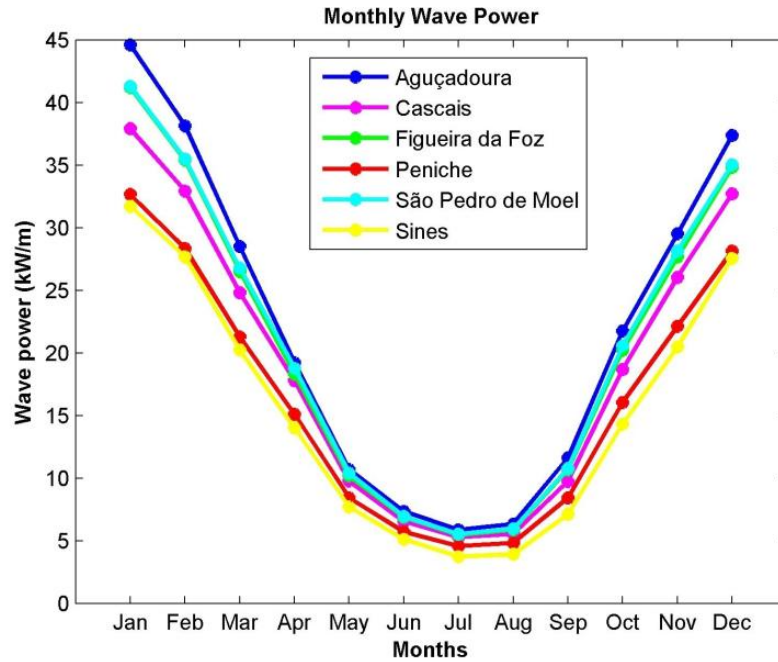


Figura 4.2 Estudo sobre o potencial mensal durante 33 anos [31].

Na Tabela 4.5, onde se mostram as potências médias e máximas por zona e por época do ano, podemos observar que a primavera e o outono têm valores bastante aproximados, já no verão e no inverno verificamos o oposto.

Tabela 4.5 Potência média e máxima sazonal num estudo de 33 anos [31].

Zona	Potencial energético sazonal KW/m									
	Inverno		Outono		Primavera		Verão		Total	
	med	max	med	max	med	max	med	max	med	max
Aguçadoura	40	48	21	25	19	23	6	7	21	26
Figueira da Foz	37	42	19	22	18	20	6	6	20	23
São Pedro de Moel	37	49	20	25	19	23	6	7	20	26
Peniche	30	45	15	24	15	23	5	7	16	25
Cascais	35	46	18	24	17	22	6	7	19	25
Sines	29	37	14	17	14	17	4	5	15	19

De forma a conseguirmos fazer uma análise anual, optamos por utilizar os dados relativos aos meses de outono também nos meses da primavera, conforme pode ser visualizado na Tabela 4.6, uma vez que estes são muito semelhantes, com uma diferença muito pequena, como visualizado na Figura 4.2.

Como referido na seção 4.1, a impossibilidade de ter valores mensais, de forma a completar um ano de análise, e tendo em conta os dados representados na Figura 4.2, admitimos que os meses entre março e junho têm valores semelhantes aos meses entre novembro e agosto e, como tal, assumimos os mesmos valores para conseguirmos ter uma análise anual.

Tabela 4.6 Potencial energético esperado anual.

Mês/Zona	Potência Mensal kW/m						
	Aveiro	Baía de Cascais	Cabo da Roca	Caminha	Costa da Galé	Esposende	Peniche
Jan	48.15	38.73	41.33	43.70	30.99	37.79	40.11
Fev	130.65	72.30	97.32	125.09	66.57	100.71	108.16
Mar	95.32	38.36	69.98	90.97	30.24	66.87	66.54
Abr	59.21	30.56	45.31	55.57	26.66	44.00	45.17
Mai	23.62	8.35	19.54	19.79	9.59	16.67	14.74
Jun	21.62	4.70	17.19	16.15	6.41	15.31	10.62
Jul	28.73	6.56	24.39	22.17	8.51	19.26	14.55
Ago	21.62	4.70	17.19	16.15	6.41	15.31	10.62
Set	23.62	8.35	19.54	19.79	9.59	16.67	14.74
Out	59.21	30.56	45.31	55.57	26.66	44.00	45.17
Nov	95.32	38.36	69.98	90.97	30.24	66.87	66.54
Dez	52.16	79.03	64.47	48.17	46.19	46.36	49.83
<b>Soma</b>	<b>659.23</b>	<b>360.56</b>	<b>531.55</b>	<b>604.09</b>	<b>298.06</b>	<b>489.82</b>	<b>486.79</b>
<b>Média</b>	<b>54.94</b>	<b>30.05</b>	<b>44.30</b>	<b>50.34</b>	<b>24.84</b>	<b>40.82</b>	<b>40.57</b>

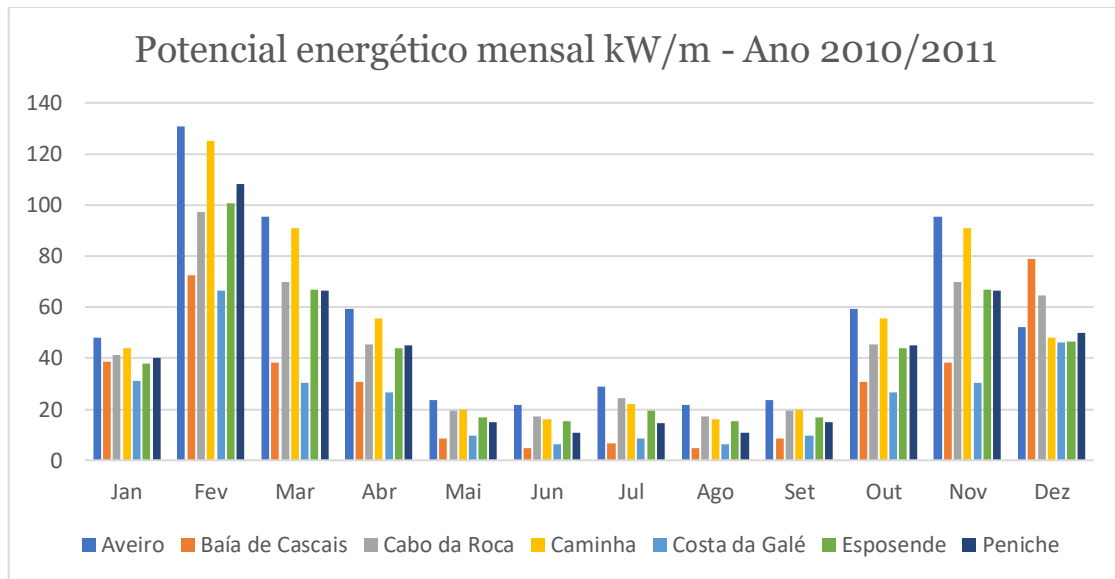


Figura 4.3 Potencial energético mensal durante 12 meses.

### 4.3 Cálculo da potência útil esperada

Para o cálculo da potência esperada num sistema de conversão das ondas, utilizou-se um trabalho desenvolvido na UBI, onde se propôs o uso de um dispositivo conversor de energia das ondas em energia elétrica baseado num gerador linear de relutância variável comutada com uma estrutura tubular [14]. Esse dispositivo tem um corpo cilíndrico flutuante de 2,4m de diâmetro e para o cálculo da potência utilizamos uma eficiência de 20%. O esquema do dispositivo está ilustrado na Figura 4.4.

A Tabela 4.7 mostra os valores de potência útil esperada para o dispositivo utilizado como exemplo, se fosse colocado em cada uma das zonas em análise. Os mesmos foram obtidos com base da equação (3.35), tendo presente os valores do potencial energético esperado ilustrado na Tabela 4.6, e com base na eficiência e diâmetro do corpo flutuante, acima citado.

Potencial energético combinado das ondas do mar e do sol para produção de energia elétrica na costa portuguesa

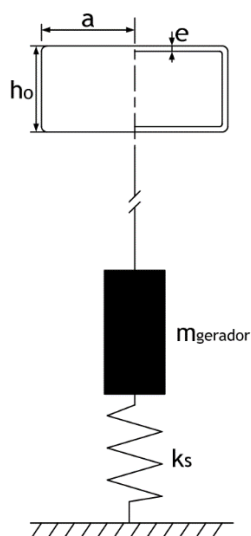


Figura 4.4 Ilustração esquemática do sistema oscilante do dispositivo de conversão.

Sendo o raio representado por  $a = 1,2 \text{ m}$ , a altura por  $h_0 = 1,5 \text{ m}$ , a espessura por  $e = 0,1 \text{ m}$  e a mola com uma constante  $k_s = 8,1 \times 10^3 \text{ N/m}$ .

Tabela 4.7 Potência útil esperada.

Mês/Zona	Potência Mensal kW/sistema						
	Aveiro	Baía de Cascais	Cabo da Roca	Caminha	Costa da Galé	Esposende	Peniche
Jan	23.11	18.59	19.84	20.98	14.87	18.14	19.25
Fev	62.71	34.7	46.71	60.04	31.95	48.34	51.92
Mar	45.75	18.41	33.59	43.67	14.52	32.1	31.94
Abr	28.42	14.67	21.75	26.67	12.8	21.12	21.68
Mai	11.34	4.01	9.38	9.5	4.6	8	7.07
Jun	10.38	2.26	8.25	7.75	3.08	7.35	5.1
Jul	13.79	3.15	11.71	10.64	4.09	9.24	6.98
Ago	10.38	2.26	8.25	7.75	3.08	7.35	5.1
Set	11.34	4.01	9.38	9.5	4.6	8	7.07
Out	28.42	14.67	21.75	26.67	12.8	21.12	21.68
Nov	45.75	18.41	33.59	43.67	14.52	32.1	31.94
Dez	25.04	37.94	30.94	23.12	22.17	22.25	23.92
<b>Soma</b>	<b>220.54</b>	<b>133.72</b>	<b>182.16</b>	<b>202.37</b>	<b>108.08</b>	<b>166.54</b>	<b>167.86</b>
<b>Média</b>	<b>27.57</b>	<b>16.72</b>	<b>22.77</b>	<b>25.3</b>	<b>13.51</b>	<b>20.82</b>	<b>20.98</b>

## 4.4 Conclusão

No que respeita a este capítulo, e após a análise das áreas em estudo, verificamos que Aveiro é a zona que apresenta maior potencialidade para gerar energia elétrica a partir da energia das ondas. Situação esta verificada em sete meses dos oito analisados. Portanto, dezembro é o único mês que apresenta valores inferiores. Sendo este mês mais representativo nas zonas de Baía de Cascais e do Cabo da Roca. Olhando agora para a zona com menor potencial, verificamos que é a Costa da Galé. Este facto é justificado por ser uma zona mais a sul, e além disso, protegida pelo Continente (Cascais e Setúbal), como observado na Figura 1.2.

Na figura 4.3, podemos tirar conclusões acerca do potencial médio mensal das ondas. Verificamos que fevereiro foi o mês com maior capacidade energética, havendo um decréscimo nos meses seguintes, sendo agosto o pior mês. Depois voltamos a assistir a um crescimento do potencial até novembro, inclusive.

Analisando as zonas em termos de potencial energético decrescente, enumeramos as zonas: Aveiro, Caminha, Cabo da Roca, Peniche, Esposende, Baía de Cascais e Costa da Galé. E focando no melhor mês, fevereiro, observamos que a melhor zona é Aveiro, com uma média de 130,65 kW/m e a pior a Costa da Galé, com 66,57 kW/m, ou seja, uma diminuição de 49% entre estas duas zonas. Caminha, com 125,61 kW/m, foi a segunda melhor zona. Esta demonstrou valores altos e muito aproximados dos de Aveiro, ambas localizadas no norte do país. Podemos dizer que existe uma tendência de que quanto mais a norte se encontra o local, melhores valores apresentarão. Contudo, existem alguns fatores que podem influenciar o potencial, e que têm de ser considerados, como o vento, as correntes marítimas e a profundidade. Por exemplo, comprova-se que as zonas do Cabo da Roca e de Peniche são mais energéticas que a zona de Esposende, apesar desta última ser a norte e perto de Caminha.

Quanto à análise da variabilidade mensal e anual dos resultados, como já seria esperado, o inverno oferece os maiores valores e o verão os menores, e com uma larga diferença. Em Aveiro, a melhor zona em estudo, nos meses de inverno obtiveram-se 230,96 kW/m, no outono 178,15 kW/m e no verão 50 kW/m. Podemos observar que no verão houve uma diminuição de 78,35% face ao inverno, sendo mais notório na zona de Baía de Cascais, com uma diminuição de 94,1%.

As zonas que demonstraram maior potencial anual, Aveiro e Caminha, com 659,23 kW/m e 604 kW/m, respetivamente, são zonas de profundidade intermédia, e este facto

permite implementar/instalar dispositivos para a captação deste tipo de energia a menor custo, quando comparado com as zonas fundas, como é o caso do Cabo da Roca, e que representa também menor potencial energético.

## 5. Estimativa de potência a produzir a partir do sol nas zonas em estudo

Neste capítulo pretende-se realizar a estimativa de potência a produzir nas zonas em estudo a partir da fonte de energia solar.

### 5.1. Potencial solar e sua avaliação

A medição da irradiação solar na superfície terrestre é de grande importância para o estudo das condições climáticas e atmosféricas, assim como para o desenvolvimento de projetos de captação e conversão da energia solar. Com base no histórico dos valores obtidos pela medição da irradiação solar, é possível verificar se a instalação de sistemas fotovoltaicos em uma determinada região é viável, garantindo assim a utilização dos recursos na sua plenitude ao longo do ano, tendo em conta as significativas variações da intensidade da irradiação solar [32].

Existem dois instrumentos comumente utilizados para a medição da irradiação solar: o piranómetro e o pireliómetro. O primeiro orientado para medidas da irradiação global e o segundo para medidas da irradiação direta [32]. A ilustração destes tipos de irradiação podem ser observados na Figura 5.1, sendo a irradiação global a combinação de todas irradiações.

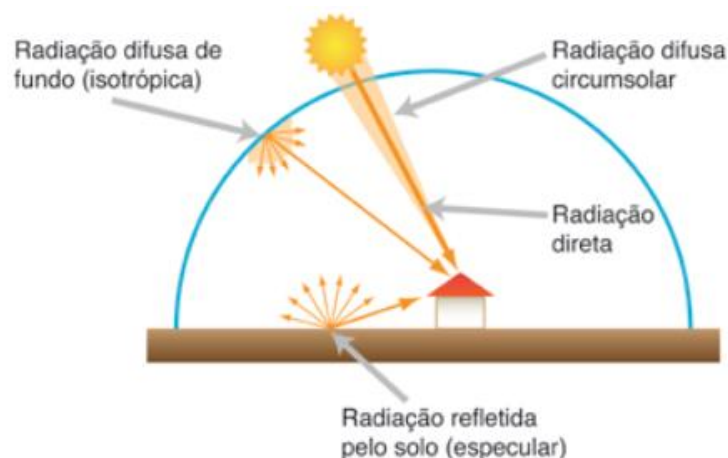


Figura 5.1 Representação esquemática das componentes constituintes da radiação global incidente numa superfície [33].

Além dos dados obtidos através destes instrumentos, estão ainda disponíveis os dados de satélites a partir de modelos matemáticos. Apesar das incertezas inerentes, não deixa de ser uma ferramenta viável para o cálculo da irradiação solar em qualquer zona do planeta. Neste caso, não seriam necessários os dois instrumentos acima citados nem a deslocação para a zona de teste [32].

Para caracterizar o potencial de energia solar nas zonas em estudo, utilizaram-se os dados obtidos por satélites, no ano de 2006 (dados mais recentes disponíveis de forma gratuita). Estes foram extraídos a partir da ferramenta online “HELIOCLIM-3”, financiada pela Comissão Europeia [6], permitindo a leitura da temperatura e da irradiação diária. Com base nesta abordagem, construímos a Tabela 5.2 e os gráficos da Figura 5.2 onde podemos visualizar os valores da irradiação global mensal nas zonas em análise.

De forma a ter uma visão mais aprofundada e fidedigna usaram-se duas ferramentas, a METEONORM [5] e a HELIOCLIM-3. Com a primeira ferramenta pretendemos mostrar a irradiação global do período de 1991-2010, observado na Tabela 5.1 e na Figura 5.1, cujo objetivo é mostrar que não existe grande disparidade entre os valores obtidos com a ferramenta HELIOCLIM-3 para o cálculo da irradiação global do ano de 2006. Estes últimos dados são demonstrados na Tabela 5.2 e na Figura 5.2.

É de referir a impossibilidade de se fazer a análise do mesmo ano da energia das ondas, 2011. Isto porque, apesar de haver uma ferramenta gratuita e atualizada até ao ano 2016, a PVGIS da Comissão Europeia, esta não suporta o estudo de zonas no oceano [34].

Tabela 5.1 Irradiação solar mensal kWh/m<sup>2</sup> entre 1991-2010 [METEONORM].

Mês/Zona	Irradiação Mensal kWh/m <sup>2</sup>							Soma/mês
	Aveiro	Baía de Cascais	Cabo da Roca	Caminha	Costa da Galé	Esposende	Peniche	
Jan	61	72	72	55	76	57	70	<b>463</b>
Fev	79	87	86	74	87	75	82	<b>570</b>
Mar	123	135	133	116	139	117	130	<b>893</b>
Abr	161	174	174	157	184	159	168	<b>1177</b>
Mai	204	216	217	194	224	200	212	<b>1467</b>
Jun	206	229	223	205	231	206	207	<b>1507</b>
Jul	224	241	237	220	246	222	226	<b>1616</b>
Ago	190	214	210	191	217	191	199	<b>1412</b>
Set	150	161	160	147	167	148	154	<b>1087</b>
Out	96	116	116	91	121	91	113	<b>744</b>
Nov	69	75	76	63	82	65	74	<b>504</b>
Dez	56	61	61	45	65	46	61	<b>395</b>
<b>Ano</b>	<b>1615</b>	<b>1777</b>	<b>1760</b>	<b>1557</b>	<b>1836</b>	<b>1572</b>	<b>1692</b>	
<b>Média</b>	<b>134.58</b>	<b>148.08</b>	<b>146.67</b>	<b>129.75</b>	<b>153.00</b>	<b>131.00</b>	<b>141.00</b>	

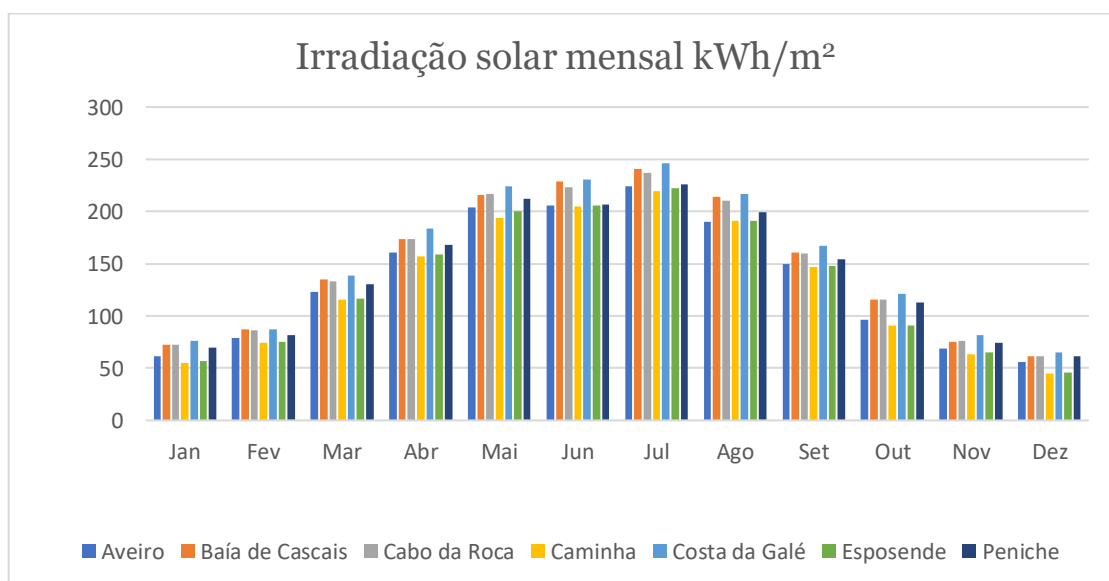


Figura 5.2 Irradiação solar mensal entre 1991-2010.

A Figura 5.2 e a Tabela 5.1 representam os valores de irradiação solar esperados, onde visualizamos que os piores meses são dezembro e janeiro, e os mesmos comportam valores médios de 395 kW/m<sup>2</sup> e de 463 kW/m<sup>2</sup>, respetivamente. Relativamente aos melhores meses, julho e junho, apresentam valores médios de 1616 kW/m<sup>2</sup> e de 1507 kW/m<sup>2</sup>, respetivamente. Ou seja, o expectável para o período de inverno e de verão.

Tabela 5.2 Irradiação solar mensal kWh/m<sup>2</sup> em 2006.

Mês/Zona	Irradiação Mensal kWh/m <sup>2</sup>							Soma/mês
	Aveiro	Baía de Cascais	Cabo da Roca	Caminha	Costa da Galé	Esposende	Peniche	
Jan	71	79	80	66	81	69	75	<b>521</b>
Fev	89	96	94	85	95	90	90	<b>639</b>
Mar	110	123	122	92	136	106	118	<b>807</b>
Abr	177	183	179	168	183	181	172	<b>1 242</b>
Mai	225	231	232	219	230	228	231	<b>1 596</b>
Jun	208	211	209	216	217	217	193	<b>1 471</b>
Jul	221	229	229	220	228	223	222	<b>1 572</b>
Ago	213	218	213	209	224	215	207	<b>1 500</b>
Set	118	145	144	120	148	124	130	<b>928</b>
Out	93	110	109	82	108	89	107	<b>697</b>
Nov	63	74	74	58	76	63	71	<b>479</b>
Dez	59	69	69	49	72	53	67	<b>438</b>
<b>Soma/zona</b>	<b>1 647</b>	<b>1 770</b>	<b>1 753</b>	<b>1 584</b>	<b>1 797</b>	<b>1 656</b>	<b>1 683</b>	
<b>Média</b>	<b>137</b>	<b>147</b>	<b>146</b>	<b>132</b>	<b>150</b>	<b>138</b>	<b>140</b>	

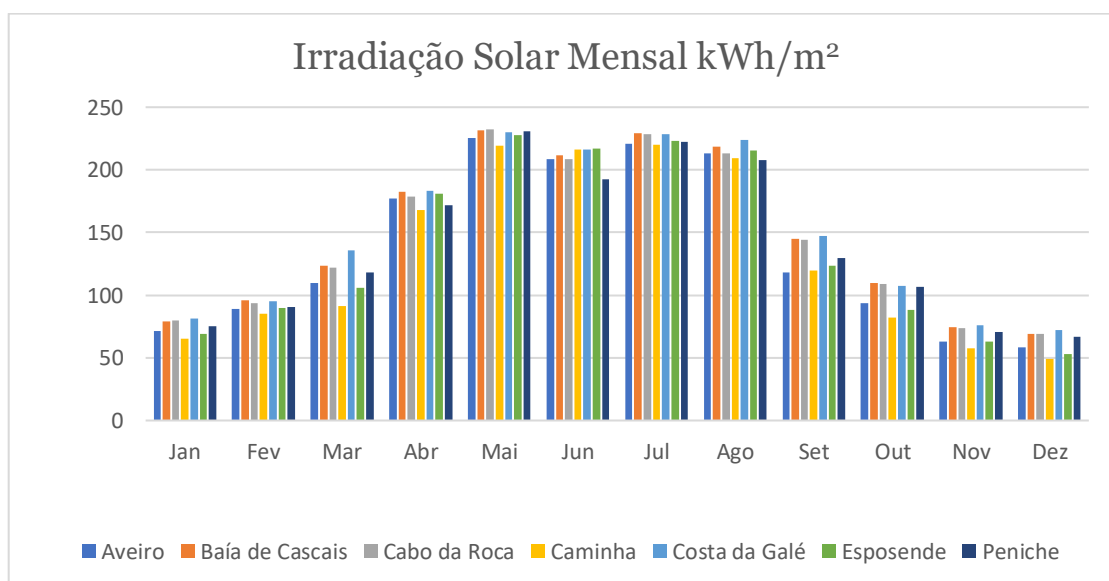


Figura 5.3 Irradiação solar mensal durante 2006.

Na Figura 5.3 e na Tabela 5.2, e para o ano de 2006 observamos uma pequena alteração relativamente ao comportamento ao longo dos meses face ao período 1991-2010, sendo no ano em análise maio o melhor mês, com 1596 kWh/m<sup>2</sup> em vez de julho com 1572 kWh/m<sup>2</sup>, e o pior mês o de dezembro com 438 kWh/m<sup>2</sup> em substituição de janeiro com 521 kWh/m<sup>2</sup>.

## 5.2. Energia Solar

Para estimar a potência a produzir neste tipo de fonte de energia é fundamental conhecerem-se a temperatura ambiente e o nível de irradiação solar. A potência a produzir  $P_{solar}$  é dada pela equação (5.1) [35]:

$$P_{solar} = P_{PV,STC} \frac{G}{G_{ref,STC}} \left( 1 + \alpha_{VOC} (T_{cell} - T_{ref,STC}) \right) N_s N_p \quad (5.1)$$

Em que:

$P_{solar}$  – potência solar (W);

$P_{PV,STC}$  – potência fotovoltaica em condição padrão de teste(W);

$G$  – irradiação solar (Wh/m<sup>2</sup>);

$G_{ref,STC}$  – irradiância de referência em condições padrão de teste (W/m<sup>2</sup>);

$\alpha_{VOC}$  – coeficiente de temperatura em circuito aberto (V/°C);

$T_{cell}$  – temperatura da célula (°C);

$T_{ref,STC}$  – temperatura de referência em condições padrão de teste (°C);

$N_s$  – número de módulos fotovoltaicos em série;

$N_p$  – número de módulos fotovoltaicos em paralelo.

A temperatura da célula é calculada através da equação (5.2) [35]:

$$T_{cell}[°C] = T_{amb} + \frac{G}{G_{ref,NOCT}} (NOCT - T_{ref,NOCT}) \quad (5.2)$$

Em que:

$T_{amb}$  – temperatura ambiente (°C);

$NOCT$  – temperatura da célula em condições de funcionamento nominal (°C);

$T_{ref,NOCT}$  – temperatura de referência em condições de funcionamento nominal (°C).

Os valores adotados para o cálculo da potência solar foram obtidos do manual do painel fotovoltaico monocristalino SHARP® NU-RD300, com 18.3% de eficiência, 300 W de potência, considerando um só módulo, e cujas especificações são mostradas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 Especificações do módulo do painel NU-RD300 [35].

Parâmetros	Valor	Parâmetros	Valor
$\alpha_{VOC}$	-0.0029 V/°C	$T_{ref,NOCT}$	20 °C
$T_{ref,STC}$	25 °C	$G_{ref,NOCT}$	800 W/m <sup>2</sup>
$G_{ref,STC}$	1000 W/m <sup>2</sup>	$P_{max}$	300 W
$NOCT$	49 °C	Hm	18,3 %

Tendo presente os parâmetros acima mencionados do painel, as equações (5.1) e (5.2) e a ferramenta online HELIOCLIM-3, construímos a Tabela 5.4 onde apresentamos os cálculos<sup>2</sup> referentes à potência mensal por zona. Verificamos que a Costa de Galé é a zona com maior potencial, sendo os meses mais fortes o de maio e de julho com respetivamente, 64,21 kW e 62,86 kW.

Tabela 5.4 Potência solar mensal nas zonas em estudo.

Mês/Zona	Potência Mensal kW/painel fotovoltaico							
	Aveiro	Baía de Cascais	Cabo da Roca	Caminha	Costa da Galé	Esposende	Peniche	Soma
Jan	21.52	23.66	23.79	19.88	24.38	20.85	22.65	<b>156.73</b>
Fev	24.16	25.83	25.33	23.21	25.55	24.35	24.44	<b>172.87</b>
Mar	32.55	36.42	36.09	27.51	39.70	31.59	34.95	<b>238.81</b>
Abr	49.41	50.98	50.00	47.29	50.77	50.55	48.04	<b>347.04</b>
Mai	63.64	65.38	65.60	62.46	64.21	64.58	65.24	<b>451.11</b>
Jun	56.89	57.96	57.36	47.28	58.59	59.22	53.22	<b>390.52</b>
Jul	61.45	64.16	64.02	61.67	62.86	62.26	62.28	<b>438.7</b>
Ago	59.23	61.00	59.65	58.55	61.34	60.01	58.16	<b>417.94</b>
Set	32.99	40.21	39.95	33.54	40.39	34.52	36.23	<b>257.83</b>
Out	27.34	31.88	31.66	24.36	31.17	26.06	31.03	<b>203.5</b>
Nov	18.26	21.28	21.19	16.81	21.83	18.16	20.35	<b>137.88</b>
Dez	17.70	20.80	20.70	14.85	21.70	16.07	20.00	<b>131.82</b>
<b>Soma</b>	<b>465.14</b>	<b>499.54</b>	<b>495.35</b>	<b>437.41</b>	<b>502.49</b>	<b>468.24</b>	<b>476.58</b>	
<b>Média</b>	<b>38.76</b>	<b>41.63</b>	<b>41.28</b>	<b>36.45</b>	<b>41.87</b>	<b>39.02</b>	<b>39.71</b>	

<sup>2</sup> Leitura da temperatura e da irradiação diária por zona, com base numa média de 732 observações por mês, recolhidas diariamente em períodos de 1 hora.

### **5.2.1 Potência solar a produzir em Aveiro**

No ano de análise, 2006, e para a zona de Aveiro, observamos que maio é o mês onde obtemos maior capacidade de potência solar a produzir mensalmente, com uma potência de 63,64 kW. Após uma análise mais pormenorizada, através do cálculo da média dos dias do mês de referência, verifica-se que o maior valor foi obtido às 13 horas, com uma irradiação de 885,42 Wh/m<sup>2</sup>, potência solar de 243,87 W, e uma média diária de 157,33 W. Para as treze horas analisadas, as mais quentes do mês, obteve-se um valor de 2045,26 W, conforme mostra a Tabela 5.5.

Seguindo a mesma linha de análise, verificamos que dezembro é o mês menos quente, obtendo-se para este apenas um valor de potência de 17,70 kW. O maior valor foi obtido às 13 horas, com uma irradiação de 348,23 Wh/m<sup>2</sup>, resultando numa potência solar de 104,22 W, e uma média diária de 63,42 W. Para as nove horas analisadas, as mais quentes do mês, obtemos 570,73 W, conforme mostra a Tabela 5.6.

Selecionamos também fevereiro para análise, pelo facto de ter sido o mês com maior capacidade de produção de energia das ondas, no ano de 2008. Sendo assim, consideramos uma mais valia a sua referência. Para este mês obteve-se um valor de potência de 24,16 kW. O maior valor foi obtido às 13 horas, com uma irradiação de 438,84 Wh/m<sup>2</sup>, resultando numa potência solar de 130.17 W, e uma média diária de 86,05 W. Para as dez horas analisadas, as mais quentes do mês, obteve-se uma potência de 860.55 W, conforme mostra a Tabela 5.7.

Potencial energético combinado das ondas do mar e do sol para produção de energia elétrica na costa portuguesa

Tabela 5.5 Potência solar em Aveiro no mês de maio.

Hora	$G$ [Wh/m <sup>2</sup> ]	$T$ [°C]	$T_{cell}$ [°C]	$P_{solar}$ [W]
07h	108.26	14.58	18.50	33.09
08h	286.68	16.08	26.47	85.64
09h	467.84	17.65	34.61	136.44
10h	636.52	18.98	42.05	181.51
11h	767.26	19.96	47.78	214.97
12h	850.77	20.70	51.55	235.58
13h	885.42	21.15	53.25	243.87
14h	864.68	21.28	52.62	238.62
15h	780.06	21.21	49.49	217.40
16h	653.74	20.90	44.60	184.97
17h	500.68	20.37	38.52	144.31
18h	311.87	19.62	30.93	91.95
19h	122.23	18.50	22.93	36.89
Média	<b>556.62</b>	<b>19.31</b>	<b>39.48</b>	<b>157.33</b>
Soma	<b>7 236.00</b>			<b>2 045.26</b>

Tabela 5.6 Potência solar em Aveiro no mês de dezembro.

Hora	$G$ [Wh/m <sup>2</sup> ]	$T$ [°C]	$T_{cell}$	$P_{solar}$ [W]
09h	36.68	8.78	10.11	11.48
10h	144.48	9.73	14.97	44.61
11h	258.16	10.94	20.30	78.51
12h	328.00	12.23	24.12	98.65
13h	348.23	13.18	25.80	104.22
14h	325.65	13.65	25.45	97.57
15h	252.61	13.71	22.87	76.25
16h	153.19	13.47	19.03	46.75
17h	41.00	12.53	14.01	12.69
Média	<b>209.78</b>	<b>12.024</b>	<b>19.629</b>	<b>63.42</b>
Soma	<b>1888</b>			<b>570.73</b>

Tabela 5.7 Potência solar em Aveiro no mês de fevereiro.

Hora	G [Wh/m <sup>2</sup> ]	T [°C]	T <sub>cell</sub> [°C]	P <sub>solar</sub> [W]
09h	85.87	8.46	11.57	26.76
10h	233.58	9.64	18.10	71.48
11h	365.39	11.04	24.29	109.84
12h	427.19	12.23	27.72	127.15
13h	438.84	12.98	28.89	130.17
14h	432.68	13.31	29.00	128.30
15h	373.35	13.35	26.88	111.40
16h	295.61	13.09	23.81	88.99
17h	172.00	12.42	18.65	52.55
18h	44.77	11.18	12.81	13.91
Média	<b>286.93</b>	<b>11.77</b>	<b>22.17</b>	<b>86.05</b>
Soma	<b>2869.28</b>			<b>860.55</b>

### 5.2.2 Potência solar a produzir em Caminha

Seguindo a mesma linha de análise para as restantes zonas, analisa-se agora Caminha.

Nesta zona observamos que maio é o mês com maior capacidade de produção de energia solar, com uma potência de 62,46 kW. O maior valor foi obtido às 14 horas, com uma irradiação de 834,29 Wh/m<sup>2</sup>, resultando numa potência solar de 228,18 W, e uma média diária de 152,02 W. No total de horas analisadas, obteve-se um valor de 1976,24 W.

Relativamente ao mês menos quente, dezembro, apenas se obteve 14,85 kW de potência, com o maior valor às 13 horas, com uma irradiação de 290,42 Wh/m<sup>2</sup>, resultando numa potência solar de 87,60 W, e uma média diária de 53,22 W. No total das horas analisadas, obteve-se 479 W.

Em fevereiro, obteve-se uma potência de 23,21 kW. O maior valor foi obtido às 13 horas, com uma irradiação de 435,74 Wh/m<sup>2</sup>, resultando numa potência solar de 129,63 W, e uma média diária de 82,72 W. No total das horas analisadas, obteve-se 827,21 W.

Potencial energético combinado das ondas do mar e do sol para produção de energia elétrica na costa portuguesa

Tabela 5.8 Potência solar em Caminha no mês de julho.

Hora	$G$ [Wh/m <sup>2</sup> ]	$T$ [°C]	$T_{cell}$ [°C]	$P_{solar}$ [W]
07h	100.39	18.75	22.38	30.34
08h	254.10	20.42	29.63	75.21
09h	421.52	22.24	37.52	121.86
10h	581.23	23.67	44.74	164.39
11h	704.81	24.57	50.12	196.04
12h	786.45	25.07	53.58	216.38
13h	833.90	25.27	55.50	228.04
14h	834.29	25.22	55.46	228.18
15h	797.03	24.99	53.88	219.08
16h	693.26	24.66	49.79	193.03
17h	534.65	24.21	43.60	151.74
18h	355.39	23.52	36.41	103.09
19h	164.55	22.56	28.52	48.86
Média	<b>543.20</b>	<b>23.47</b>	<b>43.16</b>	<b>152.02</b>
Soma	<b>7 061.57</b>			<b>1 976.24</b>

Tabela 5.9 Potência solar em Caminha no mês de dezembro.

Hora	$G$ [Wh/m <sup>2</sup> ]	$T$ [°C]	$T_{cell}$	$P_{solar}$ [W]
09h	28.16	9.18	10.20	8.81
10h	119.35	9.96	14.29	36.92
11h	213.55	10.90	18.64	65.25
12h	275.00	11.87	21.84	83.26
13h	290.42	12.58	23.11	87.60
14h	274.42	12.99	22.93	82.82
15h	214.06	13.11	20.87	64.99
16h	128.61	12.91	17.57	39.41
17h	32.03	12.12	13.28	9.94
Média	<b>175.07</b>	<b>11.74</b>	<b>18.08</b>	<b>53.22</b>
Soma	<b>1575.60</b>			<b>479</b>

Tabela 5.10 Potência solar em Caminha no mês de fevereiro.

Hora	$G$ [Wh/m <sup>2</sup> ]	$T$ [°C]	$T_{cell}$	$P_{solar}$ [W]
09h	78.29	8.02	10.86	24.45
10h	208.58	9.16	16.72	64.08
11h	343.55	10.38	22.83	103.71
12h	413.42	11.40	26.39	123.53
13h	435.74	12.09	27.88	129.63
14h	415.45	12.41	27.47	123.74
15h	371.29	12.48	25.94	111.08
16h	289.68	12.37	22.87	87.44
17h	154.81	11.81	17.42	47.46
18h	38.87	10.80	12.21	12.09
Média	<b>274.97</b>	<b>11.09</b>	<b>21.06</b>	<b>82.72</b>
Soma	<b>2749.68</b>			<b>827.21</b>

### 5.2.3 Potência solar a produzir na Baía de Cascais

No que diz respeito à zona de Baía de Cascais, observamos que maio é o mês com maior capacidade de potência solar, com um valor de 65,38 kW. O maior valor foi obtido às 13 horas, com uma irradiação de 931,03 Wh/m<sup>2</sup>, resultando numa potência solar de 255,77 W, e uma média diária de 161,79 W. Para o total das horas analisadas, obteve-se 2103,23 W.

Dezembro é o mês menos quente, obtendo-se apenas 20,80 kW de potência. O maior valor foi obtido às 13 horas, com uma irradiação de 402,58 Wh/m<sup>2</sup>, resultando numa potência solar de 119,47 W, e uma média diária de 74,48 W. No total de horas analisadas, obteve-se 670,30 W.

Nesta zona não fazemos mais nenhuma referência mensal, uma vez que dezembro também foi o mês com maior capacidade de produção de energia das ondas.

Potencial energético combinado das ondas do mar e do sol para produção de energia elétrica na costa portuguesa

Tabela 5.11 Potência solar na Baía de Cascais no mês de maio.

Hora	$G$ [Wh/m <sup>2</sup> ]	$T$ [°C]	$T_{cell}$ [°C]	$P_{solar}$ [W]
07h	97.74	15.64	19.19	29.82
08h	293.97	16.41	27.07	87.66
09h	488.90	17.30	35.02	142.41
10h	646.19	18.33	41.75	184.44
11h	806.06	19.22	48.44	225.38
12h	896.06	19.90	52.38	247.48
13h	931.03	20.31	54.06	255.77
14h	889.90	20.44	52.70	245.52
15h	782.39	20.40	48.76	218.55
16h	651.94	20.18	43.81	184.91
17h	514.58	19.83	38.48	148.34
18h	321.42	19.28	30.94	94.77
19h	126.61	18.54	23.13	38.19
Média	<b>572.83</b>	<b>18.91</b>	<b>39.67</b>	<b>161.79</b>
Soma	<b>7 446.81</b>			<b>2 103.23</b>

Tabela 5.12 Potência solar na Baía de Cascais no mês de dezembro.

Hora	$G$ [Wh/m <sup>2</sup> ]	$T$ [°C]	$T_{cell}$ [°C]	$P_{solar}$ [W]
09h	45.68	11.16	12.82	14.19
10h	167.81	11.80	17.88	51.38
11h	295.84	12.53	23.26	89.20
12h	373.65	13.43	26.97	111.45
13h	402.58	14.14	28.73	119.47
14h	382.29	14.58	28.44	113.54
15h	316.94	14.75	26.24	94.74
16h	190.26	14.71	21.61	57.64
17h	60.77	14.18	16.38	18.69
Média	<b>248.42</b>	<b>13.48</b>	<b>22.48</b>	<b>74.48</b>
Soma	<b>2235.82</b>			<b>670.3</b>

### 5.2.4 Potência solar a produzir em Esposende

Na zona de Esposende, observamos que maio é o mês onde se obtêm maiores níveis de potência, 64,58 kW. Maior evidência às 14 horas, com uma irradiação de 876,42 Wh/m<sup>2</sup>, uma potência solar de 242,68 W, e uma média diária de 159,59 W. No total de horas analisadas, obteve-se 2074,62 W.

Dezembro é o mês menos quente, obtendo-se apenas 16,07 kW de potência. O maior valor foi obtido às 13 horas, com uma irradiação de 313,10 Wh/m<sup>2</sup>, uma potência solar de 94,18 W, e uma média diária de 57,61 W. No total de horas analisadas, obtemos 518,51 W.

Em fevereiro, obtemos 24,35 kW de potência. O maior valor foi obtido às 13 horas, com uma irradiação de 460,48 Wh/m<sup>2</sup>, uma potência solar de 136,55 W, e uma média diária de 86,79 W. No total de horas analisadas, obteve-se 867,91 W.

Tabela 5.13 Potência solar em Esposende no mês de maio.

Hora	$G$ [Wh/m <sup>2</sup> ]	$T$ [°C]	$T_{cell}$ [°C]	$P_{solar}$ [W]
07h	111.45	14.02	18.06	34.11
08h	292.03	15.30	25.89	87.38
09h	480.97	16.62	34.05	140.50
10h	648.52	17.79	41.30	185.36
11h	786.74	18.70	47.22	220.82
12h	859.94	19.30	50.48	238.92
13h	852.97	19.67	50.59	236.90
14h	876.42	19.78	51.55	242.68
15h	802.71	19.68	48.78	224.21
16h	668.52	19.44	43.67	189.69
17h	493.06	18.94	36.82	142.85
18h	310.71	18.30	29.56	91.98
19h	129.61	17.33	22.03	39.22
Média	<b>562.59</b>	<b>18.07</b>	<b>38.46</b>	<b>159.59</b>
Soma	<b>7 313.65</b>			<b>2 074.62</b>

Potencial energético combinado das ondas do mar e do sol para produção de energia elétrica na costa portuguesa

Tabela 5.14 Potência solar em Esposende no mês de dezembro.

Hora	$G$ [Wh/m <sup>2</sup> ]	$T$ [°C]	$T_{cell}$ [°C]	$P_{solar}$ [W]
09h	29.68	9.09	10.16	9.29
10h	127.19	9.88	14.49	39.32
11h	231.94	10.91	19.32	70.73
12h	296.71	11.98	22.73	89.60
13h	313.10	12.72	24.07	94.18
14h	301.13	13.14	24.05	90.59
15h	233.52	13.29	21.75	70.72
16h	140.74	13.09	18.19	43.06
17h	35.55	12.27	13.56	11.02
Média	<b>189.95</b>	<b>11.82</b>	<b>18.70</b>	<b>57.61</b>
Soma	<b>1709.56</b>			<b>518.51</b>

Tabela 5.15 Potência solar em Esposende no mês de fevereiro.

Hora	$G$ [Wh/m <sup>2</sup> ]	$T$ [°C]	$T_{cell}$ [°C]	$P_{solar}$ [W]
09h	84.00	8.15	11.20	26.21
10h	227.03	9.31	17.54	69.58
11h	346.00	10.56	23.10	104.37
12h	432.19	11.59	27.26	128.81
13h	460.48	12.29	28.98	136.55
14h	444.26	12.64	28.75	131.83
15h	388.45	12.75	26.83	115.92
16h	303.45	12.65	23.65	91.39
17h	164.71	12.08	18.05	50.41
18h	41.32	11.05	12.55	12.84
Média	<b>289.19</b>	<b>11.31</b>	<b>21.79</b>	<b>86.79</b>
Soma	<b>2891.89</b>			<b>867.91</b>

### 5.2.5 Potência solar a produzir na Costa da Galé

Na zona da Costa da Galé, observamos que maio é o mês com maior capacidade de potência solar, com o valor de 64,21 kW. O maior valor foi obtido às 13 horas, com uma irradiação de 911,68 Wh/m<sup>2</sup>, uma potência solar de 247,66 W, e uma média diária de 158,92 W. No total de horas analisadas, obteve-se 2065,93 W.

No mês menos quente, dezembro, obteve-se um valor de 21,70 kW/m<sup>2</sup> de potência. O maior valor foi obtido às 13 horas, com uma irradiação de 412,26 Wh/m<sup>2</sup>, uma potência solar de 122,20 W, e uma média diária de 77,70 W. No total de horas analisadas, obteve-se 699,29 W.

Em fevereiro obteve-se 25,55 kW de potência. O maior valor foi obtido às 13 horas, com uma irradiação de 482,00 Wh/m<sup>2</sup>, uma potência solar de 141,95 W, e uma média diária de 90,99 W. No total de horas analisadas, obteve-se 909,94 W.

Tabela 5.16 Potência solar na Costa da Galé no mês de maio.

Hora	$G$ [Wh/m <sup>2</sup> ]	$T$ [°C]	$T_{cell}$ [°C]	$P_{solar}$ [W]
07h	101.68	15.05	18.74	31.06
08h	295.71	16.71	27.43	88.09
09h	491.32	18.91	36.72	142.39
10h	660.23	20.96	44.89	186.64
11h	779.32	22.54	50.79	216.31
12h	875.10	23.73	55.45	239.34
13h	911.68	24.53	57.58	247.66
14h	893.39	24.93	57.31	242.90
15h	808.61	24.95	54.27	221.99
16h	673.45	24.62	49.03	187.96
17h	495.19	23.98	41.93	141.27
18h	296.55	23.01	33.76	86.70
19h	112.26	21.62	25.69	33.61
Média	<b>568.81</b>	<b>21.96</b>	<b>42.58</b>	<b>158.92</b>
Soma	<b>7 394.48</b>			<b>2 065.93</b>

Potencial energético combinado das ondas do mar e do sol para produção de energia elétrica na costa portuguesa

Tabela 5.17 Potência solar na Costa da Galé no mês de dezembro.

Hora	$G$ [Wh/m <sup>2</sup> ]	$T$ [°C]	$T_{cell}$	$P_{solar}$ [W]
09h	57.19	8.30	10.38	17.89
10h	192.77	9.63	16.61	59.24
11h	319.13	11.13	22.70	96.38
12h	389.94	12.90	27.04	116.29
13h	412.26	14.17	29.11	122.20
14h	384.10	14.73	28.65	114.01
15h	317.19	14.83	26.33	94.79
16h	197.65	14.56	21.72	59.86
17h	60.45	13.35	15.54	18.63
Média	<b>258.96</b>	<b>12.622</b>	<b>22.01</b>	<b>77.70</b>
Soma	<b>2330.68</b>			<b>699.29</b>

Tabela 5.18 Potência solar na Costa da Galé no mês de fevereiro.

Hora	$G$ [Wh/m <sup>2</sup> ]	$T$ [°C]	$T_{cell}$ [°C]	$P_{solar}$ [W]
09h	93.19	9.12	12.49	28.97
10h	242.71	10.37	19.17	74.04
11h	354.87	11.73	24.59	106.59
12h	438.52	13.00	28.90	130.07
13h	482.00	13.85	31.32	141.95
14h	454.26	14.34	30.81	133.98
15h	414.74	14.50	29.54	122.79
16h	330.68	14.33	26.31	98.83
17h	185.68	13.74	20.47	56.44
18h	52.61	12.35	14.26	16.28
Média	<b>304.93</b>	<b>12.73</b>	<b>23.77</b>	<b>90.99</b>
Soma	<b>3049.26</b>			<b>909.94</b>

### 5.2.6 Potência solar a produzir em Peniche

Na zona de Peniche, observamos que maio é o mês com maior capacidade de potência solar, com um valor de 65,24 kW. O maior valor foi obtido às 13 horas, com uma irradiação de 907,19 Wh/m<sup>2</sup>, uma potência solar de 249,93 W, e uma média diária de 161,38 W. No total de horas analisadas, obteve-se 2097,95 W.

Dezembro é o mês menos quente, obtendo-se apenas 20 kW de potência. O maior valor foi obtido às 13 horas, com uma irradiação de 387,61 Wh/m<sup>2</sup>, uma potência solar de 115,26 W, e uma média diária de 71,64 W. No total de horas analisadas, obteve-se 644,70 W.

No mês de fevereiro, calcula-se uma potência de 24,44 kW. O maior valor foi obtido às 13 horas, com uma irradiação de 462,55 Wh/m<sup>2</sup>, uma potência solar de 136,72 W, e uma média diária de 87,05 W. No total de horas analisadas, obteve-se 870,52 W.

Tabela 5.19 Potência solar em Peniche no mês de maio.

Hora	$G$ [Wh/m <sup>2</sup> ]	$T$ [°C]	$T_{cell}$ [°C]	$P_{solar}$ [W]
07h	98.55	15.55	19.12	30.07
08h	269.42	16.46	26.22	80.54
09h	489.29	17.43	35.17	142.46
10h	675.39	18.47	42.95	192.07
11h	806.16	19.34	48.56	225.32
12h	876.10	19.94	51.70	242.48
13h	907.19	20.28	53.17	249.93
14h	888.10	20.35	52.54	245.15
15h	805.19	20.22	49.41	224.46
16h	681.00	19.93	44.61	192.68
17h	503.39	19.48	37.73	145.44
18h	305.97	18.85	29.94	90.47
19h	122.06	18.03	22.45	36.89
Média	<b>571.37</b>	<b>18.79</b>	<b>39.51</b>	<b>161.38</b>
Soma	<b>7 427.81</b>			<b>2 097.95</b>

Potencial energético combinado das ondas do mar e do sol para produção de energia elétrica na costa portuguesa

Tabela 5.20 Potência solar em Peniche no mês de dezembro.

Hora	$G$ [Wh/m <sup>2</sup> ]	$T$ [°C]	$T_{cell}$ [°C]	$P_{solar}$ [W]
09h	44.42	10.55	12.16	13.82
10h	166.65	11.29	17.33	51.11
11h	293.58	12.16	22.81	88.63
12h	359.71	13.18	26.22	107.53
13h	387.61	13.98	28.03	115.26
14h	366.68	14.45	27.75	109.13
15h	290.45	14.60	25.13	87.10
16h	181.42	14.50	21.08	55.05
17h	55.42	13.82	15.83	17.07
Média	<b>238.44</b>	<b>13.17</b>	<b>21.82</b>	<b>71.64</b>
Soma	<b>2145.94</b>			<b>644.70</b>

Tabela 5.21 Potência solar em Peniche no mês de fevereiro.

Hora	$G$ [Wh/m <sup>2</sup> ]	$T$ [°C]	$T_{cell}$ [°C]	$P_{solar}$ [W]
09h	81.10	10.41	13.35	25.15
10h	215.84	11.17	18.99	65.88
11h	346.23	12.00	24.55	104.00
12h	412.03	12.75	27.68	122.65
13h	462.55	13.32	30.08	136.72
14h	449.61	13.65	29.95	132.95
15h	390.90	13.75	27.92	116.28
16h	312.45	13.64	24.96	93.75
17h	186.26	13.23	19.98	56.69
18h	53.19	12.40	14.33	16.45
Média	<b>291.02</b>	<b>12.63</b>	<b>23.18</b>	<b>87.05</b>
Soma	<b>2910.16</b>			<b>870.52</b>

### 5.2.7 Potência solar a produzir no Cabo da Roca

Por fim, na zona de Cabo da Roca, observamos que maio é o mês com maior potência, com um valor de 65,60 kW. O maior valor foi obtido às 13 horas, com uma irradiação de 914,10 Wh/m<sup>2</sup>, uma potência solar de 251,93 W, e uma média diária de 162,33 W. No total de horas analisadas, obteve-se 2110,30 W.

Continuamos a verificar que dezembro é o mês menos quente, obtendo-se apenas 20,70 kW de potência. O maior valor foi obtido às 13 horas, com uma irradiação de 395,94 Wh/m<sup>2</sup>, uma potência solar de 117,56 W, e uma média diária de 74,15 W. No total de horas analisadas, obteve-se 667,35 W.

Em Fevereiro, obteve-se 25,33 kW de potência. O maior valor foi obtido às 13 horas, com uma irradiação de 480,94 Wh/m<sup>2</sup>, uma potência solar de 141,81 W, e uma média diária de 90,24 W. No total de horas analisadas, obteve-se 902,42 W.

Tabela 5.22 Potência solar no Cabo da Roca no mês de maio.

Hora	$G$ [Wh/m <sup>2</sup> ]	$T$ [°C]	$T_{cell}$ [°C]	$P_{solar}$ [W]
07h	97.52	15.75	19.28	29.74
08h	293.26	16.44	27.07	87.45
09h	495.71	17.23	35.20	144.32
10h	670.26	18.14	42.44	190.91
11h	820.52	18.94	48.68	229.25
12h	888.29	19.54	51.74	245.82
13h	914.10	19.90	53.04	251.93
14h	871.42	20.02	51.61	241.25
15h	784.00	19.97	48.39	219.24
16h	671.42	19.78	44.12	190.26
17h	514.65	19.46	38.12	148.52
18h	318.35	18.97	30.51	93.98
19h	124.65	18.30	22.82	37.63
Média	<b>574.16</b>	<b>18.65</b>	<b>39.46</b>	<b>162.33</b>
Soma	<b>7 464.13</b>			<b>2 110.30</b>

Potencial energético combinado das ondas do mar e do sol para produção de energia elétrica na costa portuguesa

Tabela 5.23 Potência solar no Cabo da Roca no mês de dezembro.

Hora	$G$ [Wh/m <sup>2</sup> ]	$T$ [°C]	$T_{cell}$ [°C]	$P_{solar}$ [W]
09h	44.84	11.50	13.13	13.91
10h	166.65	12.07	18.11	50.99
11h	297.19	12.74	23.51	89.54
12h	373.77	13.55	27.10	111.45
13h	395.94	14.20	28.55	117.56
14h	377.13	14.60	28.27	112.07
15h	316.16	14.75	26.21	94.51
16h	192.45	14.72	21.70	58.29
17h	61.90	14.23	16.48	19.03
Média	<b>247.34</b>	<b>13.60</b>	<b>22.57</b>	<b>74.15</b>
Soma	<b>2226.03</b>			<b>667.35</b>

Tabela 5.24 Potência solar no Cabo da Roca no mês de fevereiro.

Hora	$G$ [Wh/m <sup>2</sup> ]	$T$ [°C]	$T_{cell}$ [°C]	$P_{solar}$ [W]
09h	81.68	11.18	14.14	25.28
10h	225.97	11.73	19.92	68.79
11h	344.87	12.37	24.88	103.50
12h	438.13	12.98	28.87	129.97
13h	480.94	13.46	30.89	141.81
14h	471.94	13.76	30.87	139.17
15h	405.35	13.88	28.57	120.35
16h	331.71	13.82	25.85	99.27
17h	186.32	13.55	20.31	56.66
18h	57.06	12.94	15.01	17.62
Média	<b>302.38</b>	<b>12.97</b>	<b>23.93</b>	<b>90.24</b>
Soma	<b>3023.97</b>			<b>902.42</b>

## 5.3 Conclusão

Após a análise do potencial solar, tendo em conta um painel fotovoltaico, enumeraremos as zonas em destaque. Estas são: Costa da Galé, Baía de Cascais e Cabo da Roca com potências anuais de 502.49 kW, 499.54 kW e 495.35 kW, respetivamente. As mesmas estão localizadas geograficamente de forma privilegiada, aumentando assim a sua capacidade de extração de energia solar. Seguindo a mesma linha de raciocínio, já seria de esperar que Caminha fosse a pior zona.

Continuando a análise, mas numa vertente de importância mensal, observamos que maio foi o mês de destaque neste ano em análise, tendo um peso de 13.5% sobre o total da potência anual. Relativamente ao pior mês, dezembro, neste só se consegue obter 29,2% da energia solar, face ao melhor mês.

Não obstante o facto de julho também ter sido um bom mês neste período de análise, com um peso de 13.1% na geração de energia anual. É de salientar que por norma este é o melhor mês como já foi evidenciado na Tabela 5.1, mas no período de análise desta dissertação foi ultrapassado pelo mês de maio. Sendo que julho tem um peso relativamente a maio de 97,3%.

Como já mencionado, maio e julho foram os melhores meses para geração de energia solar, com valores de irradiação muito próximos, tal como demonstrado na Tabela 5.2. Apesar deste facto, podemos dizer que maio ainda consegue ser mais eficiente por atingir temperaturas mais baixas<sup>3</sup>, aumentando assim a eficiência dos painéis fotovoltaicos.

Não podemos esquecer que quando falamos de energias renováveis, é perfeitamente normal que existam oscilações no que respeita aos valores de potencial energético. E que quanto mais a sul, maior é a tendência de haver maior rentabilidade.

---

<sup>3</sup> Segundo dados retirados pelo HELIOCLIM-3

## 6. Potencial energético combinado das fontes de energia em estudo

Neste capítulo pretendemos mostrar como as duas energias estudadas, solar e ondas, se podem complementar uma à outra, esquematizado na Figura 6.1. Reforçando assim as suas potencialidades no fornecimento de energia renovável.

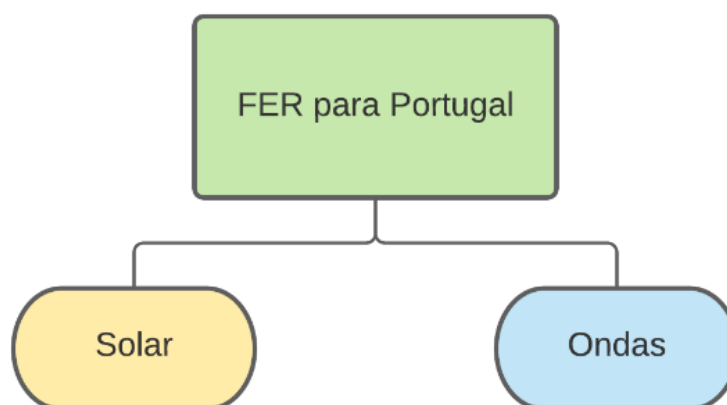


Figura 6.1 Fontes de energia renovável em estudo.

Portugal tem uma posição geográfica privilegiada e única para produzir energia em conjunto a partir das ondas e do sol, visto estar numa zona com alto rendimento energético das ondas e com bastante exposição solar.

Nesta vertente, e tendo em consideração o desenvolvimento sustentável, as tecnologias solares e marinhas devem ter cada vez mais uma atenção especial, seja na sua modernidade, seja na sua evolução tecnológica, devendo ser um desígnio nacional. Proporcionando assim um tratamento privilegiado com as suas próprias estratégias bem delineadas e a longo prazo, enaltecendo o seu enorme potencial.

## 6.1 Exemplos de sistemas marítimos híbridos

### 6.1.1 Eco Wave Power

A empresa EWP, da Suécia, pegou num sistema de energia das ondas existente, por eles criado, e adicionou um painel fotovoltaico de 330 W, originando um sistema híbrido, Figura 6.2. Este sistema foi testado em Israel. Uma vez este ser um país pequeno, existem limitações para a criação de parques solares fotovoltaicos. Como tal, decidiram instalar painéis fotovoltaicos nos flutuadores, tendo um custo acrescido de 3% no sistema. Contudo, em termos de capacidade expectável de produção de energia extra é de 10%, permitindo um retorno de investimento mais rápido.

Para se produzir energia neste sistema é preciso haver ondas com uma altura mínima de 0.5m. No entanto, quando estas são demasiado altas, o sistema sobe e deixa de haver produção de energia. O sistema de produção volta a entrar em operação, assim que as condições o permitirem, com o sistema a descer de forma automática, começando a aproveitar a energia das ondas [36].



*Figura 6.2 Sistema Eco Wave Power com painel fotovoltaico incorporado.*

### **6.1.2 Marine Solar Cells**

Este sistema foi desenhado pelo Britânico Phil Pauley e pretende produzir energia a partir das ondas e do sol, Figura 6.3. Devido à reflexão natural do sol a partir da água, os painéis fotovoltaicos podem ter uma eficiência superior a 20% quando comparados com os sistemas terrestres. Este sistema ainda está numa fase de conceção e foi desenhado para zonas com mares turbulentos [37].



*Figura 6.3 Sistema com células solares marinhas.*

### 6.1.3 Ocean Hybrid Platform, SinnPower

A empresa alemã, SinnPower, propôs um sistema híbrido marítimo bastante ambicioso que combina o aproveitamento da energia das ondas, aerogeradores e painéis fotovoltaicos, Figura 6.4. Cada módulo do sistema tem 4 boias, 4 aerogeradores e um conjunto de painéis fotovoltaicos, que em condições ideais podem produzir 96 kWp, 24 kWp e 20 kWp, respetivamente. Estes sistemas podem trabalhar em conjunto, tal como ilustrado na Figura 6.5, e foram desenvolvidos para suportar ondas até 6 metros de altura. É de referir que este sistema consegue absorver ondas até 2 metros, sem precisar de movimentar a plataforma, graças aos sistemas de boias flutuantes que se movimentam na horizontal, acompanhando as ondas. No que respeita à durabilidade, os materiais usados são resistentes à água salgada e usam a certificação IP68 [38].



Figura 6.4 Tipos de módulos possíveis.

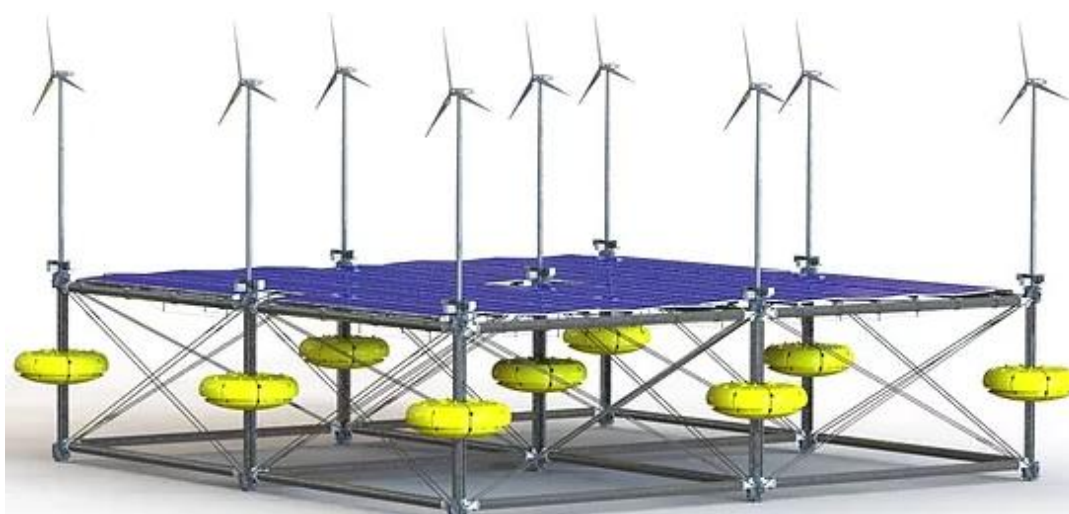
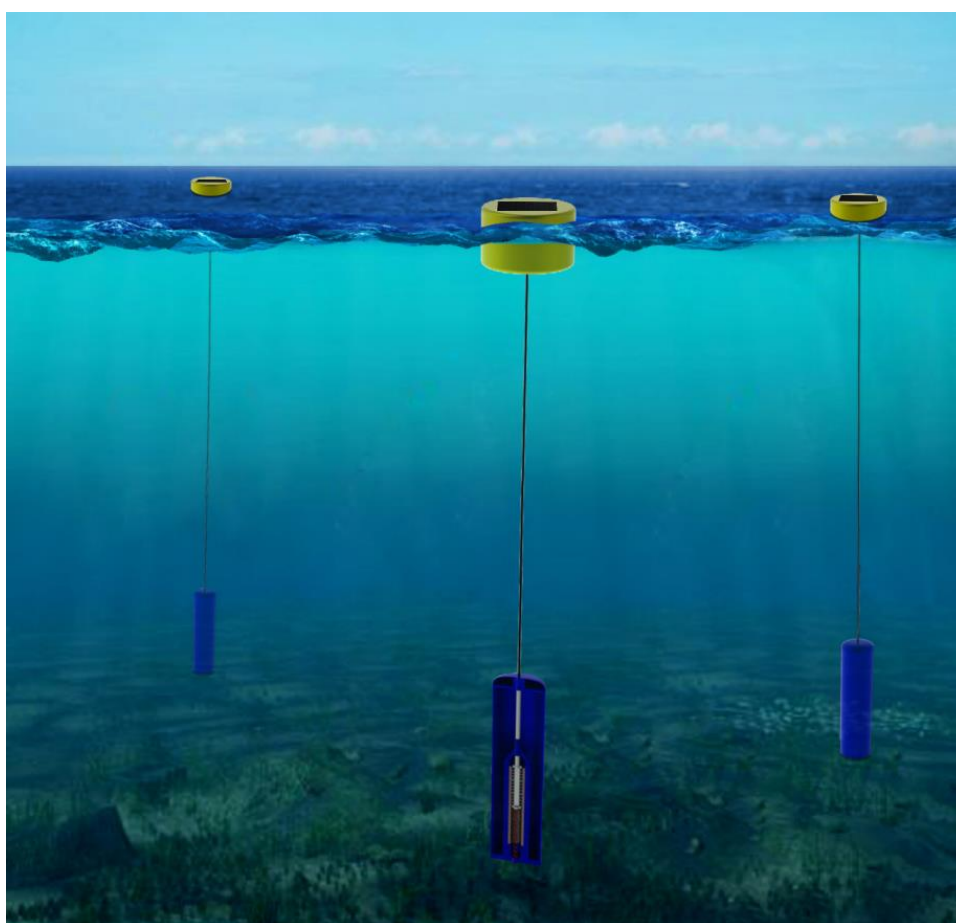


Figura 6.5 Módulo híbrido para absorção de energias das ondas, sol e vento.

## **6.2 Sistema marítimo híbrido, corpo cilíndrico flutuante com painel fotovoltaico**

Demonstramos na Figura 6.6, um sistema capaz de aproveitar as duas energias em conjunto, num cenário hipotético. É de referir que a eficiência solar pode ser ainda superior aos cálculos apresentados anteriormente, isto porque o painel fotovoltaico pode ser adequado de forma a cobrir totalmente o corpo cilíndrico flutuante, na infraestrutura do sistema de aproveitamento da energia das ondas.



*Figura 6.6 Sistema híbrido usado para calcular o potencial energético combinado das ondas e do sol.*

Na Tabela 6.1 apresentam-se os valores da energia calculada, para o sistema proposto e ilustrado na Figura 6.6, tendo em conta o aproveitamento combinado de energia das ondas e de energia fotovoltaica, tendo como base as Tabelas 4.7 e 5.4.

Como é natural, existem sempre algumas perdas de energia, resultantes de fatores ligados à conversão de energia, as quais não estão consideradas nestes cálculos.

Tabela 6.1 Potencial energético esperado para o sistema híbrido apresentado neste capítulo.

Mês/Zona	Potência Mensal kW/sistema híbrido						
	Aveiro	Baía de Cascais	Cabo da Roca	Caminha	Costa da Galé	Esposende	Peniche
Jan	44.63	42.25	43.63	40.86	39.25	38.99	41.90
Fev	86.87	60.53	72.04	83.25	57.50	72.69	76.36
Mar	78.30	54.83	69.68	71.18	54.22	63.69	66.89
Abr	77.83	65.65	71.75	73.96	63.57	71.67	69.72
Mai	74.98	69.39	74.98	71.96	68.81	72.58	72.31
Jun	67.27	60.22	65.61	55.03	61.67	66.57	58.32
Jul	75.24	67.31	75.73	72.31	66.95	71.50	69.26
Ago	69.61	63.26	67.90	66.30	64.42	67.36	63.26
Set	44.33	44.22	49.33	43.04	44.99	42.52	43.30
Out	55.76	46.55	53.41	51.03	43.97	47.18	52.71
Nov	64.01	39.69	54.78	60.48	36.35	50.26	52.29
Dez	42.74	58.74	51.64	37.97	43.87	38.32	43.92
<b>Soma/zona</b>	<b>781.57</b>	<b>672.62</b>	<b>750.49</b>	<b>727.37</b>	<b>645.57</b>	<b>703.35</b>	<b>710.23</b>
<b>Média</b>	<b>65.13</b>	<b>56.05</b>	<b>62.54</b>	<b>60.61</b>	<b>53.80</b>	<b>58.61</b>	<b>59.19</b>

Após o estudo aqui desenvolvido, foi notório que a época do ano com maior potencial de extração de energia das ondas foi exatamente no período do ano onde o potencial de produção de energia fotovoltaica é menor. Sendo assim, além de se complementarem para uma maior eficiência conjunta, as energias combinadas também preenchem a “gap” existente em cada uma delas.

Das zonas em estudo, Aveiro foi a que obteve maior potência combinada, 781.57 kW por sistema híbrido. Deste total, 220.54 kW são devidos à energia das ondas e 465.14 kW à energia do sol. Podemos assim dizer que atualmente, e como seria de esperar, a capacidade de extração de energia fotovoltaica é superior ao das ondas, isto porque, como já referido anteriormente, a tecnologia envolvida nestes últimos sistemas ainda está em fase de amadurecimento e desenvolvimento.

Um dado a referir é que, em termos das zonas analisadas, as com maior capacidade de gerar energia solar são as mais ineficientes no que diz respeito à energia das ondas e vice-versa. Este fator não deixa de ser importante para valorizar o sistema de ondas.

Atualmente a produção da energia a partir das ondas é bastante dispendiosa. No entanto, qualquer energia renovável no início do seu desenvolvimento é cara e pouco competitiva quando comparada com a produção de energia a partir de combustíveis fósseis. Veja-se a energia solar, presentemente numa fase de expansão e já com uma investigação tecnológica de há bastantes anos. Em 2009, por cada MWh produzido, o custo era de 359\$. Após uma década, o preço por MWh desceu em 89% para os 40\$. Se recuarmos ainda para um período temporal mais longínquo, para 1956, e tendo em conta a inflação, um painel solar com capacidade de um só watt custava \$1,865, o que para tecnologias presentes, o custo de um painel de 320 watts, utilizado presentemente em larga escala para residências, seria de \$596,800.12 [39].

Transpondo este raciocínio para a instalação de sistemas de aproveitamento de energia das ondas, poderemos dizer que o investimento na investigação e desenvolvimento dessas tecnologias poderá certamente possibilitar no futuro que esta seja uma energia competitiva face às fósseis, com uma significativa redução dos preços por MWh.

## **7. Conclusão Final**

O objetivo desta dissertação foi o estudo e a estimação do potencial energético das ondas do mar, com o aproveitamento conjunto da energia solar na costa marítima portuguesa. Esta é uma matéria de grande importância para o país, e que tem sido abordada por trabalhos prévios na UBI, sendo por isso também de interesse o seu desenvolvimento, no sentido de contribuir e dar continuidade a estudos efetuados anteriormente. Além disso, pretende-se inovar nesta área, no sentido de incluir a energia solar como um suporte de grande importância nos sistemas de aproveitamento da energia das ondas.

No presente trabalho, aborda-se este tema definindo a energia fotovoltaica como complemento energético à energia das ondas. Constatamos que os melhores meses para a produção de energia solar são os piores para a produção de energia das ondas, e vice-versa. Como tal, a coordenação destes dois tipos de fontes energéticas é de facto uma boa abordagem do aumento de eficiência energética. Desta combinação, poder-se-á tornar mais rentável o investimento do sistema híbrido, reduzindo também o “gap” de produção mensal, uma vez que a extração de energia das ondas é mais promissora no outono e inverno (entre novembro e março), e a solar na primavera e verão (entre abril e agosto). Como seria de esperar, a energia das ondas, bem como a hídrica e eólica, é de maior importância nos meses de inverno. Como tal, é de interesse complementar o sistema de aproveitamento com outros tipos de energia nos meses de verão, nomeadamente com a energia solar.

Para os cálculos do potencial energético combinado, utilizou-se uma estrutura flutuante com 2,4m de diâmetro, onde se incluiu um painel fotovoltaico Sharp, com as dimensões de base de fábrica. Contudo, é possível aumentar a rentabilidade do sistema usando um conjunto de painéis fotovoltaicos com dimensão adaptada a toda a estrutura flutuante. E se esta for orbital, podemos tirar ainda um maior proveito através da reflexão do sol na água.

No que se refere ao cálculo da estimativa do potencial energético, foram consideradas vários parâmetros condicionantes, como a profundidade na zona, a altura de onda e o seu período médio. Para o cálculo do potencial solar usou-se a irradiação solar e a temperatura ambiente. Efeitos como o vento na estrutura não foram tidos em consideração no cálculo final, por se mostrarem pouco influenciadores. Com a diminuição da temperatura, é possível aumentar a produção dos painéis solares em cerca de 10%, situação esta proporcionada pelo microclima do ambiente marítimo.

A zona com maior potencial energético nas ondas é Aveiro com uma estimativa de 659,23 kW/m anual e uma média mensal de 54.94 kW/m. Os melhores meses são os de inverno, como já era expectável, sendo o melhor de todos o de fevereiro com 130,65 kW/m. Para a potência esperada, usando o sistema de conversão de ondas referido no subcapítulo 4.3, com uma eficiência de 20%, esperamos uma potência anual de 220,54 kW com uma média mensal de 27,57 kW. Em fevereiro, o melhor mês, espera-se 62,71 kW.

Para o potencial energético do sol, as zonas mais a sul têm capacidade para uma maior rentabilidade, sendo a Costa da Galé a melhor zona. Esta zona, tendo em conta o uso de um painel fotovoltaico, tem uma potência esperada anual de 502,49 kW e uma média mensal de 41,87 kW. Os melhores meses tendem a ser os de verão, algo que se comprovou. Contudo, no ano de estudo o melhor mês foi o mês de maio, que teve níveis de irradiação equivalentes aos meses de verão, mas com menores temperaturas, produzindo assim mais energia.

Para a energia combinada, a zona com maior potencial foi Aveiro com uma produção anual de 781.57 kW e uma média mensal de 65.13 kW. Este é um resultado esperado, visto que para a energia produzida a partir das ondas do mar esta foi a zona de maior potencial. Comparando Aveiro e Costa da Galé comprovamos que Aveiro pode produzir menos 7,43% de energia fotovoltaica, mas é capaz de produzir energia elétrica a partir das ondas em cerca de 220,5% superior, mais do dobro.

Em suma, pretendeu-se demonstrar que Portugal, com a sua Zona Exclusiva Marítima e com uma costa de grande extensão, tem efetivamente um enorme potencial energético a partir das ondas do mar. Deve-se continuar a investir nos sistemas para absorção de energia a partir das ondas, de forma a que os mesmos se tornem mais rentáveis e robustos. Complementando com a produção de energia solar nos sistemas já em uso, conclui-se que se pode rentabilizar o sistema ainda mais, possibilitando a oportunidade de aumentar a produção de energia com custos adicionais mínimos. Investir nas energias marítimas renováveis pode trazer valor acrescentado ao país, modernizando-o numa das áreas mais importantes do mundo atual, e proporcionar uma maior independência energética com baixo impacto ambiental. Além disso, pode ainda ser positiva a criação de recifes artificiais e zonas protegidas que vai impossibilitar pescas predatórias como as de arrasto, criando um impacto positivo no solo e na vida marinha.

## Referências

- [1] European Commission, “30% of electricity generated from renewable sources,” 12 02 2020. [Online]. Available:<https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/DDN-20180921-1>.
- [2] Mota, P. and Pinto, J.P., 2014. Wave energy potential along the western Portuguese coast. *Renewable Energy*, 71, pp.8-17.
- [3] REN, “Produção renovável abastece 51% do consumo em 2019,” 12 02 2020. [Online]. Available:[https://www.ren.pt/pt-PT/media/comunicados/detalhe/producao\\_renovavel\\_abastece\\_51\\_\\_do\\_consumo\\_em\\_2019\\_2](https://www.ren.pt/pt-PT/media/comunicados/detalhe/producao_renovavel_abastece_51__do_consumo_em_2019_2).
- [4] Presidência do Conselho de Ministros. Resolução do Conselho de Ministros n.º 53/2020. Diário da República: I série n.º 133, 10 de julho. Disponível em [www.dre.pt](http://www.dre.pt).
- [5] Meteonorm 7.3” [Online]. Available: <https://meteonorm.com/en/>.
- [6] SODA-Solar Radiation Data, “HelioClim-3 Archives for Free.” [Online]. Available:<http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/helioclim-3-archives-for-free>.
- [7] Cruz, J.M.B.P. and Sarmiento, A.J.N.A., 2004. Energia das ondas: introdução aos aspectos tecnológicos, económicos e ambientais. Alfragide: Instituto do Ambiente.
- [8] Dalton, G.J., Alcorn, R. and Lewis, T., 2010. Case study feasibility analysis of the Pelamis wave energy convertor in Ireland, Portugal and North America. *Renewable Energy*, 35(2), pp.443-455.
- [9] Wave Energy Centre, "Potential and Strategy for the Development of Wave Energy in Portugal " versão 0.1, 2004.
- [10] Skoplaki, E.; Palyvos, J.A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Sol. Energy* 2009, 83, 614–624.
- [11] Kamuyu, W.C.L.; Lim, J.R.; Won, C.S.; Ahn, H.K. Prediction model of photovoltaic module temperature for power performance of floating PVs. *Energies* 2018, 11, 447.
- [12] Global Solar Atlas, “Global Solar Atlas - Data Description.” [Online]. Available: <https://globalsolaratlas.info/download/world>.

- [13] BMar, “Zonas Marítimas sob Soberania e ou Jurisdição Portuguesa,” 20 05 2020. [Online]. Available: <https://www.dgrm.mm.gov.pt/am-ec-zonas-maritimas-sob-jurisdicao-ou-soberania-nacional>.
- [14] R. Mendes, Energia das Ondas, desenvolvimento de uma tecnologia de geração (Gerador Tubular), Covilhã: Universidade da Beira Interior, 2011.
- [15] J. Cruz, Ocean Wave Energy: Current Status and Future Prepectives: Springer-Verlag, 2008.
- [16] Parida, B.; Iniyar, S.S.; Goic, R. A review of solar photovoltaic technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2011, 15, 1625–1636.
- [17] Russell H. Plante, “Solar Energy, Photovoltaics, and Domestic Hot Water”, 2014.
- [18] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, “Photovoltaics Report”, 2020.
- [19] A. Brito Melo, J. Huckerby, "2009 Annual Report," OES-IA (Implementing Agreement on Ocean Energy Systems), 2009.
- [20] Ana Brito e Melo, Zona Piloto Portuguesa para a energia das ondas, 24 de Novembro 2008.
- [21] Markus Mueller, Robin Wallace, “Enabling science and technology for marine renewable energy”, *Energy Policy*, 2008.
- [22] A. MacGillivray, et al., Innovation and cost reduction for marine renewable energy: A learning investment sensitivity analysis, *Technol. Forecast. Soc. Change* (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2013.11.005>.
- [23] R. M. Sorensen, *Basic Coastal Engineering*: Springer Science + Business, Inc., 2006.
- [24] Centre for Renewable Energy Sources, "Ocean Energy Conversion in Europe: Recent advances and prospects " 2006.
- [25] Robert G. Dean, Robert A. Dalrymple, *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*: World Scientific Publishing, 1991.
- [26] Michael E. McCormick, *Ocean Engineering Mechanics: With applications*: Cambridge University Press, 2010.
- [27] J. Falnes, *Ocean Waves and Oscillating Systems: Linear Interations Including Wave Energy Extractions*: Cambrigde University Press, 2004.
- [28] J. N. Newman, *Marine Hydrodynamics*: The Massachusetts Institute of Technology, 1977.
- [29] Ivanova, I.A., Bernhoff, H., Ågren, O. and Leijon, M., 2005. Simulated generator for wave energy extraction in deep water. *Ocean engineering*, 32(14-15), pp.1664-1678.
- [30] I. The MathWorks, *Matlab R2013b*, Copyright 1984-2013, 2013.

- [31] Dina Silva, Paulo Martinho, C.Guedes Soares, Wave energy Distribution along the Portuguese continental coast based on A thirty three years hindcast, *Renewable Energy* (2018), doi: 10.1016/j.renene.2018.05.037
- [32] J. T. Pinho and M. A. Galdino, *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos, Revisada e Atualizada*. Rio de Janeiro, 2014.
- [33] MAGARREIRO, Clarisse; FREITAS, Sara; BRITO, Miguel Centeno. Radiação e energia solar. *Gazeta de Física*. Lisboa, v. 39, n 1/2, p 57- 59, jul. 2016.
- [34] PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps), "PV potential estimation utility." [Online]. Available: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>.
- [35] P. Bento, H. Nunes, J. Pombo, M. do Rosário Calado, and S. Mariano, "Daily operation optimization of a hybrid energy system considering a short-term electricity price forecast scheme," *Energies*, vol. 12, no. 5, 2019.
- [36] Eco Wave Power, Available: <https://www.offshore-energy.biz/ewp-installs-combined-wave-and-solar-system-in-gibraltar/>.
- [37] Floating Marine Solar Cells Harvest Energy from the Sun and Waves, Available: <https://inhabitat.com/marine-solar-cells-by-phil-pauley/>.
- [38] SINNPOWER, "Ocean Hybrid Platform", Available: <https://www.sinnpower.com/floatingplatform>.
- [39] Max Roser, "Why did renewables become so cheap so fast? And what can we do to use this global opportunity for green growth?" 2020.
- [40] Antonio, F.D.O., 2010. Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(3), pp.899-918.
- [41] *Renewable & Sustainable Energy Studies "Wave Energy Converters Report," Stellenbosch University.*

## **Anexo A**

### **A.1 Sistemas de corpos oscilantes**

Este tipo de dispositivos utilizam as ondas do mar para acionar diretamente um gerador elétrico linear, ou através da injeção de um líquido de forma a acionar uma turbina ou um motor hidráulico que vai gerar eletricidade. Contudo, são mais viáveis em zonas de grande densidade de potência, que se traduz em zonas aquáticas de grande profundidade (> 40 m). Estes dispositivos são de 3ª geração e apresentam alguns problemas na sua exploração offshore, nomeadamente associadas ao atracamento, manutenção e transporte de energia elétrica para a costa. Estes problemas mencionados fazem com que não haja praticamente desenvolvimento nestes dispositivos.

Estes corpos flutuantes podem ter o seu movimento limitado a translação ou a rotação causado pelas ondas do mar ou ainda a combinação de ambas as situações. Os sistemas oscilantes dividem-se em várias categorias, a nível de estrutura e a nível da forma de absorção da energia [14,15].

#### **A.1.1 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 deriva da ondulação do mar. Num determinado momento, o nível de água sobe e desce com uma determinada frequência, proporcionando 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 das ondas do mar e são dotados de características axissimétricas, permitindo extrair energia de ondas provenientes de todas as direções. A configuração mais simples traduz-se num único corpo flutuante ou boia que desce ou sobe conforme a cava ou crista da onda, respetivamente. O movimento da boia é de pura translação e dá-se relativamente a uma estrutura fixa no fundo do mar. Contudo, devido à axissimetria deste tipo de dispositivo, é possível absorver energia de ondas provenientes de qualquer direção [14].

### ***Norwegian buoy***

O Norwegian buoy, Figura A.1, é um dispositivo que utiliza uma boia esférica como corpo flutuante. A extração de energia é conseguida através de uma turbina a ar que aciona o gerador. O movimento da boia está associado a um suporte que se encontra fundeado por uma junta universal, que faz movimentar o ar através de um orifício para a turbina, produzindo assim energia elétrica. Contudo, há uma versão deste dispositivo onde em vez de se acionar uma turbina a ar, o corpo flutuante atua consoante uma estrutura fixa no fundo do mar e aciona uma bomba de pistões que fornece água sob pressão a uma turbina hidráulica, que automaticamente aciona um gerador elétrico rotativo [40].

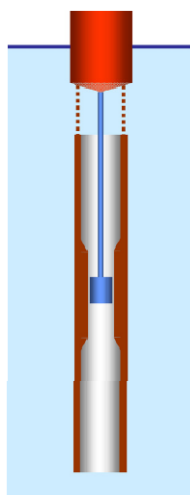


*Figura A.1 Norwegian buoy [40].*

Existem também configurações de sistemas de absorção pontual que, em vez de um, utilizam dois corpos flutuantes. Nesta situação, a energia é convertida através do movimento relativo dos dois corpos oscilantes, eliminam-se assim algumas dificuldades de operação resultantes da distância entre a superfície da água e o fundo do oceano, presentes em sistemas de apenas um corpo. Contudo, sistemas de conversão de energia das ondas com múltiplos corpos flutuantes também apresentam problemas especiais no seu controlo, nomeadamente no conceito de absorção pontual bipartida que consiste em dois corpos flutuantes. Um dos corpos é exterior, de pequena frequência ressonante, que serve de referência para um corpo flutuante interior que opera como o corpo absorvente ressonante.

### ***IPS Buoy***

O IPS Buoy, Figura A.2, foi desenvolvido pela Interproject Service AB and Technocean, sendo um dispositivo baseado no conceito descrito anteriormente, da autoria de Sven A. Noren. Este consiste numa boia consolidada a um tubo oco vertical submerso (tubo de aceleração) aberto em ambas as extremidades. As ondas provocam um movimento vertical oscilatório do pistão relativamente ao tubo de aceleração, que é convertido em movimento rotacional através de um sistema mecânico e por consequência aciona o gerador elétrico. Tem uma potência nominal de 120-250 kW, sendo as dimensões do pistão/boia de 3-4 metros de altura, 10-12 metros de diâmetro e um tubo de aceleração de 20 metros [40, 41].



*Figura A.2 Desenho esquemático do IPS Buoy [40].*

### ***AquaBuOY***

O aquabuoy, Figura A.3, combina a tecnologia IPS com um par de mangueiras de borracha reforçada com aço denominadas de hose-pump. O pistão encontra-se consolidado com as mangueiras hose-pump e, devido ao seu movimento oscilatório, as mangueiras são esticadas e contraídas alterando o seu volume interno. A água que se encontra no interior das mangueiras sofre uma pressão, sendo transferida para um acumulador de pressão que leva ao acionamento de uma turbina Pelton ligada a um gerador elétrico. Contudo este dispositivo ainda se encontra em desenvolvimento.



Figura A.3 Desenho esquemático do Aqua Buoy [40].

### **PowerBuoy**

O PowerBuoy, Figura A.4, construído pela Ocean Power Technologies, é um sistema de ascensão com um corpo flutuante que oscila consoante o movimento das ondas. Relativamente à conversão de energia, apenas sabemos que é um sistema patenteado, uma vez não existir informação aprofundada. Este dispositivo, de forma automática bloqueia em situações adversas, desbloqueando-se quando estas voltam ao normal. É destinado a profundidades entre 30 e 60 metros com uma capacidade de 40 kW. As dimensões desta unidade são de 3,7 metros de diâmetro e 15,8 de altura [24, 41].



Figura A.4 PowerBuoy. [<http://www.oceanpowertechnologies.com>]

## **Wavebob**

O wavebob, Figura A.5, desenvolvido pela Wavebob Ltd. (UK), também consiste num sistema hidráulico com um corpo flutuante que extrai potência através de alternadores síncronos. Este dispositivo incorpora um sistema de controlo que permite modificar a frequência natural de acordo com a frequência predominante da onda incidente. É mais orientado para operar em modo offshore, e em profundidades superiores a 50 metros. O dispositivo, com 1000 kW de potência nominal, tem 15 metros de diâmetro e pesa 440 toneladas [24, 40].

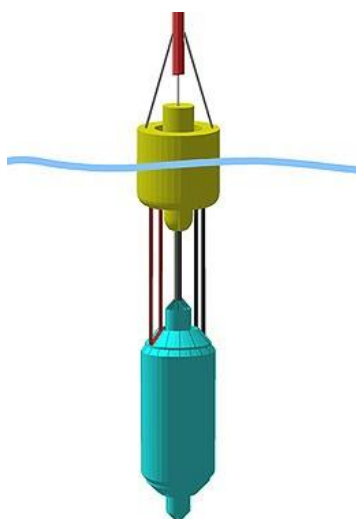


Figura A.5 Desenho artístico do dispositivo Wavebob.  
[[http://www.wavebob.com/how\\_wavebob\\_works/](http://www.wavebob.com/how_wavebob_works/)]