

Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

**Avaliação do potencial de energia das ondas no
Atlântico Norte num contexto de alterações
climáticas**

Dissertação de Mestrado em Engenharia das Energias
Renováveis

João Cristóvão Martins

Orientadora: Professora Doutora Margarida Lopes Rodrigues Liberato

Coorientador: João Carlos Andrade dos Santos



Vila Real, 2020

Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

**Avaliação do potencial de energia das ondas no
Atlântico Norte num contexto de alterações
climáticas**

Dissertação de Mestrado em Engenharia das Energias
Renováveis

João Cristóvão Martins

Orientadora: Professora Doutora Margarida Lopes Rodrigues Liberato

Coorientador: João Carlos Andrade dos Santos

Composição do júri:

Professor Doutor José Manuel Ribeiro Baptista

Professora Doutora Margarida Lopes Rodrigues Liberato

Professor Doutor Eurico Vasco Ferreira Amorim

Vila Real, 2020

*"Nasci sujeito como os outros a erros e a defeitos,
Mas nunca ao erro de querer compreender só com a inteligência,
Nunca ao defeito de exigir do Mundo
Que fosse qualquer coisa que não fosse o Mundo."*

Fernando Pessoa

Agradecimentos

Antes de mais gostaria de agradecer à Professora Doutora Margarida Liberato, por todo o apoio e paciência, por todo o conhecimento partilhado, por todas as vezes em que mesmo eu estando longos períodos ausente da academia, sempre se mostrou disponível e pronta para me ajudar a caminhar em direção ao final deste trabalho. Por todas as críticas e sugestões, que me possibilitaram a elaboração desta dissertação. Agradeço também pela amizade e palavras de incentivo ao longo deste árduo caminho.

Ao Professor Doutor João Santos, o meu sincero agradecimento pela coorientação desta dissertação.

A todos os professores desta academia com os quais adquiri conhecimentos e experiências que muito me ajudaram a crescer a nível académico, mas também a nível pessoal e profissional. Não esquecendo todos os funcionários desta instituição, que sempre me ajudaram quando assim foi preciso.

À minha mãe, avó e padrinho que sempre me incentivaram nesta etapa da minha vida, que me proporcionaram os meios para que fosse possível estar aqui hoje. Obrigado por terem acreditado sempre em mim e por me terem transmitido todos os valores que fizeram com que seja a pessoa que sou hoje. Que esta dissertação seja de uma pequena forma de retribuir todo o esforço que por mim tiveram.

Em especial ao Pedro Silva e ao Luís Martins, que a partir de um determinado momento deixaram de ser apenas amigos e passaram a fazer parte da minha família. Pessoas com as quais construí muitas memórias e irei mais ainda, amigos que ficam para a vida e que estiveram sempre ao meu lado em todos os momentos.

Em especial à Ana Gonçalves, que esteve sempre disposta a ajudar durante todo o percurso académico, em especial nesta última etapa. E também por todos os momentos que ao longo destes anos foram vividos.

A todos os que, de uma forma direta ou indireta, fizeram com que fosse possível terminar esta etapa.

E claro, a mim por todo o esforço que dediquei a esta dissertação!

RESUMO

A energia é a chave para o desenvolvimento económico e social. Desenvolvimento esse que causa um aumento crescente do consumo de energia eléctrica no mundo. De forma a que seja possível colmatar esta procura de energia, as fontes de energia tradicionais não podem ser a única solução viável uma vez que são as principais responsáveis pelos diversos problemas ambientais, como a emissão de dióxido de carbono para a atmosfera.

Deste modo é urgente desenvolver novas formas de produção de energia que sejam sustentáveis e não prejudiciais ao meio ambiente. Existem diversas alternativas às formas convencionais de produção de energia eléctrica, tais como a energia hídrica, eólica, solar e a energia dos oceanos. Assim uma das formas de energia dos oceanos capaz de contribuir para a redução da utilização de combustíveis fósseis é a energia das ondas.

Nesta dissertação é avaliado o potencial energético das ondas, bem como a altura média e o período médio da onda no Atlântico Norte, tendo em conta quatro pontos ao longo da costa de Portugal continental e duas localizações nas ilhas. Após a análise dos valores de potencial energético e da sua variabilidade nos vários pontos em estudo, verifica-se que é o local perto do canhão da Nazaré (ponto B) aquele que apresenta valores médios de potencial energético mais elevados - como exemplo refira-se o ano de 2014 onde temos valores de 42,60 kW/m nesse ponto B. Contudo esta localização torna bastante complicada a instalação de um Conversor de Energia das Ondas (CEO) neste sítio, apesar de apresentar valores de potencial bastante interessantes.

A localização de Portugal na Europa permite ter um acesso privilegiado ao recurso de energia das ondas, com valores de cerca de 1530,3 TW h/ano, o que face aos outros locais em estudo coloca Portugal como a terceira região com maior potencial de energia das ondas disponível.

Tendo em conta as tendências do aumento dos gases de estufa na atmosfera, agravando a ocorrência de fenómenos extremos. Prevê-se um aumento de 2,95% no total de energia das ondas, que no imediato não se mostra muito significativo. Contudo, no caso de um parque de produção de energia das ondas ao fim de 10 anos, este aumento será bastante significativo

Palavras chave: Energias renováveis; Energia dos Oceanos; Energia das ondas; Conversores de Energia das Ondas (CEO); Portugal; Alterações Climáticas.

ABSTRACT

Energy is the key to economic and social development. This development is causing a growing increase in electricity consumption in the world. In order to meet this energy demand, traditional energy sources cannot be the only viable solution as they are primarily responsible for various environmental problems such as the emission of carbon dioxide into the atmosphere.

It is therefore urgent to develop new forms of energy production that are sustainable and not harmful to the environment. There are several alternatives to conventional forms of electricity production. Such as hydro, wind, solar and ocean energy. Thus, one of the forms of ocean energy that can contribute to reducing the use of fossil fuels is wave energy.

This work evaluates the energy potential of the waves, as well as the average wave height and average wave period in the North Atlantic, considering four points along the coast of mainland Portugal and two on the islands. After an analysis of the energy potential values and its variability at the various points of the study, one verifies that it is the location near the Nazaré Canyon (point B) that has the highest average energy potential values. As an example, we can refer to the year 2014 when we have values of 42.60 kW/m at this point B. However, this location becomes quite complicated to install a Wave Energy Converters (CEO) on this site, despite having very interesting potential values.

Portugal's location in Europe allows privileged access to the wave energy resource, with values of around 1530.3 TW h / year, which in comparison with the other places under study places Portugal as the third region with the greatest energy potential available waves.

Considering trends in the increase of greenhouse gases in the atmosphere, aggravating the occurrence of extreme phenomena. It is expected a 2.95% increase in the total wave energy, which is not immediately significant. However, in the case of a wave energy production park after 10 years, this increase will be quite significant.

Keywords: Renewable energy; Ocean Energy; Wave energy; Wave Energy Converters (CEO); Portugal; Climatic changes.

ÍNDICE

Resumo.....	IX
Abstract.....	XI
Índice Figuras.....	XV
Índice de Quadros.....	XVII
Lista de acrónimos e abreviaturas.....	XIX
1 Introdução.....	1
1.1 Objetivos	1
1.2 Enquadramento geral e motivação	1
1.3 Estrutura da tese.....	4
2 Estado da arte	5
2.1 Energia das ondas	5
2.2 Energia das ondas no Mundo e em Portugal.....	6
3 Tecnologia.....	13
3.1 Classificação das tecnologias de conversão da energia das ondas.....	13
3.1.1 Localização	14
3.1.2 Dimensão e/ou orientação do dispositivo.....	14
3.1.3 Princípio de funcionamento	15
3.1.4 Tipo de sistema de captação de energia das ondas (Power take-off).....	16
3.2 Conversores elétricos	18
3.3 Desafios	19
3.3.1 Conversão da energia das ondas em eletricidade	20
3.3.2 Importância da investigação da superfície do oceano.....	21
3.3.3 Cogeração: Produção de energia elétrica combinada com a purificação de água do mar	21
3.3.4 Eficiência	23
3.3.5 Geradores Elétricos Lineares.....	23
3.3.6 Densidade de potência.....	24
3.3.7 Custos e considerações económicas	25
3.4 Considerações ambientais	26
3.4.1 Impactos dos CEO no ambiente envolvente e ecossistemas	26
3.4.2 Flúidos Hidráulicos	26
3.5 Sistemas em estudo	27
3.5.1 Fundamentos do sistema mWave	27

3.5.2	Modelo numérico de desempenho	29
3.5.3	Simulação	30
3.5.4	Efeito da inflação da membrana	31
3.5.5	Matriz de potência do sistema Bombora.....	32
4	Dados e metodologia	33
4.1	área de estudo e dados das características das ondas	33
4.2	cálculo do potencial de energia das ondas.....	35
4.3	Análise temporal e espacial do potencial de energia das ondas	36
5	Análise dos resultados	39
5.1	Variabilidade da altura média das ondas	39
5.1.1	Média anual da altura das ondas	39
5.1.2	Média sazonal da altura das ondas.....	40
5.1.3	Média mensal da altura das ondas.....	42
5.2	Variabilidade do período médio das ondas	43
5.2.1	Média anual do período	43
5.2.2	Média sazonal do período	44
5.2.3	Média mensal do período	45
5.3	Variabilidade do potencial energético disponível	46
5.3.1	Potencial médio anual.....	46
5.3.2	Potencial médio sazonal.....	48
5.3.3	Potencial médio mensal	51
5.4	Potencial energético das ondas tendo em conta das alterações climáticas	52
6	Conclusões	55
6.1	Considerações futuras	57
	Referências.....	59
	Anexos	63

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1-1: Consumo Mundial de Energia 1990 – 2040 (EIA 2016).	1
Figura 1-2: Produção de energia elétrica global, por fonte de energia, 2012-40 (bilhões de quilowatts-hora), adaptado de (EIA 2016).....	2
Figura 2-1: Esquema da órbita de uma partícula numa onda regular em águas profundas (Wang et al., 2018).	5
Figura 2-2: Atlas europeu para a energia das ondas (Mota and Pinto 2014).....	7
Figura 2-3: Características do estado do mar, tendo em conta as medições feitas pela boia de Sines (a) para um período de 16 anos (1988-2003) e os dados de reanálise fornecidos pelo DW (wave data) (b), para um intervalo de tempo de 15 anos (2000-2014). Direção das ondas em Sines (c) (Rusu and Onea 2016).	9
Figura 2-4: Diferenças da energia média das ondas durante os períodos 1990–2000 (a) e 2001–2008 (b) em relação aos recursos médios no período 1981–1990 (adaptado de Wei et al., 2017).	10
Figura 2-5: Mapa do potencial médio das ondas (em kW/m) correspondente ao período de 15 anos entre janeiro de 2000 e dezembro de 2014 (Rusu e Onea, 2016).....	11
Figura 2-6: Potencial energético das ondas, relativamente ao período de 15 anos entre janeiro de 2000 e dezembro de 2014, representado em relação ao total e ao registado no inverno (Rusu e Onea, 2016).	11
Figura 2-7: Valores médios da altura significativa da onda (H_s), correspondentes ao período de 15 anos em estudo, entre janeiro de 2000 e dezembro de 2014; valores correspondentes ao total e ao registado no inverno (Rusu e Onea, 2016).....	12
Figura 3-1: Classificação de dispositivos quanto à distância à linha de costa (Adaptado de Paixão Conde e Gato, 2008)	14
Figura 3-2: Esquema com a dimensão e/ou orientação dos dispositivos (Adaptado de Moura Paredes, 2008).....	15
Figura 3-3: Classificação de alguns CAOs (adaptado de Falcão, 2009).	16
Figura 3-4: PTO hidráulico (Antolín-urbaneja et al., 2015).	17
Figura 3-5: Típico circuito hidráulico de um CEO (Drew et al., 2009).....	21
Figura 3-6: Esquema da tecnologia CETO (Carnegie Clean Energy 2014).....	22
Figura 3-7: Projeto CETO UK (Carnegie Clean Energy 2014).....	22
Figura 3-8: Esquema de um gerador elétrico baseado num gerador de ímanes permanentes (Drew et al., 2009).	24
Figura 3-9: Comparação entre a energia disponível, entre um recurso de energia contínuo e intermitente (Skoglund et al., 2010).	25
Figura 3-10: Esquema em <i>Autocad</i> do protótipo <i>mWave</i> (Algie et al., 2017).....	28
Figura 3-11: Esquema de funcionamento do protótipo <i>mWave</i> (Algie et al., 2017).....	28
Figura 3-12: Esquema do <i>mWave</i> com comprimento total (L), o comprimento da célula (l) e a orientação em relação à crista da onda incidente (α) (Algie et al., 2017).....	30
Figura 3-13: Vista transversal do sistema <i>mWave</i> , onde S corresponde à separação da membrana, A a área da membrana, T o perfil da estrutura de apoio, e W a largura do sistema (Algie et al., 2017).....	30
Figura 3-14: Captura de energia das ondas em função da inflação das membranas (Algie et al., 2017).....	31

Figura 3-15: Matriz de potência de energia das ondas do sistema <i>Bombora</i> (Algie et al., 2017).....	32
Figura 5-1: Evolução temporal da altura média das ondas, em cada ponto ao longo dos diferentes anos de estudo.	40
Figura 5-2 Variabilidade espacial da altura média das ondas nas diferentes estações do ano [a) Inverno (DJF), b) Primavera (MAM), c) Verão (JJA) e d) Outono (SON).	41
Figura 5-3: Média mensal de altura da onda.	42
Figura 5-4: Evolução temporal do período médio das ondas, em cada ponto ao longo dos diferentes anos de estudo.	44
Figura 5-5: Período médio mensal das ondas.....	45
Figura 5-6: Evolução temporal do Potencial Energético Médio Anual.	47
Figura 5-7: Avaliação do Potencial Energético das ondas, em cada ponto ao longo das diferentes estações do ano.....	50
Figura 5-8: Distribuição espacial do Potencial Energético das ondas nas diferentes estações do ano [a) Inverno, b) Primavera, c) Verão e d) Outono.....	50
Figura 5-9: Potencial Energético Médio Mensal.	51
Figura 0-1: Exemplo da configuração do <i>Panoply</i>	64

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1-1: Resultados teóricos anuais estimados para cada tipo de energia dos oceanos (Adaptado de Rocha et al. 2010).	3
Quadro 2-1: Recurso da energia das ondas, teórico global e regional (TW h/ano) (Reguero et al., 2015).	12
Quadro 3-1: Alguns tipos de conversores elétricos (Wang, et al., 2018).	18
Quadro 4-1: Descrição dos pontos de referência considerados.	34
Quadro 5-1: Altura média sazonal das ondas.	42
Quadro 5-2: Período médio sazonal das ondas.	45
Quadro 8-1: Alguns dos CEO instalados entre 2005 e 2016 (Wang et al., 2018).	63
Quadro 8-2: Tabela 6, referente aos pontos do estudo feito por Silva et al. (2018).	64

LISTA DE ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

CEO – Conversor de Energia das Ondas

CAO – Coluna de água oscilante

PTO - Power Take Off

DW – Wave Data

CDO – Climate Data Operator

ECMWF - European Center for Medium-Term Weather Forecasts

NETCDF – Network Common Data Form

Hs – Altura da onda

T – Período da Onda

Dir – Direção da Onda

STD – Desvio Padrão

WP – Potencial Energético

WPgross – Potencial energético Bruto

WPnet – Potencial energético líquido

A1B – Cenário com aumento dos gases de efeito estufa

B1- Cenário sem o aumento dos gases de efeito estufa

F_w – Força total hidrodinâmica na membrana

F_i - Força que a pressão de ar exerce dentro da célula

F_k - Força que representa a rigidez hidrostática

M_w^∞ - Coeficiente de massa da água

1 INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo global a avaliação do potencial de energia das ondas no Atlântico Norte utilizando dados de modelos climáticos, fazendo uma aproximação à costa portuguesa. Mais especificamente pretende-se estudar o potencial de energia das ondas no clima presente e perceber a influência que as alterações climáticas poderão ter no comportamento das ondas. Para isso serão feitas análises da altura da onda, do período da onda e do potencial energético das ondas, que vão permitir avaliar o recurso disponível no Atlântico Norte.

1.2 ENQUADRAMENTO GERAL E MOTIVAÇÃO

A energia é a chave para o desenvolvimento económico e social (Ozkop and Altas 2017). O desenvolvimento das energias renováveis é fomentado essencialmente pela dependência mundial dos combustíveis fósseis, pela respetiva política económica e pela crescente consciencialização sobre os problemas ambientais. É urgente encontrar políticas energéticas que assegurem um desenvolvimento sustentável no domínio da energia (Cruz and Sarmento 2004).

Grande parte das emissões de dióxido de carbono tem origem na queima de combustíveis fósseis (U.S. Energy Information Agency 2013). O aumento das emissões deste gás deve-se sobretudo ao desenvolvimento de países como a China, Índia, Brasil e África do Sul que continuam a depender fortemente dos combustíveis fósseis para dar resposta à elevada procura de energia (EIA 2016).

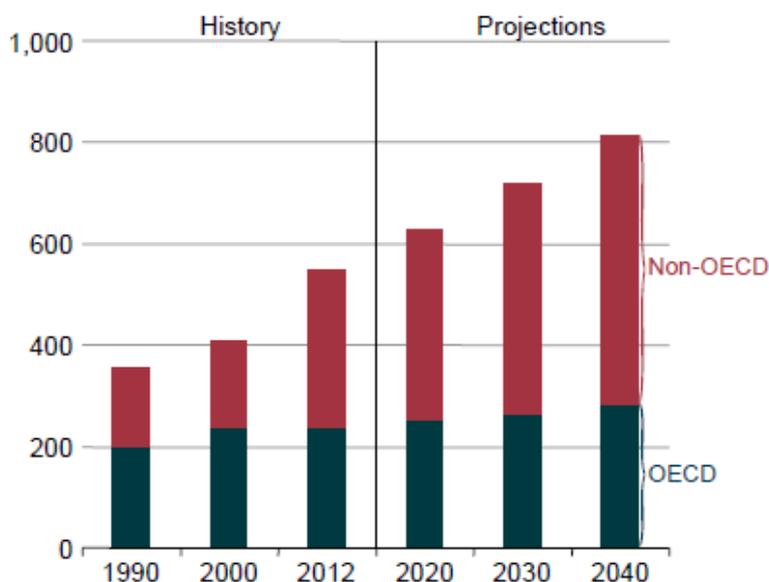


Figura 1-1: Consumo Mundial de Energia 1990 – 2040 (EIA 2016).

As políticas e incentivos dos governos ao longo de todo o mundo são um fator preponderante no desenvolvimento e construção de instalações de produção de energia renovável. Até 2040, é espectável que as energias renováveis, o gás natural e o carvão tenham uma participação equivalente na produção global de energia elétrica (EIA 2016).

Deste modo é urgente desenvolver novas formas de produção de energia que sejam sustentáveis e não prejudiciais ao meio ambiente. Existem diversas alternativas às formas convencionais de produção de energia elétrica, tais como a energia hídrica, eólica, solar e a energia dos oceanos. Estando esta última muito longe de atingir o auge no que toca à exploração da sua energia (Rocha et al. 2010). No entanto a exploração da energia das ondas através dos conversores de energia das ondas (CEO), apenas convertem uma pequena fração da energia disponível (Silva et al., 2018).

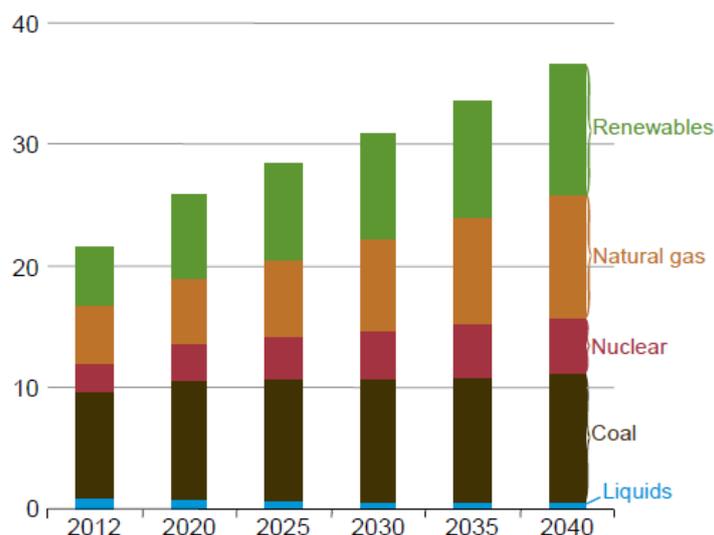


Figura 1-2: Produção de energia elétrica global, por fonte de energia, 2012-40 (bilhões de quilowatts-hora), adaptado de (EIA 2016)

A superfície do planeta da terra é composta por 29,2% de continentes e cerca de 70,8% de oceanos. 97,4% desta água é água salgada dos oceanos (96,5%) e mares (0,9%). Os oceanos possuem diferentes formas de fluxos energéticos, que levam ao desenvolvimento de várias tecnologias, com vista a aproveitar da melhor forma a sua energia (Rocha et al. 2010):

- Energia do Gradiente Térmico: é uma forma de conversão de energia obtida através da diferença de temperatura entre a água da superfície, aquecida pelo efeito da radiação solar, e a água fria das profundezas do oceano;
- Energia do gradiente de salinidade: obtida através da diferença de concentração de salinidade entre a junção da água dos oceanos e dos rios, em sítios como a foz dos rios ou deltas – obtém-se energia elétrica a partir da diferença de pressão baseada no fenómeno natural de osmose;

- Energia das correntes de Maré: correntes de maré, é o nome que designa o movimento horizontal da água, que existe nos oceanos, rios, baías e portos sobre a influência das marés. A conversão da energia cinética presente nas correntes da maré pode ser feita seguindo os mesmos conceitos utilizados na energia eólica, recorrendo ao uso de turbinas;
- Energia das Marés: energia proveniente da rotação da terra no seio dos campos gravitacionais da Lua e do Sol. A conversão de energia potencial obtida pela diferença de altura da maré, permite a construção de barragens fixas ou flutuantes em estuários ou no oceano a vários quilómetros da costa, constituídas por comportas e grupos de turbina/gerador;
- Energia das ondas: a origem desta forma de energia, criada pelo efeito do vento na superfície do oceano é o resultado da redistribuição da radiação solar na atmosfera.

Dos diferentes tipos de recursos energéticos do oceano, a energia das ondas é aquela que apresenta maior potencial energético para ser explorado, como podemos observar no quadro 1-1, que mostra o valor estimado de produção de energia, pelos diferentes tipos de mecanismos de conversão (Rocha et al. 2010). Este quadro mostra também claramente a grande variabilidade anual da energia das ondas, onde para um ano a energia das ondas apresenta uma variabilidade entre os 8 mil e os 80 mil TW h/ano enquanto por exemplo a energia das marés apenas regista cerca de 300 TW h/ano.

Quadro 1-1: Resultados teóricos anuais estimados para cada tipo de energia dos oceanos (Adaptado de Rocha et al. 2010).

Tipo de Energia	Energia teórica anual [TW h/ano]
Gradiente Térmico	10000
Gradiente de Salinidade	2000
Correntes Marítimas	800
Marés	300
Ondas	8000 a 80000

A possibilidade de converter a energia das ondas em energia elétrica tem vindo a fomentar vários estudos e evolução tecnológica. Só no ano de 1980 foram registadas mais de mil patentes. A primeira patente foi registada em França em 1799, por pai e filho chamados *Girard* (Falcão 2009).

A energia das ondas pode ser vista como uma forma concentrada de energia eólica, devido ao facto das ondas serem geradas pela ação do vento a soprar na superfície do oceano. Deste modo, a linha de costa atlântica da Europa apresenta uma larga quantidade deste recurso energético devido à sua exposição aos ventos do oeste que sopram sobre o Atlântico Norte, criando e orientando as ondas para os países da Europa

Ocidental (Mota and Pinto 2014). A maior desvantagem da energia das ondas está no facto de resultar da ação do vento, devido à sua enorme variabilidade temporal (Falcão 2009).

1.3 ESTRUTURA DA TESE

A dissertação está organizada em 6 capítulos diferentes.

No primeiro capítulo é feito um enquadramento geral das energias renováveis, bem como os motivos pelo qual é importante cada vez mais apostar em formas de produção de energia alternativas. Apresenta-se ainda o enquadramento da energia das ondas, como forma possível de produção de energia elétrica.

No segundo capítulo é apresentada a energia das ondas a nível mundial e nacional, de forma a que se possa perceber o impacto que este tipo de energia tem em Portugal, tal como os vários estudos e protótipos desenvolvidos.

No terceiro capítulo é apresentada uma análise do tipo de sistemas de conversão de energia das ondas, tendo em conta as várias classificações, princípios de funcionamento, problemas inerentes a este tipo de sistemas e algumas formas de melhoria, bem como a análise de um dos mais recentes sistemas desenvolvidos para a captação de energia das ondas. Este último sistema será posteriormente utilizado para obter os valores de potencial calculados nesta dissertação.

No quarto capítulo descreve-se a metodologia e dados que foram utilizados neste estudo, onde foram analisadas as componentes da onda como a altura significativa da onda e período da mesma. São também apresentadas as fórmulas que foram utilizadas para que no final fosse possível calcular valores para ao potencial energético das ondas.

O quinto capítulo apresenta e discute os resultados obtidos neste estudo, bem como uma análise da influência das alterações climáticas nas características das ondas e no seu efeito direto na produção de energia das ondas.

Finalmente o sexto e último capítulo contém as principais conclusões deste estudo, bem como propostas de trabalhos futuros.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 ENERGIA DAS ONDAS

A energia das ondas pode ser gerada por diferentes mecanismos, por exemplo terremotos ou forças planetárias, contudo a maioria deriva da força do vento exercida numa superfície fluída, sendo estas conhecidas por ondas induzidas pelo vento. A velocidade deste tipo de ondas depende essencialmente do comprimento de onda e da profundidade do oceano.

Como exemplificado na fig. 2-1, o diâmetro do círculo de movimento de uma partícula vai diminuindo com a profundidade da onda. Uma análise de resultados mostra que cerca de 95% da energia das ondas está disponível entre a superfície e uma profundidade igual a um quarto do comprimento de onda para águas profundas (Ilyas et al. 2014). No entanto as ondas geradas pelo vento à superfície do oceano são normalmente irregulares, variando aleatoriamente em altura e período (Wang et al., 2018).

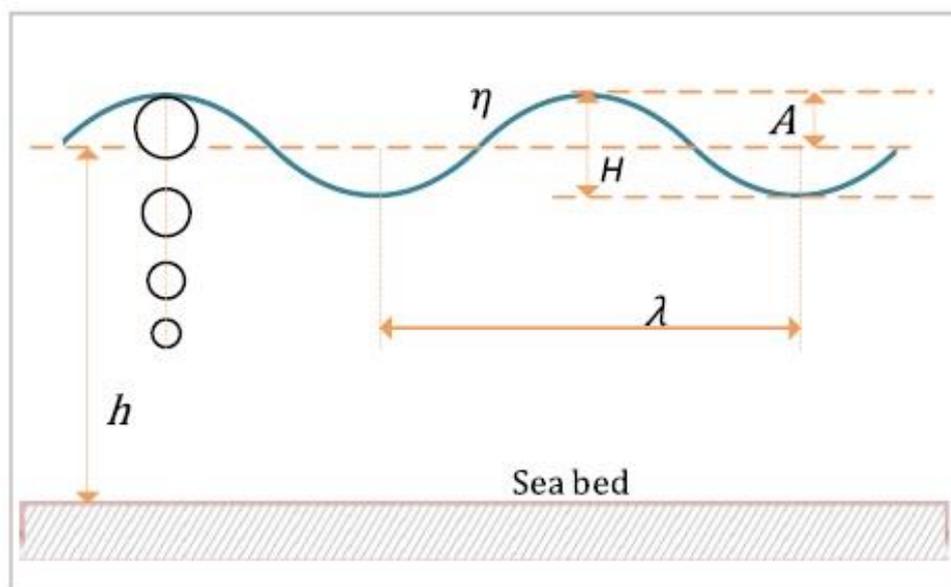


Figura 2-1: Esquema da órbita de uma partícula numa onda regular em águas profundas (Wang et al., 2018).

2.2 ENERGIA DAS ONDAS NO MUNDO E EM PORTUGAL

Vários estudos têm mostrado que o maior recurso global de energia das ondas se encontra nas regiões de latitudes entre os 40° e 60°, locais esses onde é possível encontrarem-se ondas mais energéticas devido aos ventos dominantes de oeste (Silva et al., 2018). Deste modo o mar do noroeste da Europa apresenta-se com um enorme potencial para o aproveitamento da energia das ondas (Saha 2010). A Península Ibérica pode ser considerada um “*hot spot*” em termos de energia das ondas, especialmente ao largo da costa ocidental, uma vez que está sob a influência das ondas do Atlântico Norte. O potencial da energia das ondas pode ser geralmente maior em locais de mar aberto, i.e. *offshore*, do que em locais perto da costa (Mota e Pinto 2014), embora os sistemas perto da costa apresentem vantagens a nível económico em termos de manutenção e instalação face a sistemas *offshore*. Deste ponto de vista, Portugal tem um enorme historial no que diz respeito à avaliação e aproveitamento da energia das ondas, sendo dos primeiros países a instalar sistemas de conversão de energia das ondas, como é exemplo o projeto da central do Pico. Neste caso foi instalado perto da costa um conversor de coluna de água oscilante (CAO), com uma produção estimada de 400 kW, na linha costeira daquela ilha dos Açores. Contudo este projeto apesar de ser começado em 1999 e concluído em 1999, só ficou operacional em 2005 (Rusu e Onea 2016).

Em 2007 foi instalado um protótipo *WaveRoller* à escala real (com uma produção entre 10 a 15 kW) na zona de Peniche, que foi um enorme sucesso abrindo portas para uma extensão de um projeto em larga escala. Outro projeto muito importante em Portugal foi a instalação de três módulos *Pelamis*, montados em 2008 ao largo da Aguçadora. Esse projeto durou apenas alguns meses até ser abandonado, uma vez que os conversores instalados eram a primeira versão e a empresa construtora estava focada no desenvolvimento da versão seguinte dos conversores, que posteriormente viriam a ser instalados na Escócia (Rusu e Onea 2016).

Do ponto de vista climatológico, durante o período do inverno, as ondas perto da costa Portuguesa têm alturas significativas de cerca de 3 m e um potencial energético de 36kW/m, o que constitui um estado representativo do mar. Contudo durante as tempestades de inverno a costa Portuguesa está sujeita a ondas com alturas significativas de 9,5 m ou mais (Rusu e Guedes Soares 2011), valores esses que põem em causa a durabilidade e resistência dos conversores de energia das ondas. Para além da costa continental ibérica, as ilhas e arquipélagos de Portugal e Espanha, tais como Açores, Madeira e Canárias, vêm aumentar o número de locais promissores para o aproveitamento da energia das ondas (Veigas e Iglesias 2014).

Atualmente existem inúmeros estudos focados na avaliação da energia das ondas na costa continental de Portugal, bem como no desempenho e impacto dos *CEO* nessas

Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF), para um ponto *offshore* localizado perto da área em estudo (Rusu e Onea, 2016).

Na figura 2-3 apresentam-se as características do estado do mar, tendo em conta as medições feitas pela boia de Sines (fig. 2-3 a) para um período de 16 anos (1988-2003) e os dados de reanálise fornecidos pelo DW (wave data) (fig. 2-3 b), para um intervalo de tempo de 15 anos (2000-2014) (Rusu e Onea, 2016). Numa primeira análise da figura 2-3 a) pode-se observar que os valores mais relevantes se encontram entre os intervalos de 0 a 7 m (para a altura significativa da onda) e de 5 a 12 s (para o período da onda), com uma potência das ondas entre as isolinhas de 5 a 200 kW. Contudo, os valores mais consistentes encontram-se no centro da distribuição, onde se registam o número máximo de ocorrências com alturas significativas da onda de 2 m e períodos de onda de 8 s, onde o número de horas para estas ocorrências variam de 200 a 867 h. Pode-se fazer uma análise similar ao que se passa na figura 2-3 b), que representa o ponto DW e baseado em dados do ECMWF. Apesar deste ponto ser um ponto *offshore*, se os valores obtidos forem comparados com os valores obtidos para a bóia de Sines, conclui-se que tem um potencial energético significativamente mais baixo. Neste caso o centro da distribuição está aproximadamente alinhado na diagonal, abaixo do limite dos 200 kW/m, com um máximo de 6 MWh/m considerando um intervalo de 7 a 9 s, a que correspondem cerca de 370h. Analisando a figura 3-3 c), baseada nos dados provenientes da bóia de Sines, pode-se observar que a direção das ondas é predominante de noroeste e que os valores de altura significativa superiores a 3 m representam uma percentagem muito baixa.

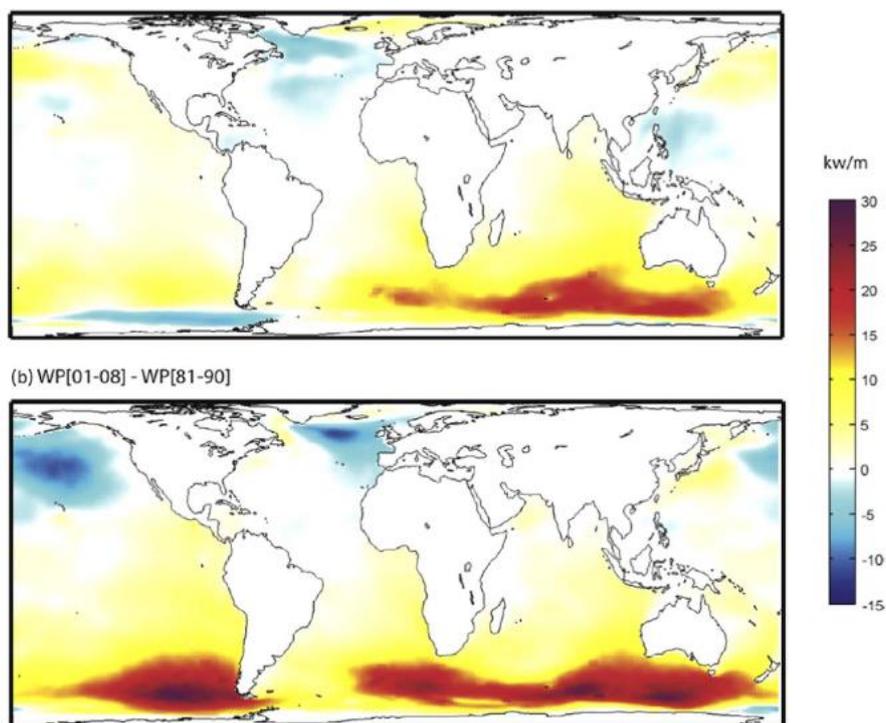


Figura 2-4: Diferenças da energia média das ondas durante os períodos 1990–2000 (a) e 2001–2008 (b) em relação aos recursos médios no período 1981–1990 (adaptado de Wei et al., 2017).

Um outro estudo que permite ter uma perceção geral do que se passa em relação às características das ondas, a nível mundial, é o estudo desenvolvido por Rusu e Onea (2016), onde são analisados dados de ondas para um período de 15 anos. Neste estudo, como é possível verificar na fig.2-5, é apresentado um mapa mundial, com trinta pontos de referência para análises posteriores, onde é possível perceber a grande diferença de potencial energético das ondas entre o hemisfério norte e o hemisfério sul. Dos trinta pontos apresentados neste estudo, grande parte dos que registam valores mais altos para o potencial energético das ondas estão localizados nas latitudes médias do Hemisfério Sul. Contudo é bem perceptível a quantidade de energia disponível no Atlântico Norte, onde ao largo da costa portuguesa são registados valores de potência entre os 20 e os 45 kW/m.

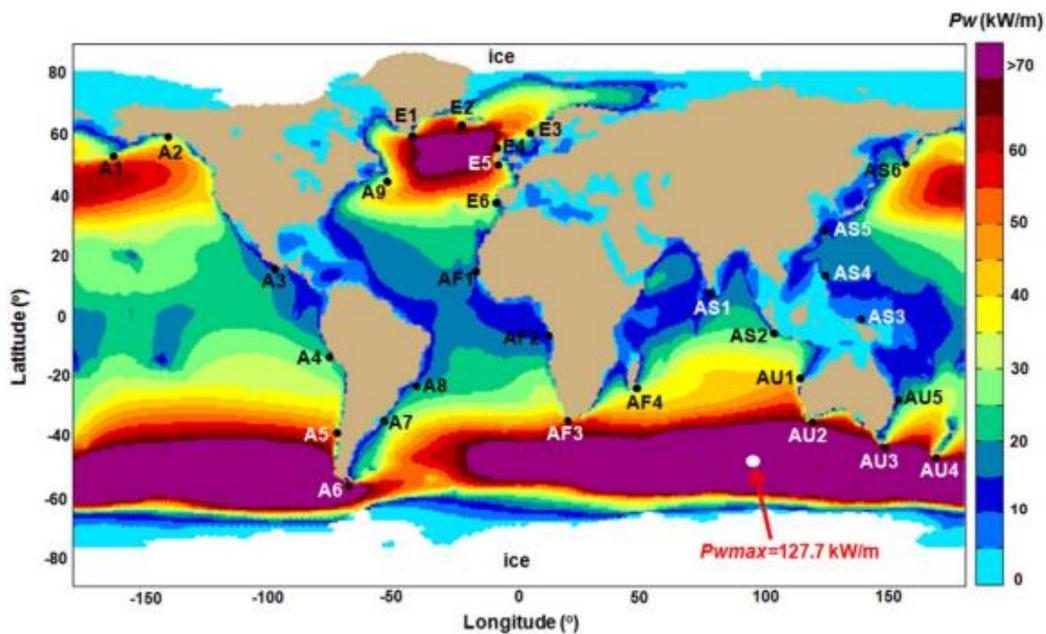


Figura 2-5: Mapa do potencial médio das ondas (em kW/m) correspondente ao período de 15 anos entre janeiro de 2000 e dezembro de 2014 (Rusu e Onea, 2016).

Nesse mesmo estudo é também mostrada a diferença do potencial energético total em relação aquele que se verifica no inverno. Através da análise da fig. 2-6, é fácil perceber que em todos os pontos em análise o potencial energético das ondas registado no inverno é sempre superior ao que se verifica em termos totais. Por exemplo, no ponto E6, que é o ponto que se localiza mais próximo da costa portuguesa, apresenta valores de potencial energético de cerca de 25 kW/m, enquanto no total não chega aos 20 kW/m (Rusu e Onea, 2016).

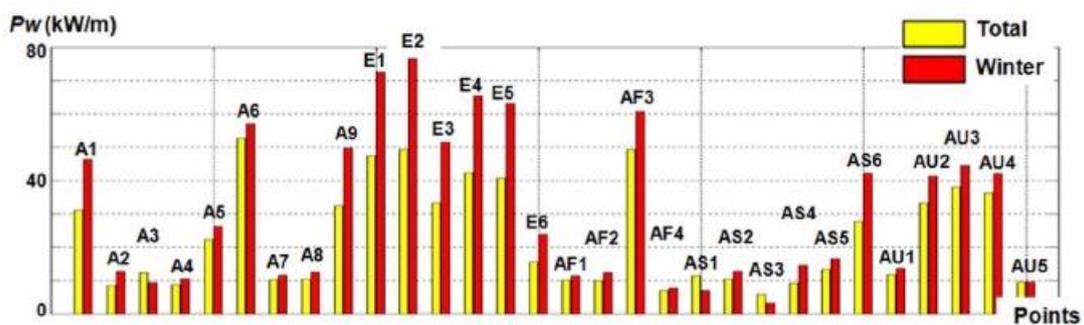


Figura 2-6: Potencial energético das ondas, relativamente ao período de 15 anos entre janeiro de 2000 e dezembro de 2014, representado em relação ao total e ao registado no inverno (Rusu e Onea, 2016).

Na fig. 2-7 é mostrada a forma como a altura da onda varia em relação aos vários locais em análise, tendo em conta os valores totais e aqueles que se registam no inverno. À imagem do que se passa com o potencial energético registado no inverno, os valores registados para a altura significativa da onda (H_s) são sempre superiores no inverno aos que se verificam em termos totais. Como é exemplo disso o ponto E6, ponto esse localizado junto à costa portuguesa, que apresenta valores de cerca de 2 m para o inverno, e em termos totais ronda os 1,5 m (Rusu e Onea, 2016).

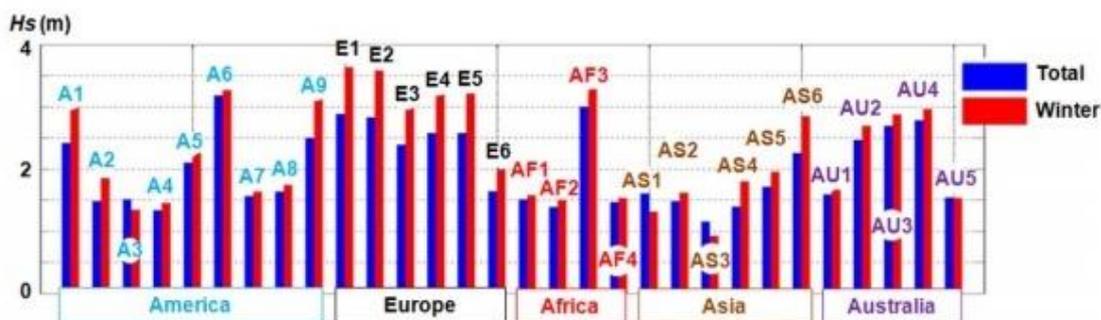


Figura 2-7: Valores médios da altura significativa da onda (H_s), correspondentes ao período de 15 anos em estudo, entre janeiro de 2000 e dezembro de 2014; valores correspondentes ao total e ao registado no inverno (Rusu e Onea, 2016).

No quadro 2-1, as colunas correspondem ao recurso bruto (WPgross), desvio padrão (Std Dev) e à taxa de mudança na tendência das últimas seis décadas. WP representa o recurso global excluindo os níveis de energia abaixo de 5 kW/h. O WPnet indica o poder líquido (isto é, excluindo níveis baixos e áreas cobertas de gelo) sendo a última coluna o seu desvio padrão.

Quadro 2-1: Recurso da energia das ondas, teórico global e regional (TW h/ano) (Reguero et al., 2015).

Region	Wave power resource (TW h/yr) – Effective length approach					
	WP gross	Std Dev	Trend	WP	WPnet	Std Dev
North America – West	2320.6	277.9	11.2	2280.2	2280.2	286.5
North America – East	638.4	48.1	1.5	580.6	560.0	50.1
South America – West	1532.7	237.7	5.8	1526.0	1526.0	240.2
South America – East	749.6	64.8	2.5	704.5	704.5	70.7
Hawaii	134.8	14.3	0.3	133.5	133.5	14.5
Greenland and Iceland	1190.7	126.2	3.2	1181.0	981.8	126.7
Europe – West and North	1573.0	175.3	5.7	1546.3	1530.3	176.8
Africa – West	1155.0	127.6	3.8	1102.5	1102.5	135.4
Africa – East	644.6	50.3	1.7	602.9	602.9	53.0
Madagascar	363.6	33.6	1.1	354.5	354.5	34.7
Asia – South	736.6	67.3	1.9	669.9	669.9	68.6
Polynesia	1049.6	107.5	3.6	974.6	974.6	111.9
Asia – East	1091.3	135.7	3.2	1041.2	1041.2	138.1
Australia and New Zealand	2844.6	286.0	12.5	2808.1	2808.1	287.6
GLOBAL	16,025.1	1177.9	58.0	15,505.8	15,270.0	1212.5

A localização de Portugal na Europa permite ter um acesso privilegiado ao recurso energia das ondas. Como é possível perceber no quadro 2-1, registam-se valores de cerca de 1530,3 TW h/ano o que face aos outros locais em estudo coloca Portugal como a terceira região com mais energia das ondas disponível.

3 TECNOLOGIA

3.1 CLASSIFICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO DA ENERGIA DAS ONDAS

A energia das ondas está fortemente dependente das características do vento, contudo é uma fonte bastante previsível. As ondas, quando formadas em alto mar, podem viajar milhares de quilômetros sem que tenham perdas significativas de energia, começando a enfraquecer quando se aproximam da costa devido aos efeitos de atrito do fundo do mar (André, 2010). Apesar deste enfraquecimento, o recurso energético das ondas apresenta uma grande variabilidade. Contudo existem condicionantes e fatores menos favoráveis, como a irregularidade da amplitude, de fase e direção, juntamente com condições de operação extremas que tornam o aproveitamento deste recurso bastante difícil. Isto faz com que haja cada vez mais engenheiros e investigadores a procurar novos tipos de soluções, para os CEO, que possam suportar os esforços solicitados e ao mesmo tempo tenham a capacidade de fornecer energia à rede de uma forma permanente (Falcão, 2009).

Ao longo das últimas décadas têm sido desenvolvidos diversos dispositivos de aproveitamento da energia das ondas (Falcão, 2010). Atualmente existem várias soluções que fazem parte de um leque de sistemas de conversão de energia das ondas. Contudo estas tecnologias encontram-se em diferentes estados de desenvolvimento, e muitas vezes nem se regem pelos mesmos princípios de funcionamento e construção. Este estado de desenvolvimento dificulta o estabelecimento de uma classificação coerente que agrupe todos os sistemas desenvolvidos até hoje (André, 2010).

Têm sido propostos vários critérios para classificar os sistemas de conversão da energia das ondas, baseados nos seguintes aspetos:

- Localização;
- Dimensão e/ou orientação do dispositivo;
- Princípio de funcionamento;
- Métodos de extração utilizados na conversão da energia das ondas.

Neste capítulo serão classificadas e descritas as principais características de uma parte dos sistemas existentes, bem como aqueles que estão ainda em fase de projeto. No entanto o objetivo principal desta dissertação não é fazer uma análise minuciosa de cada sistema, mas sim permitir que se tenha uma ideia geral das suas características mecânicas e de como se podem classificar. Apesar de existir um enorme número de tecnologias de CEO, é possível classificá-los num grupo limitado de famílias.

3.1.1 LOCALIZAÇÃO

- Dispositivos fixos na costa (*onshore* ou *shoreline*): instalados na linha de costa natural;
- Dispositivos próximos da costa (*near-shore*): situados a dezenas de metros da linha da costa, no mar, em molhes ou em quebra-mares. Determinados sistemas podem estar sobre o fundo oceânico a profundidades na ordem dos 20m;
- Dispositivos afastados da costa (*offshore*): estão afastados da costa, sendo neste caso sistemas flutuantes. Como as profundidades são maiores, a energia transportada pelas ondas também é superior.

É muito importante perceber que o fator preponderante é a profundidade evidenciada a essa distância e não o valor da distância à costa em si (Moura Paredes, 2008).

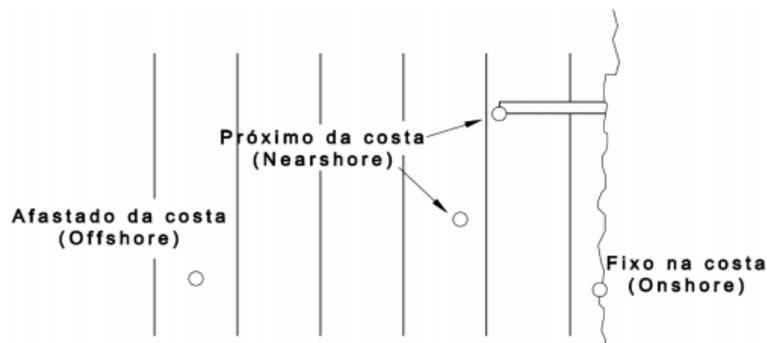


Figura 3-1: Classificação de dispositivos quanto à distância à linha de costa (Adaptado de Paixão Conde e Gato, 2008)

Esta classificação tem em conta dois pontos muito importantes na classificação dos dispositivos. Em primeiro lugar aborda a facilidade de acesso e instalação de um dispositivo e, em segundo, tem em conta as diferentes fases pelas quais uma onda passa desde a sua formação até que se cessa na costa.

3.1.2 DIMENSÃO E/OU ORIENTAÇÃO DO DISPOSITIVO

Esta classificação tem como objetivo a descrição do princípio de operação e a geometria do dispositivo, como esquematizado na fig.3-2 (André et al., 2009):

- Absorvedores pontuais (*Point absorbers*);
- Atenuadores (*Attenuators*);
- Terminadores (*Terminators*).

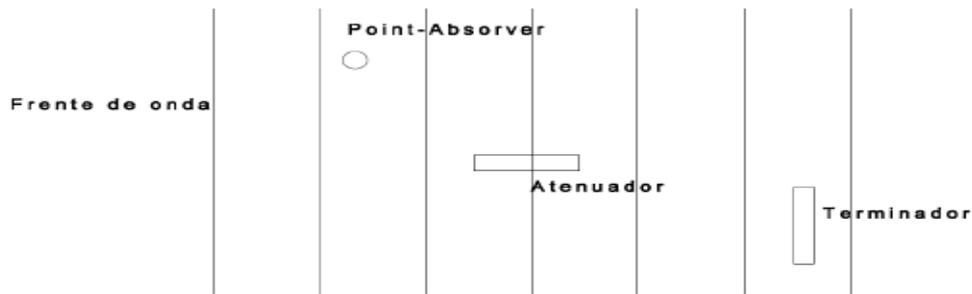


Figura 3-2: Esquema com a dimensão e/ou orientação dos dispositivos (Adaptado de Moura Paredes, 2008).

Os absorvedores pontuais (PA) são dispositivos de pequenas dimensões quando comparados com o comprimento das ondas para as quais foram dimensionados.

Atenuadores e terminadores são dispositivos com um comprimento de onda relativamente próximo à ordem de grandeza do comprimento de onda para o qual foram projetados. A grande diferença entre os dois dispositivos está na sua orientação relativamente à agitação a que estão sujeitos. Qualquer dispositivo *onshore* pode ser classificado terminador (Cruz e Sarmiento, 2004).

3.1.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Existem três concepções básicas de dispositivos utilizados no aproveitamento da energia das ondas (Falcão, 2009). Neste artigo este autor associa algumas das classificações referidas anteriormente, acrescentando informação no que diz respeito ao movimento do dispositivo e localização da coluna de água. A divisão dos sistemas é feita como exposto na fig. 3-3:

- Coluna de água oscilante, CAO (*OWC*);
- Corpos oscilantes de absorção pontual ou progressivos;
- Dispositivos de galgamento.

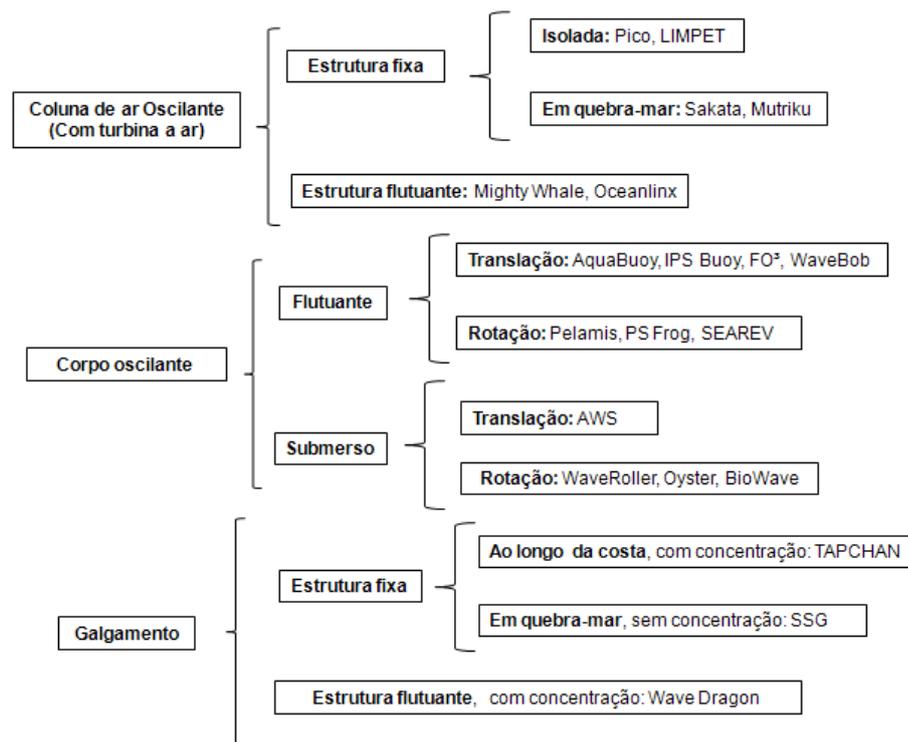


Figura 3-3: Classificação de alguns CAOs (adaptado de Falcão, 2009).

Do meu ponto de vista este é o tipo de classificação mais importante uma vez que reflete o princípio físico através do qual a energia é convertida.

3.1.4 TIPO DE SISTEMA DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS (POWER TAKE-OFF)

O *Power take-off* (PTO) é um dos mecanismos mais importantes de um CEO. Isto porque o PTO é o que faz com seja possível captar a energia das ondas e depois transmiti-la a um gerador para posterior produção de energia elétrica. De acordo com as formas de transmissão de energia aos geradores, existem três grandes grupos de PTOs (Wang et al., 2018):

- PTO hidráulico;
- PTO turbina;
- PTO eléctrico.

O PTO hidráulico apresenta algumas características vantajosas como robustez e a capacidade de fornecer uma grande quantidade de força a velocidades baixas, o que combina perfeitamente com as características das ondas. E ainda tem a enorme vantagem de que a maioria dos componentes usados em sistemas hidráulicos são facilmente encontrados no mercado. Estas características fazem com que os PTOs

hidráulicos sejam amplamente usados nos CEO, como por exemplo no sistema Pelamis e Edinburg Duck (Wang et al., 2018). O princípio de funcionamento deste sistema é bastante simples; basicamente as ondas ativam o braço hidráulico que aumenta a pressão do fluido de trabalho (normalmente é óleo), fazendo com que haja movimento do motor que por sua vez irá mover o gerador, produzindo desta forma energia elétrica. Na figura 3-4 é apresentado um sistema PTO hidráulico que utiliza cilindros de dupla ação (Wang et al., 2018).

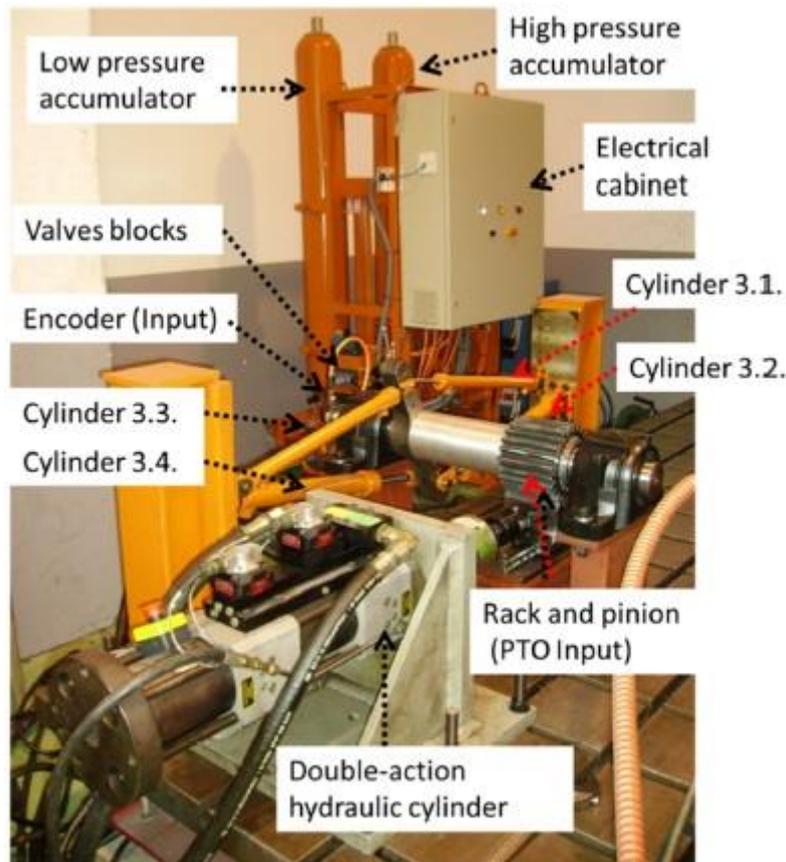


Figura 3-4: PTO hidráulico (Antolín-urbaneja et al., 2015).

O sistema de turbina também é bastante utilizado em CEO, e neste caso podem ser usadas turbinas movidas a água ou a ar comprimido. Contudo as turbinas de ar comprimido são as mais utilizadas para conversão de energia das ondas em energia elétrica (Wang et al., 2018). Por exemplo, o CEO *Bombora* usa turbinas a ar comprimido para que seja possível mover o gerador e assim ocorrer produção de energia elétrica. Este sistema irá ser apresentado detalhadamente num capítulo mais à frente.

O outro tipo de PTO, é o PTO completamente elétrico. Neste caso, o gerador é conectado diretamente ao sistema de absorção da energia das ondas. Uma das tecnologias usadas é um gerador de ímãs permanentes, que evita formas complexas de transmissão de energia, o que por sua vez se traduz num aumento de eficiência.

Neste sistema, o movimento relativo entre o dispositivo de absorção e o estator do gerador permite a produção de energia elétrica (Wang et al., 2018).

3.2 CONVERSORES ELÉTRICOS

Os conversores elétricos não foram estudados nos primeiros trabalhos desenvolvidos na temática da energia das ondas, nem em modelos matemáticos ou protótipos. Nos primórdios do desenvolvimento da energia das ondas, os CEO eram conectados diretamente a resistências elétricas independentes, que não tinham qualquer tipo de requisito mínimo acerca da corrente elétrica ou da tensão. Contudo, com a necessidade cada vez mais emergente de conectar os CEO à rede elétrica, passaram a ser usados mais frequentemente. Isto porque os CEO precisam dos conversores elétricos de potência, para poder ter uma boa interface com a rede elétrica e poder cumprir com os requisitos mínimos de qualidade da energia (Wang, et al., 2018).

Os *switches* (contatores) são os mecanismos que determinam o estado de funcionamento do conversor elétrico. Deste modo, existem três tipos de contatores:

- Contatores não controlados: por exemplo um diodo, não tem nenhuma forma de controlo interno. A forma como é controlado é através de corrente ou tensão externa ao circuito ao qual o contator está ligado;
- Contatores semi-controlados;
- Contatores controlados: por exemplo IGBT's (usados nas eólicas). Os contatores controlados desta forma podem ser ligados ou desligados por um sinal enviado através do software do conversor elétrico de potência.

A seguir, no Quadro 3 1, é apresentada uma lista dos conversores elétricos de potência, usados normalmente (Wang, et al., 2018):

Quadro 3-1: Alguns tipos de conversores elétricos (Wang, et al., 2018).

Conversor	Especificação
DC/AC	Inversor
DC/DC	Regulador de Comutação
AC/DC	Retificador
AC/DC/AC	Conversor <i>Back-to-Back</i>
AC/AC	Conversores cíclicos

Normalmente, as principais funções dos conversores elétricos nos sistemas de conversão de energia das ondas, são:

- Converter energia elétrica entre AC e DC;
- Aumentar a energia transmitida pelos CEO;
- Controlar a qualidade da energia elétrica produzida, de modo a que corresponda aos requisitos mínimos para ser injetada na rede elétrica.

3.3 DESAFIOS

Como tem sido descrito, a energia das ondas traz muita esperança no que diz respeito a novas formas de produção de energia elétrica. Contudo, tal como a energia eólica, solar e hídrica, a energia das ondas apresenta muitos desafios e dificuldades associados. Estes desafios têm de ser superados da melhor forma possível de modo a que se possa implementar os CEO. Neste capítulo, para além de serem apresentados os desafios inerentes à energia das ondas, também será descrita a forma como se podem ultrapassar essas mesmas dificuldades (Ilyas et al., 2014).

Em primeiro lugar está a produção de uma frequência baixa e intermitente, cerca de 0,1 Hz, mas com um grande poder de saída. Deste modo o gerador tem de ser capaz de produzir energia que cumpra os parâmetros exigidos pela rede elétrica. Em segundo lugar, estão as condições específicas no caso de *offshore*, onde é muito complicado prever a direção predominante da onda, tornando a sua captura muito difícil. Além disso, como mencionado anteriormente, o CEO tem de ser capaz de operar em condições normais, mas também de sobreviver em estados de tempo adversos como tempestades extremas. Este ponto faz com que haja grandes desafios para a engenharia de modo a que seja possível projetar um sistema que seja ao mesmo tempo robusto e eficiente. Não esquecendo ainda que os CEO têm de ter uma elevada resistência ao ambiente corrosivo criado pela água do mar (Drew et al., 2009).

Comparando mais uma vez este tipo de energia aos outros, ditos mais comuns, como a energia do vento e solar, temos o problema da manutenção. A manutenção torna-se dispendiosa, arriscada e demora muito tempo. Pontos estes que podem ser atenuados fazendo inspeções a cada 6 meses ao contrário das inspeções anuais que normalmente são feitas. Os dispositivos *onshore* têm um acesso mais fácil embora estejam mais suscetíveis aos danos provocados pelas ondas e erosão. O impacto visual é muito mais significativo nestes sistemas do que nos sistemas *offshore*, além disso o potencial energético é superior nestes sistemas. Os dispositivos *offshore* submersos têm ainda menos acesso para manutenção, e são os sistemas que são mais suscetíveis à erosão e

a fenómenos extremos. Em alternativa tem-se a construção de dispositivos *near-shore*, que operam em águas relativamente pouco profundas e podem ser colocados no fundo do mar, através de bases sólidas. Mas estes sistemas têm um potencial energético disponível muito inferior aos dispositivos *offshore* de águas profundas (Ilyas et al., 2014). Embora, como já foi referido noutra capítulo, o potencial energético das ondas mais elevado encontra-se entre a superfície da onda e um quarto abaixo da superfície.

Muitos dos estudos têm sido desenvolvidos para perceber qual a melhor maneira de converter a energia das ondas em eletricidade. E este tema revela-se um enorme conjunto de desafios (Drew et al., 2009).

3.3.1 CONVERSÃO DA ENERGIA DAS ONDAS EM ELETRICIDADE

O principal desafio reside na forma como o CEO deve acionar o gerador. Tal como tem sido aplicado nas turbinas eólicas, o gerador mais eficiente no caso de um recurso inconstante é o gerador de indução duplamente alimentado (DFIG). Como é normal em todos os sistemas de movimento, o *start/stop* é uma parte fundamental do sistema. Forças extremas, que resultam diretamente de oscilações extremas, podem resultar em grandes estragos no CEO. Para os diminuir é recomendado o uso de absorvedores de energia, contudo este ponto acarreta um custo adicional (Drew et al., 2009).

Na construção de um CEO, a água do mar constitui um ambiente seguro e fluido para o normal funcionamento do gerador. Contudo existem muitos constituintes imprevisíveis e partículas abrasivas que podem danificar o gerador.

A escolha do fluido é por si só um problema. O uso de ar como fluido de transferência de movimento permite que ondas de fraco movimento possam ser convertidas num elevado fluxo de ar. Em alternativa, podem-se usar um sistema hidráulico para termos a mesma eficiência na conversão de ondas mais fracas, especialmente no caso de CEO que requeem uma dimensão menor e menos peso. Ondas exercem grandes forças a baixas velocidades, e os sistemas hidráulicos são suscetíveis de absorver energia nessas situações. Na fig.3-5 é apresentado um circuito hidráulico *power take-off* (PTO) para um conversor de energia das ondas. Porém, a contenção do fluido hidráulico é a principal preocupação no que diz respeito a uma operação segura dos sistemas. Por exemplo, no Reino Unido é recomendado o uso de água ou outro fluido ambientalmente aceitável (Ilyas et al., 2014). O CEO *Pelamis* utiliza um fluido biodegradável num ambiente marinho, combinado com camadas duplas de proteção para evitar fugas (Drew et al., 2009).

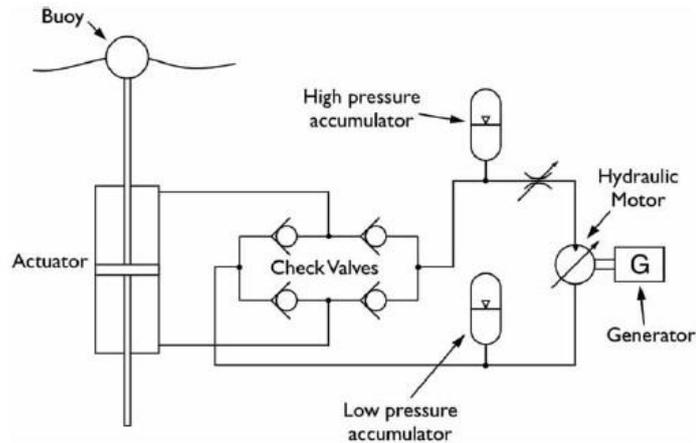


Figura 3-5: Típico circuito hidráulico de um CEO (Drew et al., 2009).

3.3.2 IMPORTÂNCIA DA INVESTIGAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO OCEANO

Para todos os projetos de energia das ondas é fundamental que as estruturas sobrevivam a climas e condições meteorológicas e oceânicas extremos e que operem de uma forma eficaz em condições normais. A potência das ondas pode variar cerca de 50 vezes por segundo, levando a picos de potência absorvidos pelos conversores. Portanto, para além de ser importante que os sistemas resistam às condições extremas do mar é também importante que consigam sobreviver aos picos de potência durante o funcionamento normal. Isto ao mesmo tempo que a tecnologia se torna mais simples, levando a menos manutenções e a que seja possível trabalhar por mais tempo, de modo a que os sistemas se tornem comercialmente interessantes (Ilyas et al., 2014).

3.3.3 COGERAÇÃO: PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COMBINADA COM A PURIFICAÇÃO DE ÁGUA DO MAR

A companhia australiana “Carnegie Wave Energy”, que trabalha na tecnologia de conversão das ondas, está a testar um sistema novo de “Point absorber” submerso chamado CETO WEC, que visa a aplicação de cogeração respetivamente como mostrado nas fig. 3-6 e 3-7(Carnegie Clean Energy 2014).

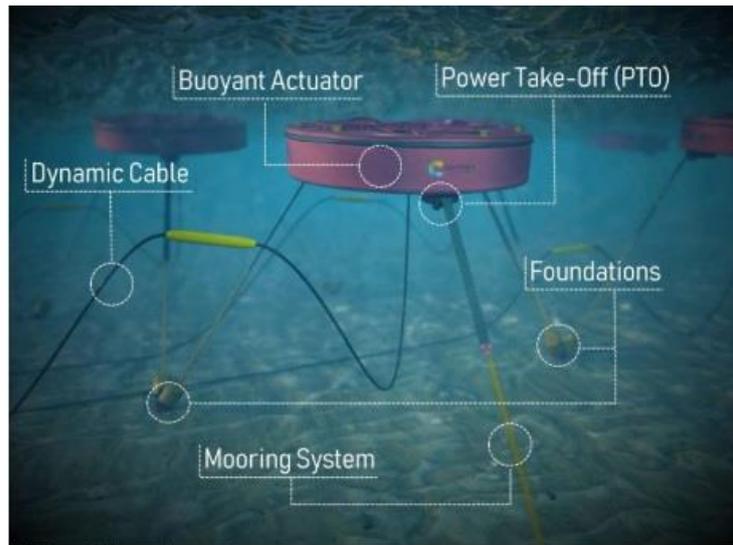


Figura 3-6: Esquema da tecnologia CETO (Carnegie Clean Energy 2014).

Este sistema trabalha enviando água a alta pressão para a costa, que gera energia pelo mesmo princípio usado nas centrais hidroelétricas. Apesar desta empresa já existir há cerca de 10 anos, o sistema continua em estudos e continua a ser atrativo uma vez que, através da cogeração, produz água dessalinizada de uma forma não prejudicial ao ambiente (Ilyas et al., 2014). Este dispositivo usa um CEO completamente submerso, que pode ser classificado como ponto de absorção.

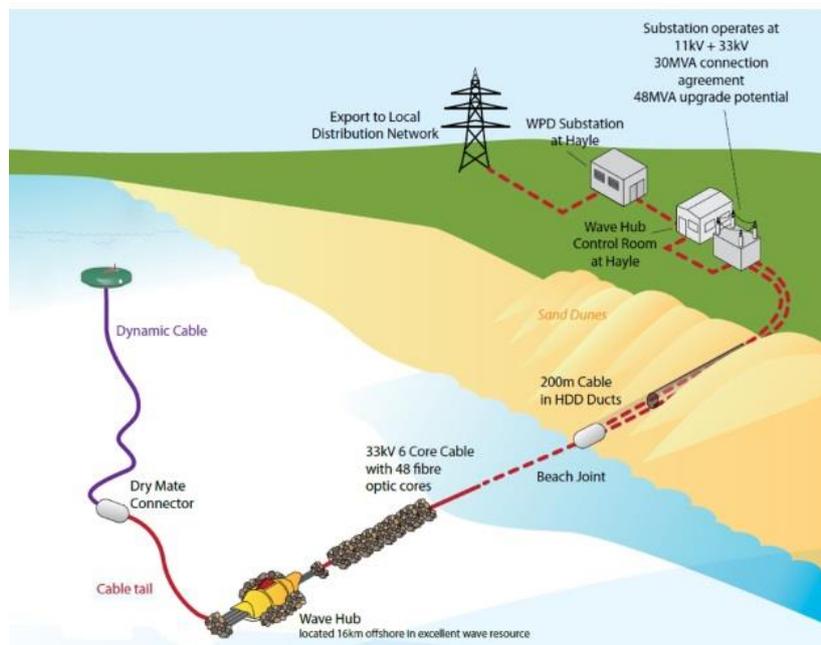


Figura 3-7: Projeto CETO UK (Carnegie Clean Energy 2014).

A tecnologia CETO apresenta inúmeras vantagens, como (Carnegie Clean Energy 2014):

- Sem impacto visual: uma vez que está totalmente submerso;
- Flexível: consegue funcionar em várias profundidades, diferenças de direção da onda e diferentes condições do fundo do mar;
- Sobrevive a tempestades;
- Limpo: impacto ambiental mínimo, coexiste com a vida marinha;
- Dessalinização.

3.3.4 EFICIÊNCIA

Este é o ponto vital no que diz respeito a todos os sistemas de conversão de energia. O uso do acoplamento variável de bombas e motores no caso do sistema PTO representa uma eficiência nominal de 80% no pico de produção. A eficiência diminui diretamente se o gerador trabalhar fora das condições ideais de funcionamento, como por exemplo: fugas e perdas de compressão (Drew et al., 2009).

Apesar de o sistema hidráulico estar muito bem classificado, é de notar que em grande parte do seu tempo de funcionamento não está no pico de produção. Deste modo o sistema deve ter eficiências maiores de carga parcial. Outro ponto a ter em conta é a eficiência da bomba hidráulica, ou seja, é importante desenvolver bombas hidráulicas com perdas de carga baixas e torque elevado. Além disso, as válvulas de retenção usadas para retificar o fluxo e a válvula de estrangulamento para controlar o fluxo têm quedas de pressão associadas às suas ligações, o que leva a uma queda de potência e eficiência (Ilyas et al., 2014).

3.3.5 GERADORES ELÉTRICOS LINEARES

A investigação do tipo de geradores que devem ser usados nos CEO acompanha a pesquisa e o desenvolvimento dos próprios CEO. As conclusões neste ponto apontam para que no momento sejam os geradores lineares a melhor opção.

O conceito básico do gerador linear é um “pistão” (que será o rotor no caso de máquinas com o sistema rotativo) com ímanes permanentes montados com polaridade alternada, diretamente acoplado a uma bóia, com um estator que contém enrolamentos e fixado a uma estrutura sólida. À medida que a bóia oscila, é induzida uma corrente elétrica no estator. Na fig. 3-8 é apresentado um esquema deste sistema.

A necessidade de conversores de energia das ondas com baixa manutenção implica o uso de conversores com escovas. Que, como consequência, afasta o uso de máquinas de indução (máquinas essas já usadas em eólicas, devido à sua capacidade de adaptação a variações de velocidade), mas que requerem um grande número de polos e são muito grandes.

Deste modo o foco é o uso de máquinas de ímãs permanentes. Para isso contribuiu o desenvolvimento de ímãs permanentes de alta densidade, como Neodímio-Ferro-Boro (Nd-Fe-B), que pode produzir grandes forças magnéticas mesmo tendo um tamanho reduzido.

Existem três tipos principais de geradores lineares como opção (Drew et al., 2009):

- Geradores de ímãs de curso longitudinal;
- Geradores de ímã permanente de relutância variável;
- Geradores de ímãs permanentes tubulares, com o núcleo de ar.

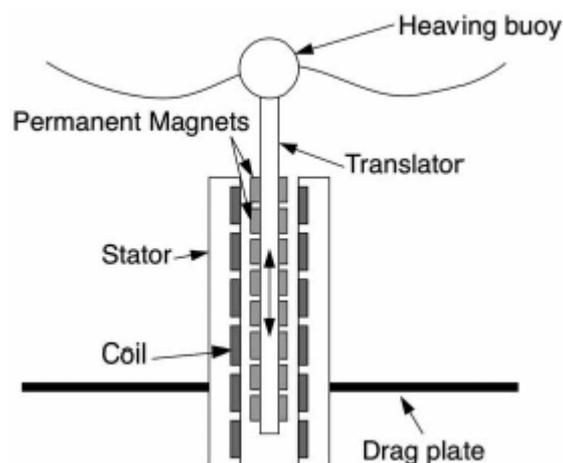


Figura 3-8: Esquema de um gerador elétrico baseado num gerador de ímãs permanentes (Drew et al., 2009).

3.3.6 DENSIDADE DE POTÊNCIA

A densidade de potência representa a energia disponível por unidade de volume. Se existirem fontes de energia intermitentes, a densidade de potência também vai variar. Na fig. 3-9 é apresentada a comparação entre uma fonte de energia não intermitente e intermitente.

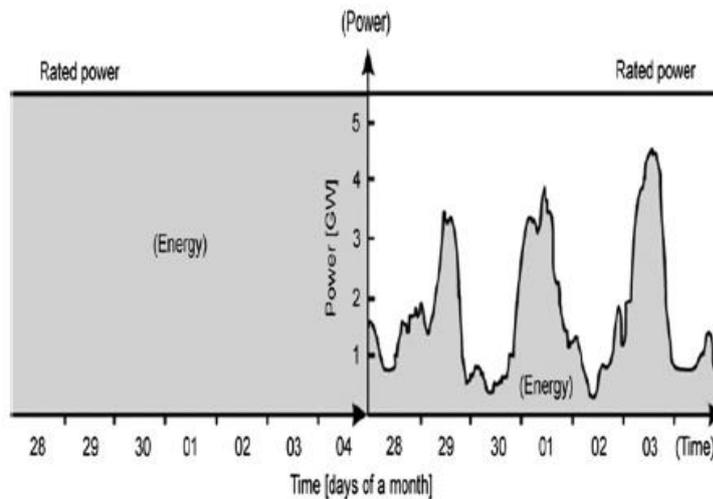


Figura 3-9: Comparação entre a energia disponível, entre um recurso de energia contínuo e intermitente (Skoglund et al., 2010).

Para além da variabilidade da fonte de energia, a densidade de potência também pode variar com o tempo e com os obstáculos que enfrenta (Skoglund et al., 2010). Por exemplo no caso da energia eólica, existem períodos em que se verifica uma grande quantidade de energia disponível e outros em que simplesmente não há produção de energia porque não há vento ou então os ventos são demasiado fortes, por exemplo devido à ocorrência de tempestades. A densidade de potência combinada com o tempo durante o qual temos o sistema a funcionar, é uma boa forma de projetar a quantidade de energia produzida através de uma fonte de energia renovável (Ilyas et al., 2014).

3.3.7 CUSTOS E CONSIDERAÇÕES ECONÓMICAS

Atualmente, para que haja uma tecnologia atrativa nos mercados cada vez mais competitivos, ela tem de ser ao mesmo tempo eficiente e rentável. A definição de uma fonte de energia renovável competitiva traduz-se numa fonte de energia que seja barata, fácil de instalar e sustentável, mas ao mesmo tempo que tenha períodos de retorno do investimento baixos. Isto é muito importante quando se trata de escolher tipos de tecnologias e fontes de energia. Por exemplo, no caso da eólica o retorno financeiro do investimento é um dos fatores mais importantes quando se projeta um parque eólico. Em relação à energia das ondas é particularmente importante, devido às condições em que o sistema vai funcionar, como as condições meteorológicas e de estado do mar adversas e os picos de potência a que os CEO estão sujeitos (Ilyas et al., 2014).

3.4 CONSIDERAÇÕES AMBIENTAIS

A procura de formas sustentáveis de energia é guiada por uma determinação em encontrar métodos sustentáveis de produção de energia, pelo menos em aspetos ambientais. Deste modo é necessário que exista um olhar atento sobre os impactos ambientais relacionados com a exploração dos recursos de energia renovável. De modo a que os dispositivos não afetem a fauna e flora existentes, e que se adaptem às condições do local onde serão instalados (Ilyas et al., 2014). Este último ponto gera muita controvérsia, analogamente ao caso da energia eólica, uma vez que as zonas envolventes aos parques eólicos sofrem muitas mudanças, o que nem sempre é visto como um ponto agradável pelas populações.

3.4.1 *IMPACTOS DOS CEO NO AMBIENTE ENVOLVENTE E ECOSISTEMAS*

Todos os dispositivos de conversão de energia, sejam das ondas, solares ou eólicos, têm sempre impactes ambientais inerentes à sua construção e normal funcionamento. Contudo, se pensando nos conversores de energia das ondas de uma outra forma, pode-se concluir que têm impactos positivos, como por exemplo ajudar a reduzir a erosão da linha de costa, uma vez que a energia das ondas é absorvida pelos conversores. No caso do impacto na vida marinha já é mais complicado de prever, porque também depende muito da zona onde o sistema vai ser implementado. Por exemplo, os CEO podem-se tornar novos habitats sustentando recifes artificiais. Contudo a deposição dos conversores em locais *offshore* introduzem estruturas artificiais na topografia do oceano, o que pode afetar os habitats junto do fundo do oceano (Langhamer, 2010).

3.4.2 *FLUÍDOS HIDRÁULICOS*

Como já foi abordado neste trabalho, o conversor *Pelamis*, por exemplo, usa um fluido biodegradável, uma vez que o tipo de gerador usado neste sistema tem um elevado risco ambiental em caso de fugas. Para além do fluido biodegradável, são usadas camadas duplas de proteção de modo a evitar fugas de fluido. Para além destas medidas, é importante que todos os conversores de energia das ondas tenham um sistema ativo de monitorização da quantidade de fluido e da ocorrência de fugas (Ilyas et al., 2014).

3.5 SISTEMAS EM ESTUDO

O compromisso entre o desempenho de um CEO, o custo e a durabilidade é sem dúvida um ponto fulcral e delicado uma vez que os conversores devem ser eficientes na conversão da energia das ondas, mas devem também resistir aos fenómenos extremos (Algie et al., 2017).

Têm sido feitos esforços nas últimas décadas para desenvolver um CEO comercialmente fiável e viável. Foram apresentados vários modelos de conversores, cuja capacidade de conversão foi testada, mas até ao momento não existe um produto comercial de sucesso. Como foi discutido numa palestra sobre Energia Renovável dos Oceanos, na Austrália, em 2016, o principal fator para que muitos protótipos dos CEO sejam abandonados, reside na falha de segurança e não na falta de desempenho. Deste modo, o desafio para os investigadores está em desenvolver um CEO menos vulnerável, mas mantendo o bom nível de desempenho (Emerging et al., 2018). O grupo *Bombora* focou-se em projetar um CEO com bom desempenho em zonas *near-shore* e capaz de resistir a fenómenos de ondas extremas. Este sistema irá ser apresentado neste capítulo, com base na análise e discussão de um projeto elaborado para descrever o seu princípio de funcionamento e prever qual seria a produção deste sistema caso fosse implementado ao largo da costa de Peniche.

3.5.1 FUNDAMENTOS DO SISTEMA *mWAVE*

O projeto *Bombora* desenvolveu um CEO submerso, pneumático, com membranas flexíveis que funcionam com diferenças de pressão, denominado de *mWave*. Este sistema, como se mostra na fig.3-10, é composto por várias membranas celulares cheias de ar montadas no fundo do mar. Essas membranas convertem a pressão hidrodinâmica das ondas em pressão interna do ar, aplicando desta forma as forças de *Froude-Krylov*. Como exemplificado na fig.3-11, este sistema consiste num circuito fechado onde as primeiras células recebem a energia proveniente das ondas, o que faz com que a sua pressão suba e desse modo fornecem ar a alta pressão ao circuito do sistema, por meio de um conjunto de válvulas antirretorno. Esse ar a alta pressão flui através de uma turbina e retorna às células de baixa pressão, dando assim início a um novo ciclo (Algie et al., 2017). É de ter em conta que ambos os circuitos são compostos por válvulas antirretorno.

O *mWave* apresenta-se como um dispositivo adequado para instalações perto da costa, uma vez que é um sistema que tem de ficar submerso, mas a uma profundidade entre os 8 e os 15m. Contudo pode ser utilizado em locais mais afastados da costa, desde que sejam encontradas soluções de fixação ao fundo do oceano. Esta profundidade

ideal, também tem a ver com o facto a energia das ondas ser inferior à medida que aumenta a profundidade, e com o facto de ter que existir uma profundidade mínima de modo a evitar a exposição dos conversores a cargas energéticas muito elevadas (Algie et al., 2017).

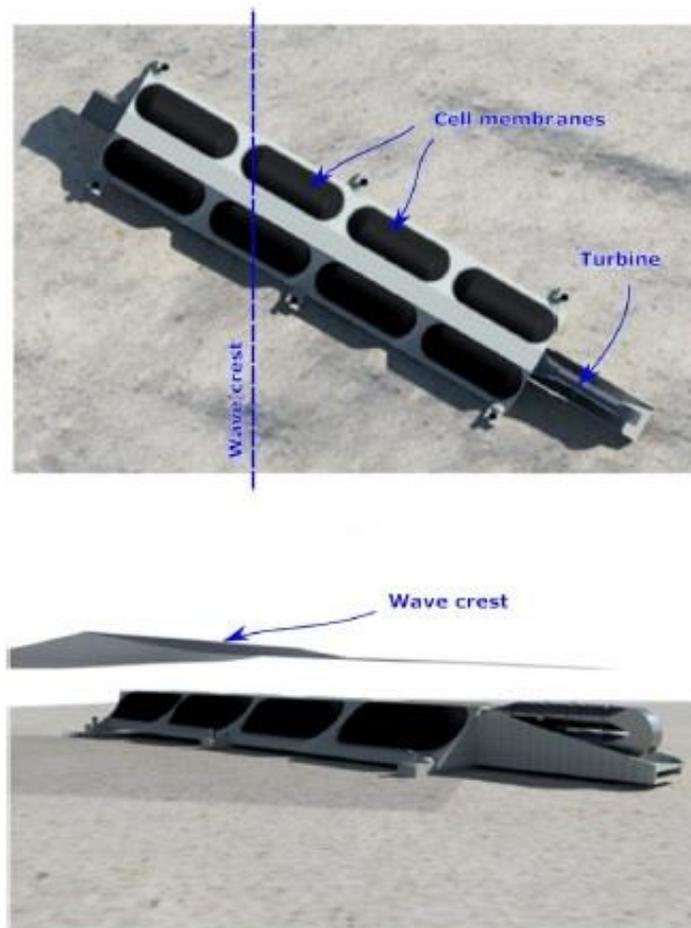


Figura 3-10: Esquema em *Autocad* do protótipo *mWave* (Algie et al., 2017).

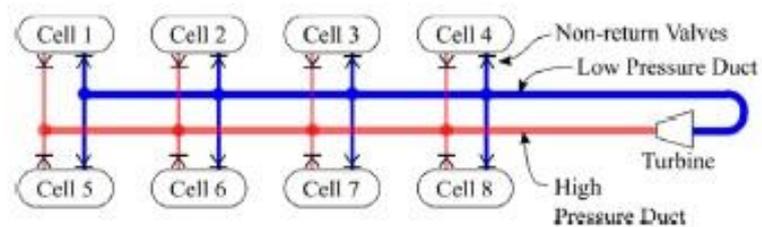


Figura 3-11: Esquema de funcionamento do protótipo *mWave* (Algie et al., 2017).

O sistema *mWave*, usa um método para sobreviver aos fenômenos de ondas extemos, através da decomposição incremental dos movimentos das membranas. Isto acontece devido à remoção progressiva do ar dentro das membranas, à medida que as ondas começam a aumentar de intensidade. A remoção de ar faz com que haja uma diminuição da energia absorvida pelas membranas em condições extremas, permitindo que continue a ser possível que o sistema consiga aproveitar alguma energia. Esta forma de proteção é preferível a ter-se um modo que apenas corta a produção do sistema – como por exemplo, no caso da energia eólica. Estes sistemas têm uma velocidade limite de funcionamento que após ser atingida, pura e simplesmente deixa de produzir e fica em modo de segurança (Algie et al., 2017); o que para além de não produzir qualquer tipo de energia, ainda consome energia da rede para alimentar o modo de segurança.

3.5.2 MODELO NUMÉRICO DE DESEMPENHO

A principal ferramenta numérica para modelar o desempenho do *mWave* foi desenvolvida em MATLAB, e consiste num modelo linear de desempenho. Contudo o desempenho do sistema físico do *mWave* é modelado em três componentes principais:

1. Hidrodinâmica (parte externa da membrana);
2. Deformação da membrana;
3. Termodinâmica (parte interna da membrana).

Os modelos hidrodinâmicos e termodinâmicos são usados no modelo de desempenho, através do movimento das membranas. Portanto, para uma determinada membrana temos:

$$F_w + F_i + F_k = M_w^\infty \mathcal{V} \quad (1)$$

onde F_w representa a força total hidrodinâmica na membrana devido às ondas incidentes juntamente com as ondas criadas pelas outras membranas celulares, F_i é a força que a pressão de ar exerce dentro da célula e F_k é a força necessária para representar a rigidez hidrostática não linear da deflexão da membrana. Na segunda parte da equação temos M_w^∞ que representa o coeficiente de massa da água adicionando à membrana e \mathcal{V} representa a aceleração da membrana. Contudo a massa da própria membrana foi desprezada.

3.5.3 SIMULAÇÃO

Para o projeto do protótipo *mWave*, apresentado neste capítulo, foram considerados os parâmetros desenvolvidos para um estudo recente para aplicação de um destes sistemas na costa de Peniche, Portugal (Algie et al., 2017). Parâmetros esses que são descritos nas fig. 3-12 e 3-13, contudo os parâmetros descritos neste projeto apresentam um modelo simplificado do *mWave*.

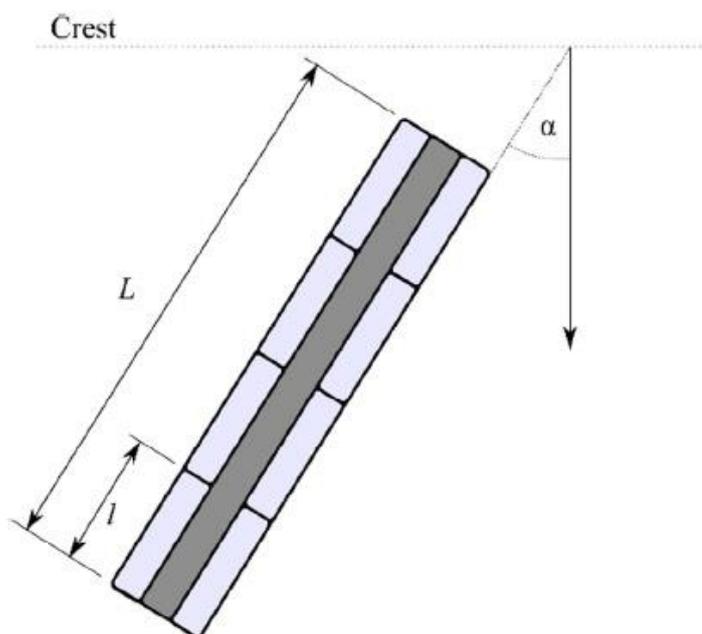


Figura 3-12: Esquema do *mWave* com comprimento total (L), o comprimento da célula (l) e a orientação em relação à crista da onda incidente (α) (Algie et al., 2017).

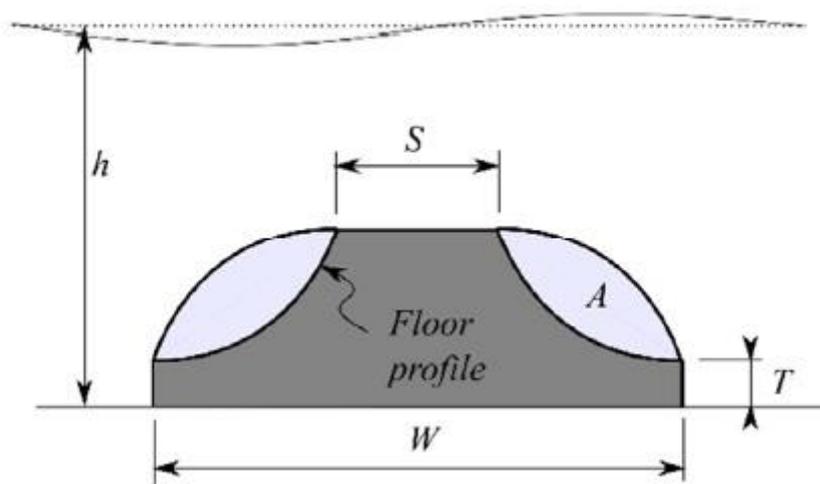


Figura 3-13: Vista transversal do sistema *mWave*, onde S corresponde à separação da membrana, A a área da membrana, T o perfil da estrutura de apoio, e W a largura do sistema (Algie et al., 2017).

3.5.4 EFEITO DA INFLAÇÃO DA MEMBRANA

Foi construído um protótipo à escala 1:15 para demonstrar o sistema de controlo incremental da membrana, onde existe a dissipação incremental do ar dentro das membranas, em condições de ondas extremas. Para isso foi medida a potência do sistema com uma variação da inflação da membrana entre 0 e 100%. Como era espectável, com uma inflação de 0% em cada membrana, não existe volume de célula disponível para que ocorra o aproveitamento da energia das ondas. Por outro lado, com 100% de inflação, todas as membranas estão totalmente insufladas, onde só existe fluxo de ar devido à pressão exercida na membrana pelas ondas (Algie et al., 2017).

Na figura 3-14 é possível ver que a captura de energia é máxima quando as membranas estão com cerca de 50% de inflação. Para esta simulação foram usados dados da altura da onda, período e profundidade do oceano. Os resultados deste estudo indicam que existe uma relação favorável entre a inflação da membrana e a quantidade de energia que é absorvida. Contudo a sensibilidade da captura de energia é relativamente baixa quando a inflação está próxima do ideal, o que mostra que o controlo da inflação durante o funcionamento normal do sistema, não necessita de ser muito preciso. Por outro lado, a sensibilidade da membrana é alta quando os níveis de insuflação são baixos (Algie et al., 2017).

Como já foi referido neste capítulo, à medida que as ondas vão aumentando de tal forma que passem para além dos limites normais de funcionamento, a energia absorvida pelas membranas também é reduzida por via da deflação progressiva. Isto permite que o *mWave* continue a funcionar, mesmo que limitado, num cenário de ondas extremas – enquanto muitos outros sistemas de conversão de energia das ondas têm de ser desligados.

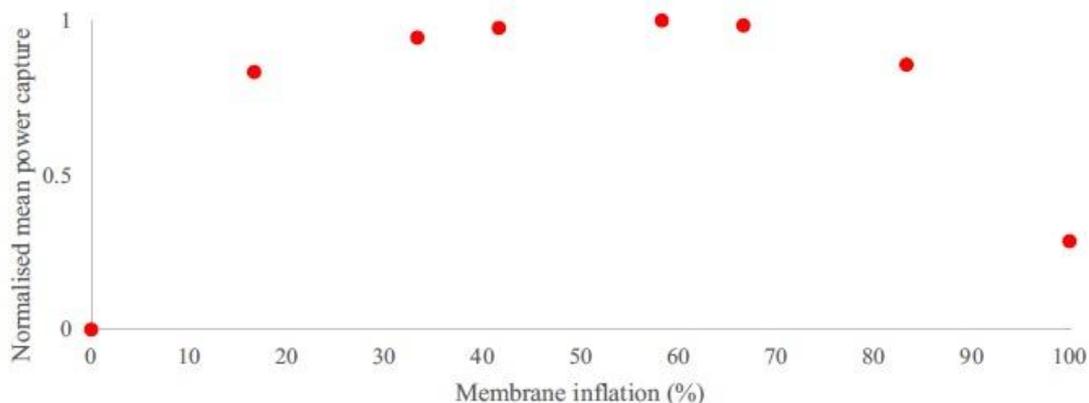


Figura 3-14: Captura de energia das ondas em função da inflação das membranas (Algie et al., 2017).

3.5.5 MATRIZ DE POTÊNCIA DO SISTEMA BOMBORA

Neste ponto é apresentada a matriz de potência do sistema de conversão de energia das ondas. Desta forma é possível ter uma ideia da quantidade de energia que seria produzida, caso instalássemos este sistema em qualquer local. Esta matriz apresenta os valores de potência capturada pelo sistema, tendo em conta a altura da onda e o período da onda.

Power capture (kW)

6.50				1520	1528	1674	1593	1512	1344	1330	1189	1076	1038
6.00				1343	1560	1564	1478	1391	1278	1268	1154	1018	939
5.50				1205	1325	1409	1330	1236	1196	1132	1015	936	872
5.00				1070	1145	1259	1229	1134	1119	1000	947	877	833
4.50			695	956	1049	1062	1084	1009	969	910	824	776	703
4.00			608	817	879	939	918	878	849	782	735	680	628
3.50		294	509	686	770	808	767	773	696	661	633	591	542
3.00		232	412	534	625	636	638	601	565	557	532	463	451
2.50	51	165	299	418	466	508	488	493	464	440	419	382	362
2.00	33	108	201	290	337	369	360	351	352	331	320	296	275
1.50	19	61	116	167	204	227	239	235	230	219	206	200	177
1.00	8	28	52	74	94	109	118	118	119	117	110	111	103
0.50	2	7	13	19	23	27	30	32	33	34	33	33	32
	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0

Wave period (secs)

Figura 3-15: Matriz de potência de energia das ondas do sistema *Bombora* (Algie et al., 2017).

A matriz de potência de um CEO permite aplicar de uma forma geral o CEO em qualquer zona. Deste modo, por exemplo, para um ponto qualquer que tenha uma altura média de onda de 3,0 m e um período de 11,0 s, o um potencial energético capturado é de 601 kW. Com estes dados é relativamente fácil perceber qual o potencial aproximado passível de ser capturado pelo CEO em qualquer local.

4 DADOS E METODOLOGIA

Neste capítulo é descrita a região de estudo, os dados utilizados e a metodologia adotada para o cálculo do potencial energético das ondas.

4.1 ÁREA DE ESTUDO E DADOS DAS CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS

A área de estudo consiste no Atlântico Nordeste tendo em conta a costa próxima de Portugal e os arquipélagos dos Açores e da Madeira, como ilustrado na fig.4-1. Foram escolhidos cinco pontos ao longo da costa continental de Portugal e um em cada arquipélago, de forma a apresentar uma melhor perceção do potencial energético disponível ao longo da costa portuguesa continental e das ilhas.



Figura 4-1: Espaço geográfico da área em estudo, localizado no Atlântico Norte.

As reanálises *ERA-Interim* disponibilizam dados com uma resolução de 80km (ECMWF 2020) o que impossibilita a escolha de locais muito próximos da costa. Desta forma, na seleção dos pontos escolhidos para este estudo foi tida em conta a resolução dos dados, e que ao mesmo tempo não fossem selecionados pontos demasiado afastados da costa, que impossibilitassem a futura instalação de CEO nestes locais.

O clima moderado da região europeia é controlado pela circulação oceânica junto à costa portuguesa, estando sujeito à influência das massas de ar provenientes da zona dos Açores. De uma forma geral, a circulação oceânica é dominada pela corrente de

Portugal e as águas frias profundas podem ser frequentemente observadas perto da costa (Rusu e Onea, 2016).

A área em estudo inclui pontos de água profunda (Quadro 4-1), uma vez que tendo em conta a batimetria da costa portuguesa, e comparando com a tabela 6 do artigo de Silva e co-autores, por exemplo para o ponto B, temos aproximadamente 64 m de profundidade (Silva et al., 2018). Deste modo os dados usados no cálculo do potencial energético no Atlântico Norte são provenientes do Centro Europeu de Previsão Meteorológica de Médio Prazo (ECMWF) e foram processados para um intervalo de 17 anos, entre os anos 2000 e 2016. Estes dados de características das ondas de reanálises ERA-Interim são validados fazendo comparações com dados provenientes de medições de altímetros e/ou dados provenientes de plataformas, navios de pesquisa ou boias (Bidlot e Janssen, 2007).

Quadro 4-1: Descrição dos pontos de referência considerados.

Pontos	Latitude (°)	Longitude (°)	Distância à costa (km)
Ponto A	41,25 N	351,0 E	44,57
Ponto B	39,0 N	350,25 E	46,14
Ponto C	38,25 N	350,25 E	18,68
Ponto D	36,75 N	351,0 E	29,08
Ponto E	38,25 N	332,25 E	25,65
Ponto F	33,0 N	343,50 E	27,53
Ponto G	38,25 N	351,0 E	9,43

Tendo em conta o período de 17 anos, e um intervalo de tempo de 6-h foram processados os parâmetros relativos ao período da onda (T), à altura significativa da onda (H_s) e à direção média da onda (Dir). A seguir é apresentada a fórmula de cálculo relativa ao período da onda, utilizada com base nos dados do modelo usado nas reanálises do *ERA-Interim* (Rusu e Onea, 2016).

4.2 CÁLCULO DO POTENCIAL DE ENERGIA DAS ONDAS

Nesta secção é estudada a forma como se torna possível calcular o potencial de energia das ondas, bem como as fórmulas e métodos que permitem avaliar este recurso. Assim sendo, a velocidade das ondas que depende essencialmente do comprimento de onda e da profundidade do oceano, é expressa através da seguinte relação de dispersão:

$$v = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(2\pi \frac{h}{\lambda}\right)}, \quad (1)$$

onde λ representa o comprimento de onda, g é a aceleração gravítica, e h é a profundidade do oceano (Wang et al., 2018).

Como já foi referido anteriormente cerca de 95% da energia das ondas está disponível entre a superfície e uma profundidade igual a um quarto do comprimento de onda para águas profundas, e isto é expresso por:

$$E = \frac{1}{\lambda} \int_0^\lambda \int_0^1 \frac{1}{2} g \rho \eta^2 dx dy + \frac{1}{\lambda} \int_0^\lambda \int_0^1 \int_{-\infty}^0 \frac{1}{2} (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) dx dy dz \quad (2)$$

onde, ρ é a densidade da água do oceano, η é elevação da onda, e v_x, v_y, v_z são as velocidades nas direções x, y e z respetivamente. E ainda que o primeiro termo da equação corresponde à energia potencial e o segundo termo corresponde à energia cinética (Ilyas et al., 2014).

Uma forma de prever o comportamento das ondas é através do uso de espectros, como por exemplo o espectro de *Pierson-Moskowitz*, que é expresso por:

$$S(w) = \frac{5}{16} H_s^2 \frac{w_0^2}{w^5} e^{-\frac{5}{4}(w_0/w)^4} \quad (3)$$

onde, w é a frequência angular em radianos por segundo, w_0 é a frequência modal de qualquer onda, e H_s é a altura significativa da onda. A energia por unidade de área da superfície do oceano para uma média irregular, é expressa por:

$$E = 2\rho g \int_0^\infty S(f) df \quad (4)$$

onde f é a frequência em hertz (Falnes 2007).

Por outro lado, a densidade de potência da onda P é a velocidade à qual a energia da onda por unidade de comprimento da crista de onda é transmitida ao longo da coluna de água na direção da propagação da onda (Mota e Pinto, 2014). Após a aproximação em águas profundas (Su et al., 2018), resulta:

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_{m0}^2 T_{m-1,0} \quad (5)$$

onde ρ é a densidade da água do mar, g é a aceleração devido à gravidade, H_{m0}^2 , significa a altura significativa da onda e $T_{m-1,0}$ representa o período da onda. Deste modo a altura significativa da onda dada por,

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \quad (7)$$

O período da onda,

$$T_{m-1,0} = \frac{m_{-1}}{m_0}, \quad m_q = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \sigma^q E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (8)$$

Na fórmula anterior E representa a densidade de energia, σ a frequência, θ a direção da onda e m_q , onde q é a ordem do momento do espectro (Rusu e Onea, 2015). O pico de período é dado pela equação,

$$T_p = 1/f_p \quad (9)$$

Onde f_p é o pico de frequência (que corresponde ao espectro de densidade de energia máxima) (Mørk, et. all, 2010). Ao longo deste estudo o parâmetro $T_{m-1,0}$ passará a ser designado por T_e (Mota e Pinto 2014).

Relativamente à equação 5, assumindo que ρ é igual a 1025 kg/m^3 , esta mesma equação torna-se (Su et al., 2018),

$$P = 0,49H_{m0}^2 T_{m-1,0} \quad (10)$$

Após análise destas fórmulas, procedeu-se à sua aplicação com base numa simulação feita em *Matlab*. Para tal foi desenvolvido um código que permitiu calcular o potencial energético das ondas, tendo como variáveis a altura média da onda e o período médio da onda. Desta forma, foi criado um ficheiro em *netcdf* com os dados do potencial energético, com uma amostragem de 6 horas, nos 17 anos (de 2000 a 2016) e para a região em estudo com uma resolução de $0,75^\circ$ de latitude e longitude.

4.3 ANÁLISE TEMPORAL E ESPACIAL DO POTENCIAL DE ENERGIA DAS ONDAS

Após o cálculo do potencial energético, o ficheiro foi manipulado com base no software *CDOS* (Luis Kornbluh, Ralf Mueller 2020), software esse que consiste em funções executáveis por operadores de linha de comando e que permitem manipular e analisar grandes bases de dados provenientes de modelos de clima, e de forma a que se torna mais fácil a análise temporal e espacial, neste caso, do potencial energético das ondas, bem como da altura e do período das ondas.

Primeiramente, foi usado o comando “*yearmean*” na linha de comandos, que permitiu obter um ficheiro *netcdf*, com as médias anuais referentes aos 17 anos em análise. Desta forma foi possível perceber a forma como o potencial energético varia ao longo dos anos, tendo também em conta a sua variação relativamente a cada local em análise. Para que ficasse um estudo mais completo, para além da análise anual do potencial energético foi também feito um estudo médio anual em relação ao período e à altura significativa da onda.

À semelhança dos cálculos efetuados anualmente, foram efetuados cálculos sazonais através da aplicação na linha de comandos do comando “*yseasmean*”, que permitiu compilar dados de vários anos, em apenas um ficheiro com quatro saídas referentes nomeadamente à primavera, verão, outono e inverno. Resultando assim num ficheiro correspondente do potencial médio sazonal, durante os 17 anos em estudo. Já com os dados do potencial energético sazonal obtidos, foi feita uma análise temporal e espacial do mesmo. O que permitiu perceber a forma como o potencial energético das ondas varia não só em cada ponto em estudo, mas também a forma como varia ao longo das diferentes estações do ano. No seguimento da análise sazonal, foi calculada também a média sazonal da altura e do período da onda em relação às quatro estações do ano e à forma como variam em relação a cada um dos sete pontos em estudo. Isto para que fosse possível perceber de que forma é que as duas variáveis da onda variam espacial e temporalmente e também a influência que têm no cálculo do potencial energético.

Por fim, e no seguimento dos passos anteriores, foram efetuados cálculos mensais através da aplicação na linha de comandos do comando “*ymonmean*”, que permitiu compilar dados dos 12 meses durante os 17 anos em estudo, em apenas um ficheiro com 12 saídas referentes nomeadamente aos 12 meses do ano. Resultando assim num ficheiro correspondente do potencial médio mensal, durante os 17 anos em estudo. Tal como foi feito para os dois passos anteriores, foi feita também uma análise temporal e espacial do potencial energético mensal médio das ondas, bem como do período e da altura significativa médios da onda.

Os resultados são apresentados maioritariamente sob a forma de gráficos, mas também são apresentadas figuras obtidas através do software *Panoply* que permite manipular todos os ficheiros *netcdf* obtidos nesta dissertação. Este software permite obter (National Aeronautics and Space Administration 2019):

- Matrizes de latitude-longitude, a partir de um grande número de variáveis multidimensionais;
- Combinar duas matrizes georreferenciadas através da sua soma ou calculando a média, num único gráfico;
- Usar vários tipos de escalas numéricas e de cores, ou personalizar a nossa própria escala de cores;

- Sobrepor contornos ou máscaras de continentes sob gráficos de mapas longitudinais;
- Guardar figuras em formatos, GIF, JPEG OU TIFF;
- Exportar animações como vídeo mp4 ou uma coleção de imagens individuais.

Desta forma, para além das figuras apresentadas nesta dissertação, que foram executadas através do software *Panoply*, também todos os valores apresentados nos gráficos e quadros no capítulo 5 referentes a análises anuais, sazonais e mensais foram obtidos através do *Panoply*. Para tal, após abrir os ficheiros *netcdf* e escolher um gráfico georreferenciado, escolheu-se a opção “*Array 1*” que consiste numa tabela com os valores referentes à variável em estudo, dependendo da latitude e longitude do local em questão. Nos casos em que se extraem figuras das variáveis em estudo, abre-se a aba “*Plot*” e define-se a escala numérica e a escala de cores adequadas, bem como o título da figura, o tipo de mapa e os contornos, como é possível ver na figura 8.1 em anexo.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para ser possível avaliar e analisar o potencial energético disponível no Atlântico Norte e nos pontos em análise, bem como a sua variabilidade tanto temporal como espacial, começou-se por estudar a altura e período da onda, anualmente, mensalmente e por fim para as quatro estações do ano. Depois tendo em conta os mesmos períodos de análise, foi avaliado o potencial médio das ondas. Todos estes cálculos, foram efetuados tendo em conta um período de 17 anos (entre 2000 e 2016).

5.1 VARIABILIDADE DA ALTURA MÉDIA DAS ONDAS

Neste ponto é feita uma avaliação da variabilidade altura média das ondas relativamente aos pontos em estudo, bem como uma abordagem ao panorama geral do Atlântico Norte. Para isso é calculada a altura média anual, sazonal e mensal.

5.1.1 MÉDIA ANUAL DA ALTURA DAS ONDAS

A fig.5-1 mostra a forma como a média anual da altura da onda varia ao longo dos 17 anos em análise, dependendo dos pontos escolhidos. Antes de mais, a primeira conclusão que se pode tirar, é que durante os 17 anos em estudo a altura média das ondas esteve compreendida entre 1,0 m e 2,5m. Contudo o ponto B – que corresponde à região do Canhão da Nazaré – é aquele que apresenta maioritariamente valores mais elevados para a altura média das ondas, à exceção dos anos de 2006, onde o ponto E com 2,25m foi o mais alto desse ano. Em 2010 os pontos B, C e E tiveram os mesmos valores médios de cerca de 2,25. E em 2011 o ponto B e C mantiveram o valor médio do ano anterior, enquanto no ponto E – nos Açores – se notou uma ligeira descida.

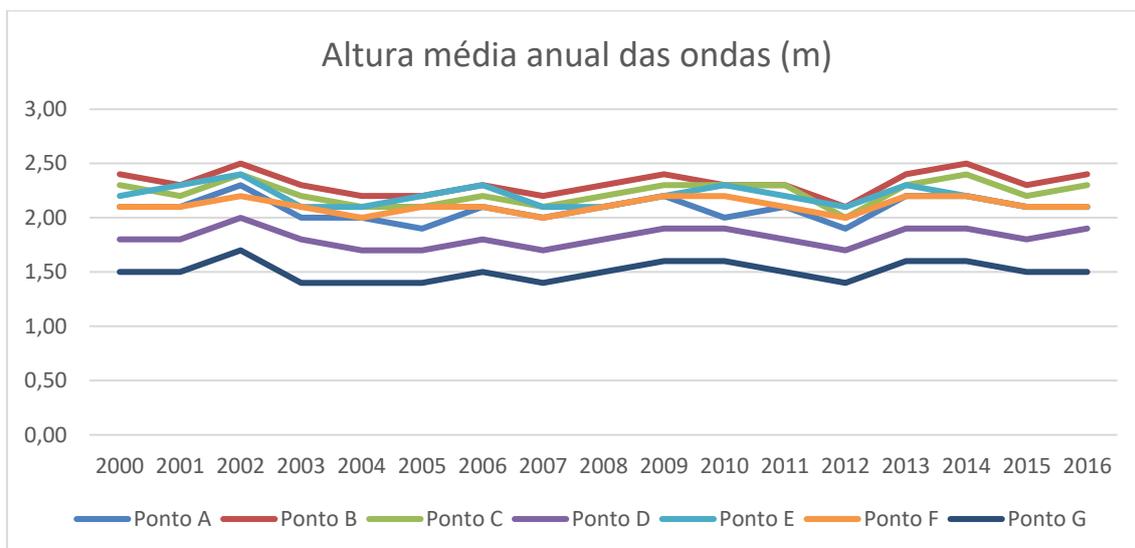


Figura 5-1: Evolução temporal da altura média das ondas, em cada ponto ao longo dos diferentes anos de estudo.

O ponto G, localizado numa região ao largo de Setúbal, que é aquele que ao longo dos 17 anos de estudo regista valores menores para a altura média da onda, tendo uma média total de cerca de 1,51 m é muito semelhante ao registado na Fig. 2 do artigo *“The performance of some state-of-the-art wave energy converters in locations with the worldwide highest wave power”* (Rusu e Onea, 2016), onde para uma localização semelhante são registados valores totais perto dos 1,5 m.

5.1.2 MÉDIA SAZONAL DA ALTURA DAS ONDAS

A fig. 5-2 permite ter uma perceção espacial das características médias das ondas no Atlântico Norte, para além dos pontos escolhidos para o estudo.

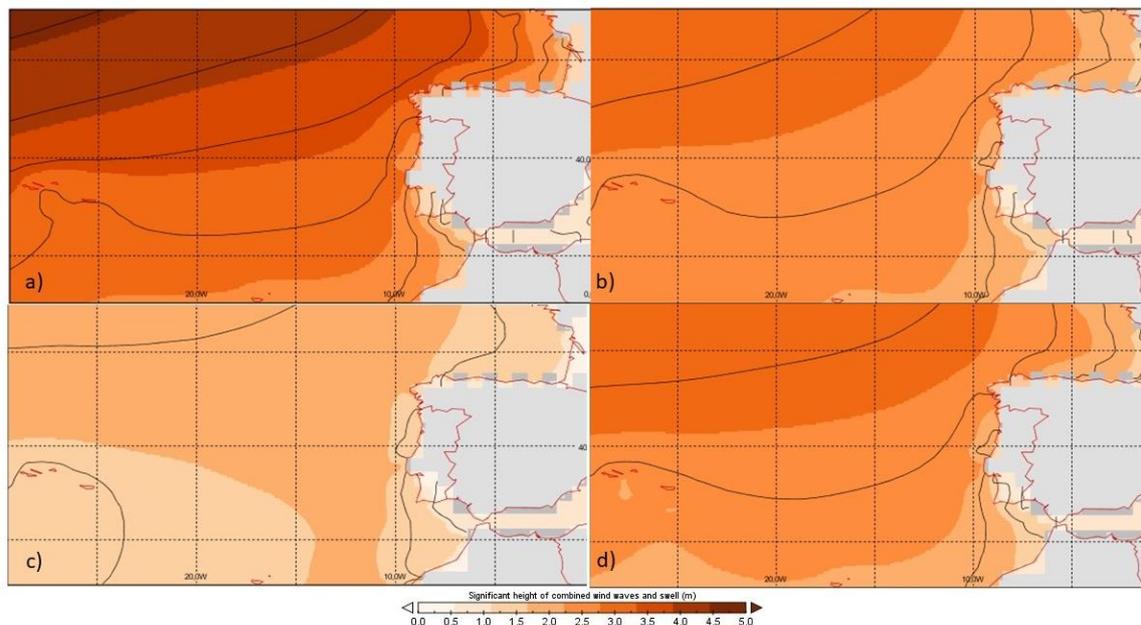


Figura 5-2 Variabilidade espacial da altura média das ondas nas diferentes estações do ano [a] Inverno (DJF), b) Primavera (MAM), c) Verão (JJA) e d) Outono (SON).

Na fig. 5-2 a) referente ao inverno, pode-se observar que a costa portuguesa entre os $37,5^{\circ}\text{N}$ e $42,5^{\circ}\text{N}$ apresenta valores médios da altura da onda compreendidos entre 2,5 e os 3,0 m. Contudo fazendo uma aproximação à costa espanhola entre os $42,5^{\circ}\text{N}$ e 45°N as alturas médias estão compreendidas entre os 3,0 e os 3,5 m. Valores esses que também se podem observar se tendo em conta o que se passa ao largo do arquipélago dos Açores. Na primavera, representada na fig. 5-2 b), nota-se uma ligeira diminuição na altura média das ondas, uma vez que entre os $37,5^{\circ}\text{N}$ e $42,5^{\circ}\text{N}$ registam-se valores médios da altura da onda compreendidos entre 2,0 e os 2,5 m. E no arquipélago dos Açores os valores médios estão entre os 2,5 e os 3,0 m. Na fig. 5-2, c), representa-se o comportamento da altura média das ondas no verão. Como era espectável, neste período a altura média das ondas é bastante inferior ao registado nas outras estações do ano, por exemplo entre os $37,5^{\circ}\text{N}$ e $42,5^{\circ}\text{N}$ os valores de altura média são de 1,25 e o 1,75 m. No sul de Portugal, nesta época do ano, as ondas têm alturas que não ultrapassam um metro de altura. No outono registam-se praticamente os mesmos valores da altura média das ondas obtidos na primavera. À exceção do que se passa no norte de Espanha, onde no outono os valores estão compreendidos entre 3,2 e os 3,75 m, onde na primavera tínhamos valores entre os 2,0 e 2,5 m.

Observando o quadro 5-1, tem-se uma melhor perceção dos valores registados para a altura média da onda em relação às estações do ano. Por exemplo o ponto G, regista valores para o inverno que são iguais aos registados na Fig. 2 do artigo de Rusu e Onea

(2016), onde para uma localização semelhante e para o inverno são registados valores de 2m.

Quadro 5-1:Altura média sazonal das ondas.

Altura média sazonal das ondas (m)				
Pontos	Inverno	Primavera	Verão	Outono
Ponto A	2,70	2,10	1,40	2,10
Ponto B	3,00	2,30	1,70	2,30
Ponto C	2,90	2,20	1,60	2,20
Ponto D	2,40	1,80	1,30	1,80
Ponto E	3,00	2,30	1,40	2,20
Ponto F	2,60	2,20	1,60	2,10
Ponto G	2,00	1,50	1,00	1,50

5.1.3 MÉDIA MENSAL DA ALTURA DAS ONDAS

A fig. 5-3 representa a média mensal da altura das ondas para os pontos em análise. Desta forma é possível perceber a forma como a altura das ondas varia de mês para mês ao longo do ano, e em cada ponto.

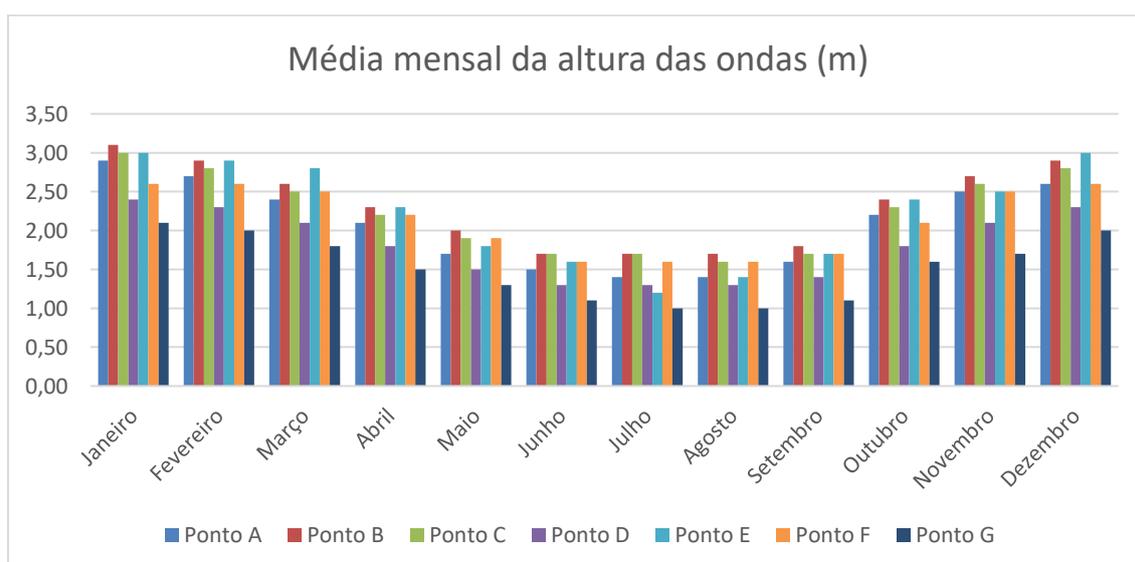


Figura 5-3: Média mensal de altura da onda.

O mês de janeiro representa o mês em que os valores médios de altura das ondas são mais elevados em todos os pontos, à exceção do ponto F que no mês de janeiro, fevereiro e dezembro apresenta valores perto dos 2,50 m. Nos meses de fevereiro, março, abril e maio nota-se uma diminuição da altura das ondas em todos os pontos. Nos meses de junho, julho e agosto a altura média das ondas manteve-se constante em todos os pontos, à exceção do ponto G que registou uma diminuição nos valores registados nos meses de junho e agosto. No mês de setembro nota-se um ligeiro aumento nos valores médios da altura da onda em todos os pontos. Subida essa que é mantida até ao mês de dezembro. Neste mês tal como no mês de março, o ponto onde se registaram valores mais elevados da altura média das ondas foi no ponto E. Tendo no mês de dezembro um valor médio de 3,0 m.

5.2 VARIABILIDADE DO PERÍODO MÉDIO DAS ONDAS

Neste ponto é feita uma avaliação da variabilidade temporal do período médio das ondas relativamente aos pontos em estudo. Para isso é apresentado o período médio anual, sazonal e mensal.

5.2.1 MÉDIA ANUAL DO PERÍODO

A fig.5-4 mostra a forma como o período da onda varia ao longo dos anos em análise, dependendo dos pontos escolhidos. No ano de 2000 observa-se que no ponto B é onde as ondas têm um período maior. No ano de 2001 verificou-se uma queda em todos os pontos do valor do período médio das ondas, atingindo o valor mais baixo no ponto D com 8,6s. Em 2002 houve um aumento do valor do período médio registado em todos os pontos, onde o valor mais alto foi no ponto B com 9,60s. No ano de 2003 volta a ocorrer uma queda no valor do período médio das ondas e à semelhança de 2001, o ponto D é o que regista o valor mais baixo com pouco mais que 8,60s. Em 2004 ocorre um novo aumento do valor registado para o período médio das ondas, em todos os pontos, à exceção do que acontece no ponto E, onde se continua a registar uma descida. Descida essa que continua no ano de 2005, mas neste ano é verificada em todos os pontos. No ano de 2006 até 2009 no ponto A, B e C regista-se um aumento contínuo nos valores registados para o período médio da onda, onde ponto B se regista o valor mais alto desses anos, com 9,5s. No ano de 2010 é possível perceber que foi o ano onde ocorreu a maior descida dos valores registados para o período médio anual, em todos os pontos à exceção do ponto E, onde registou o seu valor mais baixo em 2001. Em 2011 como já tem sido normal, após uma descida do valor registado para o período médio

volta-se a regista uma subida o mesmo. Em que nos pontos A,B e G se verificam valores iguais, de 9,40 s. Contudo o ponto E, mantém a tendência do ano anterior e volta a registar uma diminuição até 2012 chegando aos 8,7 s. Entre 2012 e 2013 verificou-se em todos os pontos, que não houve alterações em relação ao valor registado para o período médio anual. Em 2014, volta-se a registar um aumento dos valores obtidos em cada ponto, onde mais uma vez foi no ponto B que se registou o valor mais alto desse ano com 9,4 s. No ano de 2015 nos pontos A, C, F e G não ocorreram alterações para os valores de período médio das ondas, enquanto que no ponto B se registou uma diminuição para os 9,3 s. e no ponto E registou-se novamente uma subida como já vinha a acontecer desde 2013. Por último em 2016 este estudo mostra uma descida do período médio das ondas em todos os pontos.

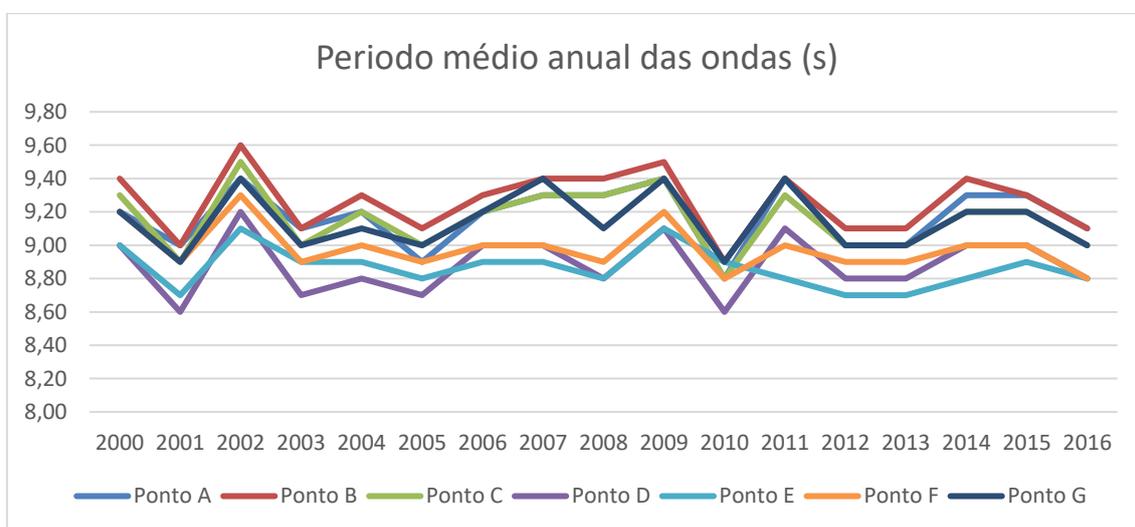


Figura 5-4: Evolução temporal do período médio das ondas, em cada ponto ao longo dos diferentes anos de estudo.

Apesar de a figura mostrar uma grande variabilidade no período médio das ondas, a verdade é que ao longo destes 17 anos de estudo a variação do período compreende-se num intervalo entre 8,6 e 9,6s.

5.2.2 MÉDIA SAZONAL DO PERÍODO

No quadro 5-2, é apresentado o período médio sazonal para os diferentes pontos em análise. No inverno os períodos médios de onda são superiores aos registados nas outras quatro estações do ano. Contudo o ponto E é aquele onde se verifica o valor mais baixo da estação, com 9,9s. Como aconteceu com o potencial médio energético e na altura média das ondas, o período médio sazonal vai diminuindo até ao verão, e depois volta a sofrer um aumento no outono. Os valores para o período médio do outono são muito

semelhantes em relação aos obtidos para a primavera em todos os pontos, contudo no outono verifica-se um aumento dos mesmos.

Quadro 5-2: Período médio sazonal das ondas

Período médio sazonal das ondas (s)				
Pontos	Inverno	Primavera	Verão	Outono
Ponto A	10,60	9,20	7,50	9,40
Ponto B	10,80	9,30	7,40	9,50
Ponto C	10,70	9,20	7,30	9,50
Ponto D	10,40	8,90	7,00	9,10
Ponto E	9,90	8,90	7,80	8,90
Ponto F	10,30	9,00	7,30	9,20
Ponto G	10,80	9,20	7,20	9,40

5.2.3 MÉDIA MENSAL DO PERÍODO

A fig. 5-9 representa o período médio mensal das ondas para os pontos em análise. Desta forma é possível perceber a forma como o período das ondas varia ao longo dos meses de um ano.

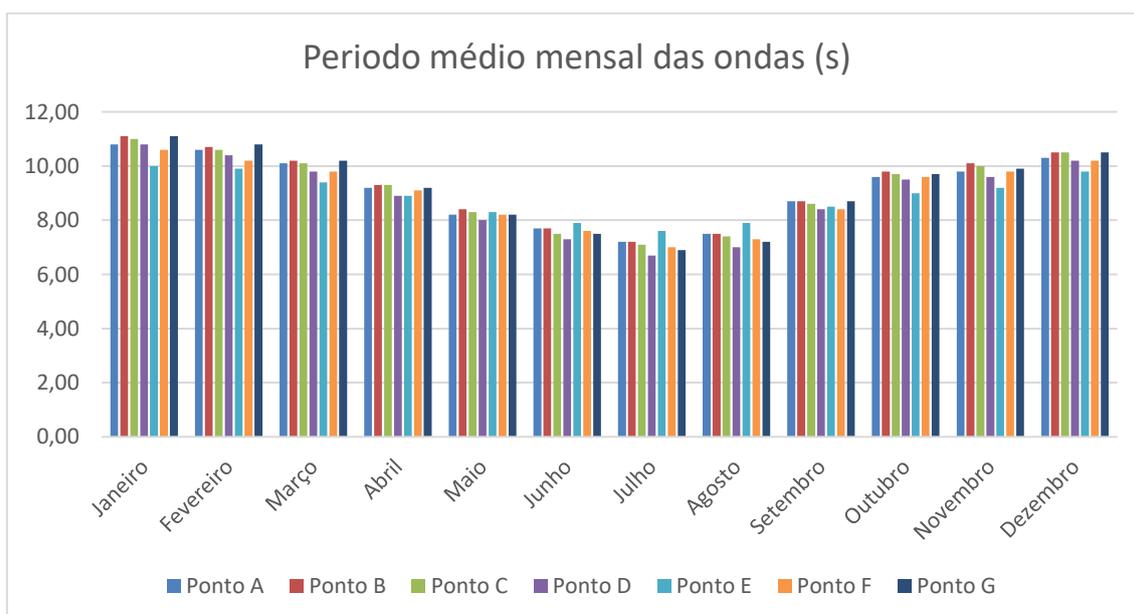


Figura 5-5: Período médio mensal das ondas.

O mês de janeiro representa o mês em que os valores médios do período da onda são os mais altos, registados em todos os pontos em estudo. Contudo como já foi possível perceber na análise sazonal do período das ondas, em todos os pontos a variabilidade do período é muito reduzida. Desde fevereiro até julho, é possível perceber que os valores registados para o período médio da onda sofreram uma diminuição, atingindo o seu valor mais baixo no ponto D com 6,70 s. A partir do mês de julho e até dezembro volta-se a verificar um aumento dos valores registados para o período médio das ondas.

5.3 VARIABILIDADE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DISPONÍVEL

Após a análise das características das ondas (H_s e T), nas secções seguintes apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos para a variabilidade espacial e temporal do potencial energético das ondas disponível.

5.3.1 POTENCIAL MÉDIO ANUAL

Neste ponto é apresentado o potencial energético anual, de forma a que seja possível ter uma perceção de como potencial energético das ondas varia ao longo dos anos.

A fig.5-6 representa a evolução temporal do potencial energético anual ao longo dos 17 anos considerados, dependendo dos diferentes pontos em estudo. Deste modo, no ano 2000 observa-se que o ponto B é aquele que apresenta valores maiores de potencial em relação aos outros seis pontos. No ano 2001 apesar de ser um ano onde se registou um potencial mais baixo do que no ano anterior, diminuindo para perto dos 30 kW/m, no ponto com maior potencial (ponto B), verifica-se que o ponto E (localizado ao largo dos Açores), ao contrário do que se tinha passado no ano anterior onde registou valores de potencial perto dos 26 kW/m, este ano subiu para os 30 kW/m, contrariando o que se passou nos restantes pontos onde todos registaram valores de potencial energético mais baixos em relação ao ano anterior.

No ano 2002 volta-se a registar valores de potencial mais elevados no ponto B, entre os 35 e 40 kW/m, mas neste ano os pontos A, C e D estiveram muito próximos dos 35 kW/m. o que mostra um aumento significativo em relação aos anos de 2000 e 2001. No ano de 2003 é possível reparar numa descida gradual do potencial de energia das ondas em todos os pontos em estudo. Descida essa que se verifica até ao ano de 2005, onde os pontos E e F contrariam essa descida. De tal modo que no ano de 2005, o ponto E com um potencial perto dos 28 kW/m é o maior valor registado nesse ano. No ano de 2006 todos os pontos apresentam uma subida do valor de potencial energético, onde o ponto B volta a ser o ponto com maior potencial, com valores perto dos 33 kW/m. No

ano de 2007 verifica-se uma descida gradual do potencial energético das ondas, onde em todos os pontos é possível notar uma descida em relação ao ano de 2006. Contudo os pontos A, B, C e E estão compreendidos entre valores de 25 a 30 kW/m.

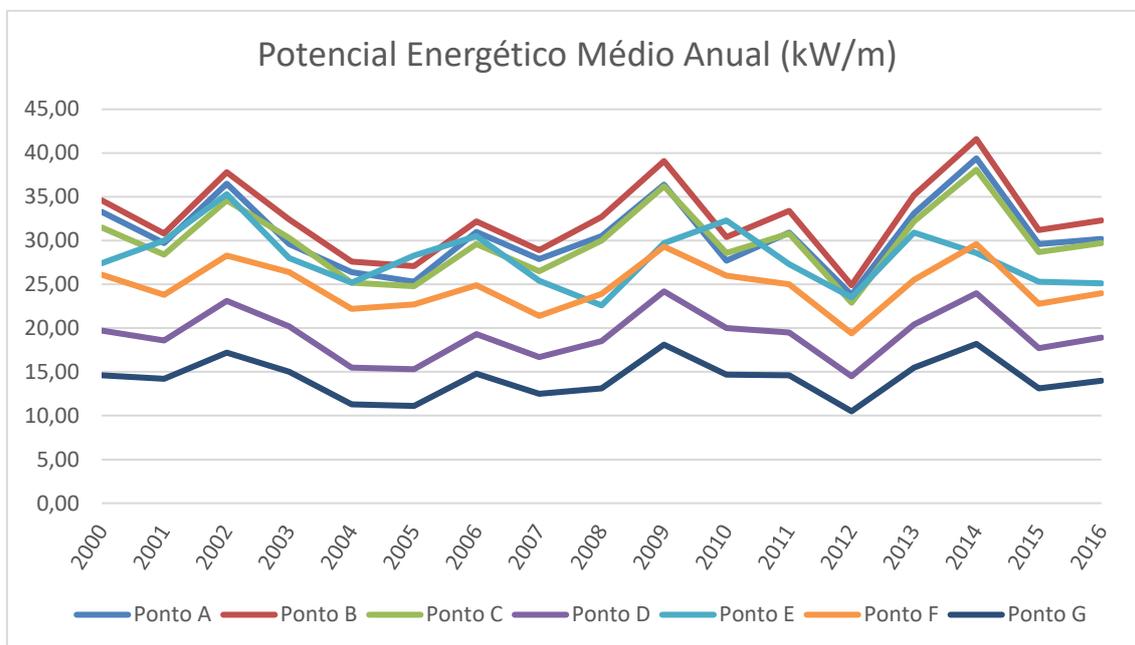


Figura 5-6: Evolução temporal do Potencial Energético Médio Anual.

No ano de 2008 nota-se uma subida nos valores do potencial energético em todos os pontos à exceção do ponto E, que mantém a tendência do ano anterior e volta a ter valores mais baixos para o potencial energético. No ano de 2009 e no seguimento do ano anterior, os valores voltam a subir, desta vez em todos os pontos. Contudo é mais uma vez no ponto B, que se regista o valor mais elevado neste ano, chegando perto dos 40 kW/m enquanto que no ponto G ronda os 18,10 kW/m. Embora, neste ano o ponto G tenha apresentado os valores mais altos para o potencial, desde que foi iniciado este estudo. Agora para o ano de 2010, houve uma descida em praticamente todos os pontos relativamente ao potencial energético, embora no ponto E tenha acontecido o oposto, e neste ponto foi onde se registou o valor mais alto de potencial deste ano com cerca de 33 kW/m. No ano de 2011, os pontos D, E, F e G apresentam uma descida nos valores registados em relação ao potencial energético ao invés dos pontos A, B e C que apresentam uma subida em relação ao ano anterior. Neste ano de 2011, os pontos A e C têm o mesmo valor (perto de 11 kW/m) e o ponto B volta a ser o ponto com valor de potencial mais alto, rondando os 38 kW/m.

O ano de 2012 foi um ano atípico, uma vez que em todos os pontos foram verificados valores mínimos registados desde o início deste estudo. Sendo o ponto G o ponto onde se registou o valor mais baixo, perto dos 10,50 kW/m. Em 2013, nota-se uma subida

bastante significativa em relação ao ano anterior, onde todos os pontos acompanham essa subida. Mais uma vez é no ponto B que se verificam os valores mais altos, que neste ano foram de 35 kW/m.

Em 2014, continuou a notar-se um aumento do potencial energético. Aumento esse que é visível no ponto B, que registou o seu valor máximo para o intervalo temporal em estudo, com mais de 40 kW/m. Contudo, no ponto E não se verificou um aumento do potencial registado, mas sim uma redução do mesmo. No ano de 2015 e após as subidas de 2013 e 2014, os valores para o potencial energético sofrem uma redução significativa em todos os pontos estudados. Contudo, em 2016 o último ano de estudo, o potencial energético volta a subir menos no ponto E que apesar de não ser uma descida significativa, não acompanhou a tendência verificada nos outros pontos.

Olhando para o panorama geral, é fácil concluir que o ponto G regista em todos os anos valores de potencial energético, inferiores aos registados em todos os outros pontos. Isto acontece porque este ponto é o que se encontra mais próximo da costa, influenciando assim a quantidade de energia convertida nesse mesmo ponto. Contudo, em termos totais, neste ponto registam-se valores muito semelhantes aos registados na Fig. 5 do artigo Rusu e Onea (2016), onde para uma localização semelhante à do ponto G, são registados valores totais para o potencial energético perto de 15 kW/m. E no Ponto G, em termos totais os valores andam a rondar os 14,26 kW/m. Tendo em conta o mesmo artigo, mas desta vez analisando a fig.1, pode-se observar, que para pontos um pouco mais afastados da costa portuguesa, regista-se um potencial que varia entre os 30 e os 40 kW/m (Rusu e Onea (2016)). Ou seja, para o ponto B deste estudo, localizado a 46,14 km da costa em termos totais regista-se um potencial energético de 32,48 que está compreendido nessa gama de valores.

5.3.2 POTENCIAL MÉDIO SAZONAL

No quadro 5-3, são apresentados os valores para o potencial energético médio das ondas, disponível nas quatro estações do ano relativamente a cada ponto em estudo. Como é perceptível os valores do potencial descem quase para metade entre o inverno e a primavera, e a diminuição é ainda maior quando se comparam os valores de potencial entre a primavera e o verão. Por exemplo no ponto B, a primavera apresenta valores de 29,4 kW/m e o verão apenas 11,27 kW/m. Este ponto situa-se relativamente perto da zona de Peniche e do Canhão da Nazaré, razão pela qual tem valores de potencial superiores aos outros pontos em análise para os mesmos períodos. É possível também perceber que os valores de potencial para a primavera e para o outono são muito semelhantes, contudo no ponto E, D, F e G o potencial é maior na primavera do que no outono, enquanto nos outros pontos verifica-se o contrário. No ponto G, para o inverno

são registados valores de potencial energético das ondas de 26,90 kW/m, semelhantes aos registados na fig. 5 do artigo Rusu e Onea (2016), onde para uma localização semelhante e para o inverno são registados valores de potencial perto dos 25 kW/m.

Quadro 5-3: Avaliação do Potencial Energético das ondas, em cada ponto ao longo das diferentes das diferentes estações do ano

Potencial Energético (kW/m)				
Pontos	Inverno	Primavera	Verão	Outono
Ponto A	48,20	23,70	8,70	25,80
Ponto B	57,50	29,40	11,27	31,80
Ponto C	52,26	27,30	11,00	29,00
Ponto D	34,80	17,90	6,60	17,80
Ponto E	50,20	28,01	8,10	25,28
Ponto F	40,30	24,26	9,70	24,80
Ponto G	26,90	13,10	4,30	13,20

Como já foi abordado neste trabalho, um dos principais problemas em relação aos CEO, reside na sua capacidade de resistir aos fenómenos extremos das ondas, o que é perceptível se olhando para a coluna que traduz o potencial energético no inverno ao longo dos pontos em análise.

A fig.5-7 permite ter uma melhor perceção dos valores apresentados no quadro 5-3. Onde, no inverno no ponto B registam-se valores médios perto dos 60 kW/m, valores muito superiores aos apresentados para todos os outros pontos em estudo. Isto reforça ainda mais o facto de o ponto B, ser o ponto em estudo que apresenta um maior recurso disponível. Tendência essa que também foi perceptível nas análises anuais e mensais, onde quase sempre foi no ponto B, onde os valores médios para o potencial energético foram maiores.

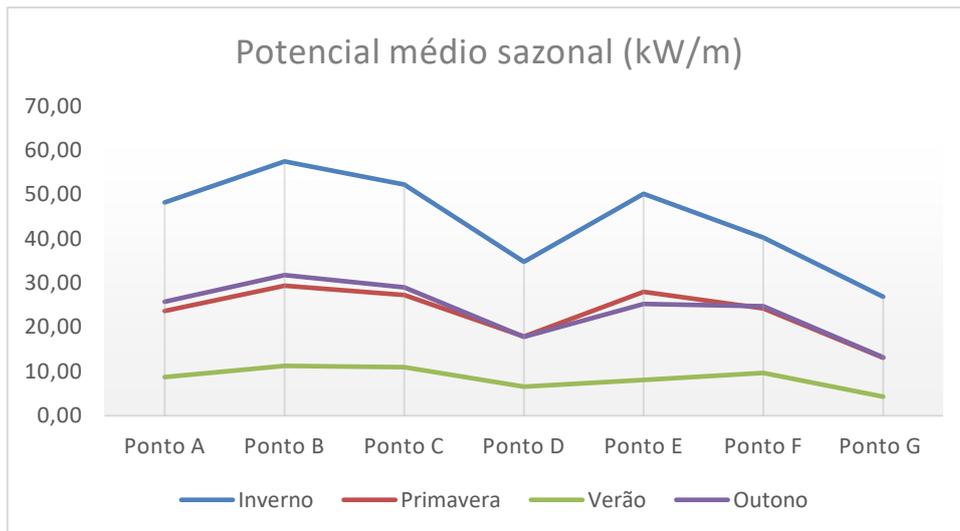


Figura 5-7: Avaliação do Potencial Energético das ondas, em cada ponto ao longo das diferentes estações do ano.

A fig. 5-8 mostra a distribuição espacial do potencial energético médio sazonal e dá uma outra perspetiva sobre o mesmo em relação a cada estação. Na fig. 5-8 a) é apresentado o potencial energético para a estação Inverno, que permite ter uma rápida perceção de que o Atlântico Norte se apresenta como um local de enorme potencial energético no que diz respeito à energia das ondas.

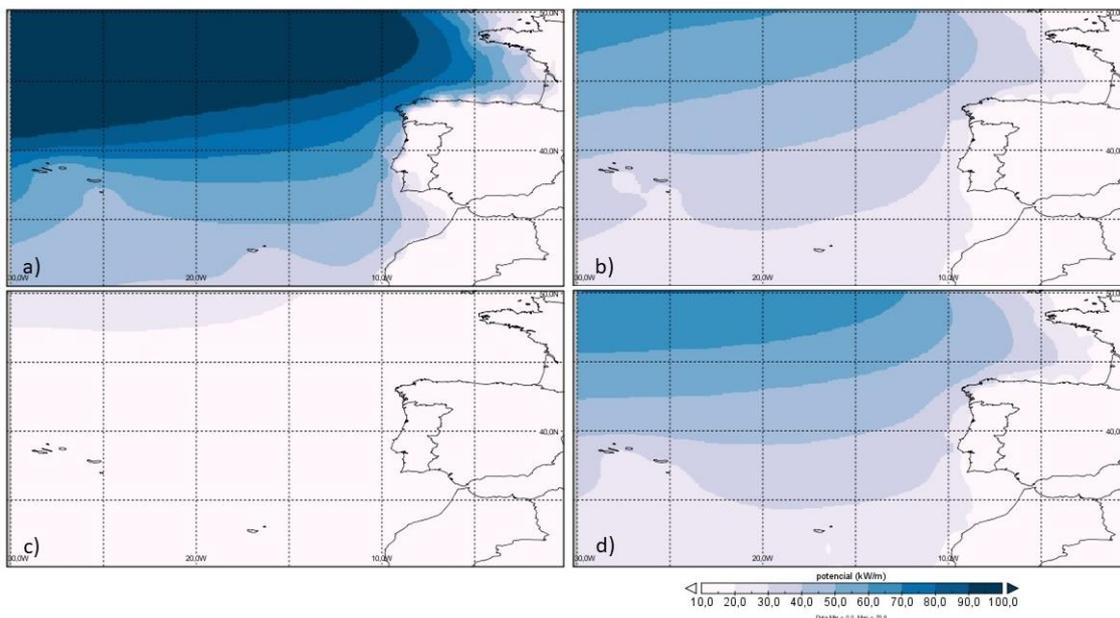


Figura 5-8: Distribuição espacial do Potencial Energético das ondas nas diferentes estações do ano [a] Inverno, b) Primavera, c) Verão e d) Outono.

Entre os 40°N e 50°N registam-se valores de 70 a 100 kW/m para esta estação. Na zona das ilhas, principalmente nos Açores, os valores variam entre os 60 e 70 kW/m. A fig. 5-8 b ilustra o potencial energético para a Primavera, que apesar de não ter valores tão significativos como no Inverno, apresenta potenciais de 30 e 70 kW/m entre os 40°N e 50°N. Na zona das ilhas, principalmente nos Açores, registam-se valores entre os 60 e 70 kW/m. Como era espectável na fig. 5-8 c, referente ao período do Verão, apenas há valores para o Atlântico Norte.

Na figura fig. 5-8 d, apresenta-se o potencial energético para o Outono tendo em conta o intervalo de tempo de 17 anos (2000 a 2016). Com a análise desta figura é possível perceber que os valores para o potencial energético são muito semelhantes aos obtidos para igual período na Primavera. Por exemplo ao longo da costa portuguesa, entre os 35°N e 45°N os valores do potencial variam entre os 20 e 40 kW/m, valores esses muito próximos em ambas as estações. Contudo no Outono é possível observar que acima dos 35°N os valores do potencial rondam os 70 kW/m, enquanto na primavera para a mesma localização temos valores entre os 50 e 60 kW/m.

5.3.3 POTENCIAL MÉDIO MENSAL

A fig. 5-9 representa o potencial energético mensal para os pontos em análise. Desta forma temos uma melhor perceção da forma como o potencial varia em cada ponto, entre cada mês durante os 17 anos em análise.

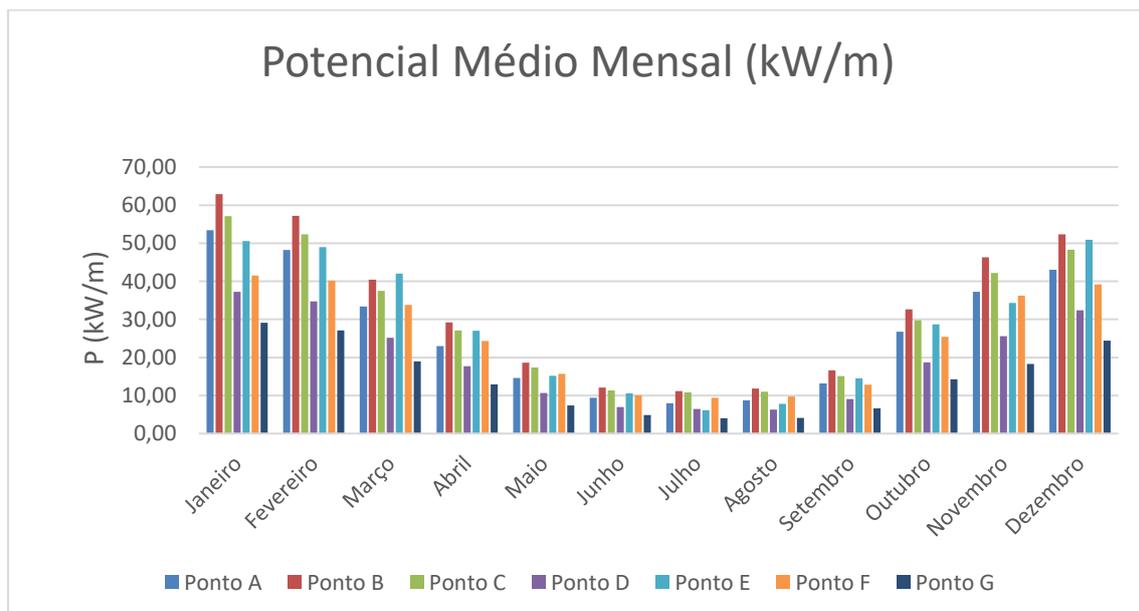


Figura 5-9: Potencial Energético Médio Mensal.

Assim sendo para o mês de janeiro e para o ponto D registam-se valores médios inferiores a 40 kW/m, enquanto no ponto B os valores registados são superiores a 60 kW/m. Para o mês de fevereiro nota-se uma pequena descida para os valores do potencial energético em todos os pontos, contudo o ponto B continua a ser o local onde os valores são mais elevados. Em março continua a verificar-se a diminuição do potencial energético disponível, diminuição essa que se prolonga até aos meses de abril, maio, junho, julho e agosto. Em setembro os valores do potencial energético disponível voltam a subir, mantendo essa tendência até ao mês de dezembro. Na fig.5-9 é possível perceber que o mês de janeiro é o mês que apresenta valores mais altos para o potencial energético.

5.4 POTENCIAL ENERGÉTICO DAS ONDAS TENDO EM CONTA DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Neste ponto discutem-se, de uma forma genérica, os impactes que as alterações climáticas poderão ter na conversão de energia das ondas. Existem várias pesquisas sobre a previsão da energia das ondas a curto prazo bem como a influência das alterações climáticas, contudo, os estudos dos recursos de energia das ondas de médio a longo prazo, que são fundamentais para um melhor desenvolvimento a nível comercial e operacional, continuam a escassear (Wei et al., 2017).

De forma a ter uma perceção da influência das alterações climáticas no potencial energético das ondas, foi tido em consideração o estudo elaborado por *Reeve et al.* (2011). Neste artigo foram usados dados entre 1961-2000 para calcular uma condição de controlo, para depois aplicar dois cenários diferentes em relação às percentagens de gases de estufa na atmosfera. Deste modo foram considerados dois cenários, A1B e B1, em que o primeiro representa o cenário em que se tem em conta um aumento intermédio dos gases de efeito estufa na atmosfera e o segundo, B1 onde os valores dos gases de estufa são menos significativos. Focando a análise nas médias de 10 anos, e tendo em conta o valor padrão, nota-se um aumento da potência médias das ondas na ordem dos 2,95% no cenário A1B, mas uma queda de 2,27% no cenário B1. Tendo em conta que o cenário B1 representa uma diminuição nos gases de efeito estufa no futuro, implica que os esforços para reduzir as emissões destes gases poluentes podem estar a ter um efeito negativo, ainda que de uma forma não intencional, no entanto este efeito não é imediatamente perceptível devido à variabilidade natural das ondas (*Reeve et al.* 2011). Contudo estas mudanças podem vir a ser importantes quando se tiver em conta a vida útil de um parque de produção de energia das ondas, por exemplo para 10 ou 20 anos.

Outro ponto importante é o facto de que este aumento de energia das ondas, se traduzir diretamente em problemas relativamente aos CEO, uma vez que as ondas extremas fazem com que tempo de inatividade do conversor seja maior. Contudo se os conversores forem otimizados para extrair energia de ondas extremas, de uma forma mais eficiente isto traduz-se num aumento de produção de energia.

Relativamente ao cenário A1B, o aumento verificado no potencial energético das ondas reflete o impacto que o aumento do nível da concentração dos gases de efeito estufa poderá ter sobre a intensidade e a frequência de tempestades extremas, o que vai de encontro a conclusões retiradas de outros estudos sobre o clima de ondas no Atlântico Nordeste.

Tendo em conta os aumentos de energia das ondas de cerca de 2,95% (Reeve et al. 2011), caso se venha a verificar um aumento da concentração dos gases de efeito de estufa e aplicando aos cálculos efetuados nesta dissertação, resulta:

Quadro 5-4: Potencial Energético sazonal

Potencial P (kW/m)				
Pontos	Inverno	Primavera	Verão	Outono
Ponto A	48,2	23,7	8,7	25,8
Ponto B	57,5	29,4	11,27	31,8
Ponto C	52,26	27,3	11	29
Ponto D	34,8	17,9	6,6	17,8
Ponto E	50,2	28,01	8,1	25,28
Ponto F	40,3	24,26	9,7	24,8

Quadro 5-5: Potencial Energético sazonal com um aumento de 2,95%

Potencial P (kW/m)				
Pontos	Inverno	Primavera	Verão	Outono
Ponto A	49,62	24,40	8,96	26,56
Ponto B	59,20	30,27	11,60	32,74
Ponto C	53,80	28,11	11,32	29,86
Ponto D	35,83	18,43	6,79	18,33
Ponto E	51,68	28,84	8,34	26,03
Ponto F	41,49	24,98	9,99	25,53

Da análise dos quadros 5-4 e 5-5, pode-se concluir que a diferença da energia das ondas produzida, após um aumento de 2,95% não se mostra muito significativa. Contudo como já foi referido, no caso de um parque de produção de energia das ondas ao fim de 10 anos, este aumento será bastante significativo.

6 CONCLUSÕES

Após todos os cálculos efetuados nesta dissertação, a primeira conclusão que se pode tirar, é que durante os 17 anos em estudo a altura média das ondas esteve compreendida entre 1,0 m e 2,5m. Contudo é de notar que há uma tendência para que ao longo dos anos as ondas se comportem da mesma forma em praticamente todos os pontos em análise.

Pode-se concluir que a condição que influencia o potencial energético de uma forma mais relevante é altura significativa da onda, uma vez que as descidas registadas para o potencial energético das ondas são acompanhadas também por diminuições na altura significativa da onda. Por exemplo para o ano de 2013 verifica-se um aumento do potencial energético em relação ao ano anterior, que é acompanhado também por um aumento da altura significativa nesse mesmo ano, mas em contrapartida os valores médios do período de onda mantêm-se constantes nos 8,30 s.

Analisando agora os valores registados para o potencial energético médio anual, pode-se concluir que o ponto B é aquele que ao longo dos 17 anos em estudo regista sempre valores superiores aos registados nos outros pontos, sendo em 2014 que para uma altura média significativa de 1,89 m e período médio de 9,13 s, são registados valores médios de potencial de 41,60 kW/m. O estudo das ondas realizado nesta dissertação mostrou diferenças significativas entre a costa sudoeste e o resto da costa oeste portuguesa em termos da altura significativa das ondas e da densidade de potência da onda resultante. Como foi possível observar em todas as figuras resultantes dos *CDOS* o potencial de energia das ondas aumentava sempre que havia uma aproximação à parte Norte do Atlântico, isto verificou-se até mesmo no Verão onde se registaram potenciais muito baixos em quase todo o Atlântico.

Foi possível constatar que em cerca de metade do ano (Primavera e Outono) a faixa do potencial de energia das ondas localizou-se dentro dos 20-30 kW/m, o que mostra que este será o valor mais próximo daquilo que é o potencial disponível para aproveitamento.

É de notar o efeito que as nossas ilhas têm na perda de potencial de energia das ondas, isto junto à costa, nas imagens resultantes nota-se claramente o desvio e diminuição da sua intensidade. e ainda que o potencial energético vai diminuindo à medida que nos aproximamos da costa.

É de reforçar a ideia de que os conversores têm de ser muito resistentes a todas as alterações do recurso, bem como a fenómenos extremos, como por exemplo tempestades. Isto é exemplificado neste trabalho, uma vez que dos seis pontos em análise, aquele que registou valores mais altos em relação ao potencial energético

localiza-se perto do canhão da Nazaré. Portanto, neste local para além da influência das tempestades, há a influência da batimetria oceânica que origina ondas extremas perto da costa.

Na energia das ondas, é sempre complicado conseguir perceber o que irá acontecer uma vez que existe uma grande variabilidade natural do recurso. E embora cada vez mais se tenham modelos de clima das ondas que permitem estudar com bastante rigor o recurso, a variabilidade natural tem sempre um enorme peso.

Uma conclusão que se pode tirar da comparação entre os resultados obtidos nesta dissertação, com os publicados em artigos que abordam a mesma temática, é que a distância à costa influencia diretamente o potencial energético que se encontra disponível. De modo que à medida que nos há uma aproximação à costa o potencial energético disponível diminui.

Tendo em conta os cenários futuros no que toca às alterações climáticas, e após os cálculos efetuados nesta dissertação pode-se concluir que a diferença do potencial energético das ondas, após um aumento de 2,95% não se mostra muito significativa no imediato. Contudo como já foi referido, no caso de um parque de produção de energia das ondas ao fim de 10 anos, este aumento será bastante significativo. É de notar que este aumento de 2,95% na produção de energia das ondas, pode não se vir a verificar uma vez que este aumento está pendente do aumento dos gases de estufa que por sua vez levam a fenómenos extremos, como por exemplo tempestades. O que dificulta ainda mais a possibilidade de se ter sistemas de conversão de energia das ondas a operar em ambientes muito mais adversos comparativamente ao que temos atualmente.

6.1 CONSIDERAÇÕES FUTURAS

Será interessante para trabalhos futuros poder usar as fórmulas dos conversores de energia das ondas ou até mesmo construir pequenos protótipos para que seja possível ter uma melhor percepção da forma como se avalia o potencial energético das ondas, estando a trabalhar diretamente com o sistema. Desta forma será possível ter ainda mais noção dos problemas inerentes aos conversores, bem como a importância da sua versatilidade em se adaptar a fenômenos extremos.

Será também interessante recorrer a modelos e simulações, de forma a que se possa estudar o potencial energético das ondas num futuro próximo.

Finalmente é de referir que será fundamental desenvolver ferramentas que permitam monitorizar em tempo real as regiões onde estão a ser desenvolvidos projetos de conversão de energia das ondas.

REFERÊNCIAS

- Algie, Cam, Shawn Ryan, and Alan Fleming. 2017. "International Journal of Marine Energy Predicted Power Performance of a Submerged Membrane Pressure-Differential Wave Energy Converter." *International Journal of Marine Energy* 20: 125–34. <https://doi.org/10.1016/j.ijome.2017.09.005>.
- Almeida, M.M. e Guedes Soares. 2015. "Centro de Engenharia e Tecnologia Naval e Oceânica." *Numerical investigation of the tidal energy potential in the Portuguese continental shelf: 177–82*. <http://www.centec.tecnico.ulisboa.pt/centec/publications.aspx?publicationid=1930> (October 15, 2019).
- André, Rui Alexandre Aranda. 2010. "Modelação de Um Sistema de Conversão de Energia Das Ondas." : 112.
- Antolín-urbaneja, Juan Carlos et al. 2015. *Modeling Innovative Power Take-Off Based on Double-Acting Hydraulic Cylinders Array for Wave Energy Conversion*.
- Bidlot, Jean-raymond, and Peter Janssen. 2007. "Dissipation and Its Model Impact ." *Technical Report Memorandum 509* (January).
- "Carnegie Clean Energy." 2014. *CETO*. <https://www.carnegiece.com/?s=CETO> (October 17, 2019).
- Cruz, João M. B. P., and António N. A. Sarmento. 2004. *Energia Das Ondas: Introdução Aos Aspectos Tecnológicos, Económicos e Ambientais*.
- Drew, B, A R Plummer, and M N Sahinkaya. 2009. "A Review of Wave Energy Converter Technology." 223: 887–902.
- "ECMWF." 2020. *ERA-Interim*. <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim> (January 19, 2020).
- Eia. 2016. "World Energy Demand and Economic Outlook EIA's Handling of Non-U.S. Policies in the International Energy Outlook." *U.S. Energy Information Administration* 2016(May 2015): 7–17. <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/world.cfm>.
- Emerging, Arena, Renewables Program, and Funding Agreement. 2018. "The Australian Wave Energy Atlas Project Overview and Final Report." (February).
- Falcão, António F de O. 2009. "Wave Energy Utilization: A Review of the Technologies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(3): 899–918.
- Falnes, Johannes. 2007. "A Review of Wave-Energy Extraction." 20(0951file:///C:/Users/joaoc/Dropbox/Tese/Artigos/falnes1991.pdf): 185–201.
- Ilyas, Arqam, Syed A R Kashif, Muhammad A Saqib, and Muhammad M Asad. 2014. "Wave Electrical Energy Systems : Implementation , Challenges and Environmental Issues." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40: 260–68. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.085>.
- Langhamer, O. 2010. "Effects of Wave Energy Converters on the Surrounding Soft-Bottom Macrofauna (West Coast of Sweden)." *Marine Environmental Research* 69(5): 374–81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marenvres.2010.01.002>.

- Luis Kornblueh, Ralf Mueller, Uwe Schulzweida. 2020. "Max Planck Institute for Meteorology." *Visão geral Climate Data Operators*. <https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo> (January 19, 2020).
- Mørk, Gunnar, Stephen Barstow, Alina Kabuth, and M Teresa Pontes. 2010. "ASSESSING THE GLOBAL WAVE ENERGY POTENTIAL ECMWF -European Centre for Medium-Range Weather Forecasts MEDS -Marine Environmental Data Services (Canada) NOAA -National Oceanic and Atmospheric Administration NDBC -National Data Buoy Centre WERATLAS -European." *Offshore Mechanics and Arctic Engineering* (2008). <https://pdfs.semanticscholar.org/d7fd/7fc8b4ec97db3cec84648b3303e9f267b581.pdf>.
- Mota, P., and J.P. Pinto. 2014. "Wave Energy Potential along the Western Portuguese Coast." *Renewable Energy* 71(November 2014): 8–17. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014811400130X>.
- Moura Paredes, Guilherme. 2008. "Estudo Experimental de Um Sistema Offshore Para Produção de Energia Das Ondas." : 168.
- "National Aeronautics and Space Administration." 2019. *Panoply netCDF, HDF and GRIB Data Viewer*. <https://www.giss.nasa.gov/about/management.html> (January 19, 2020).
- Ozkop, Emre, and Ismail H. Altas. 2017. "Control, Power and Electrical Components in Wave Energy Conversion Systems: A Review of the Technologies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67: 106–15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.012>.
- Paixão Conde, J. M., and L. M C Gato. 2008. "Numerical Study of the Air-Flow in an Oscillating Water Column Wave Energy Converter." *Renewable Energy* 33(12): 2637–44.
- Reeve, D E et al. 2011. "An Investigation of the Impacts of Climate Change on Wave Energy Generation : The Wave Hub , Cornwall , UK." *Renewable Energy* 36(9): 2404–13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2011.02.020>.
- Reguero, B. G., I. J. Losada, and F. J. Méndez. 2015. "A Global Wave Power Resource and Its Seasonal, Interannual and Long-Term Variability." *Applied Energy* 148: 366–80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.114>.
- Rocha, A Barata et al. 2010. "Offshore Renewable Energy Development of Ocean Technology Projects At Inegi."
- Rusu, Eugen, and C. Guedes Soares. 2011. "Wave Modelling at the Entrance of Ports." *Ocean Engineering* 38(17–18): 2089–2109. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.09.002>.
- Rusu, Eugen, and Florin Onea. 2016. "Study on the Influence of the Distance to Shore for a Wave Energy Farm Operating in the Central Part of the Portuguese Nearshore." *Energy Conversion and Management* 114: 209–23. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.020>.
- Rusu, Liliana, and Florin Onea. 2015. "Assessment of the Performances of Various Wave Energy Converters along the European Continental Coasts." *Energy* 82: 889–904. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.099>.
- Rusu, Liliana, and Florin Onea. 2016. "The Performance of Some State-of-the-Art Wave Energy Converters in Locations with the Worldwide Highest Wave Power." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (November): 0–1. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.123>.
- Saha, Suranjana. 2010. "ResearchGate." *The NCEP climate forecast system reanalysis*. https://www.researchgate.net/publication/255668095_The_NCEP_climate_forecast_system_reanalysis (August 25, 2019).

- Silva, Dina, Paulo Martinho, and C Guedes Soares. 2018. "Wave Energy Distribution along the Portuguese Continental Coast Based on A Thirty Three Years Hindcast." *Renewable Energy*.
- Skoglund, Annika et al. 2010. "On the Physics of Power , Energy and Economics of Renewable Electric Energy Sources - Part II." *Renewable Energy* 35(8): 1735–40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.031>.
- Su, Wen-ray et al. 2018. "Numerical Investigation of Wave Energy Resources and Hotspots in the Surrounding Waters of Taiwan." *Renewable Energy* 118: 814–24. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.080>.
- U.S. Energy Information Agency. 2013. "International Energy Outlook 2013." *Outlook 2013*: 312. [http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2013\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2013).pdf).
- Veigas, M., and G. Iglesias. 2014. "Potentials of a Hybrid Offshore Farm for the Island of Fuerteventura." *Energy Conversion and Management* 86: 300–308. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.032>.
- Wang, Liguo, Jan Isberg, and Elisabetta Tedeschi. 2018. "Review of Control Strategies for Wave Energy Conversion Systems and Their Validation : The Wave-to-Wire Approach." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81(October 2016): 366–79. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.074>.
- Wei, Chong, Qing Wang, and Chong Yin. 2017. "An Overview of Medium- to Long-Term Predictions of Global Wave Energy Resources." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79(May): 1492–1502. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.109>.

ANEXOS

Quadro 0-1: Alguns dos CEO instalados entre 2005 e 2016 (Wang et al., 2018).

Nome do Conversor de energia das ondas	Ano de implementação	Local/País de Implementação
PwerBuoy	2005-2008	New Jersey/E.U.A
	2008	Santona/Espanha
	2009-2011	Hawaii/E.UA
Oceanlinx Mk1 Mk2 Mk3	2005	Port Kempl/ Australia
	2007-2008	
	2010	
Wave Star	2005-2006	Nissum Bredning/Dinamarca
	2010	Hanstholm/Dinamarca
Lysekil CEO	2006-2016	Lysekil/Sweden
OE Buoy	2007-2008	Galway Bay/Irlanda
	2011	
Mutriku Wave Energy Plant	2006-2011	País Basco/Espanha
Wavebob	2007	Galway/Irlanda
Pelamis	2008	Norte de Portugal
	2010	Reino Unido
	2012	
OCEANTEC	2018	Guipúzcoa/Espanha
Waveroller	2008	Peniche/Portugal
	2014	
Oyster	2009	Orkney/Reino Unido
	2011-2013	
Duck	2009	WanShan/China
	2011	
	2013	
PowerBuoy	2011	Invergordon/Reino Unido
Wello Oy	2011	Orkney/Reino Unido
Penguin WEC	2015	Plocan/Espanha
Fred. Olsen	BOLT33	2007
	BOLT22	2008
	BOLT1	2009
	LIFESAVER	2012
Azura	2012	Cornwall/Reino Unido
	2015	Hawaii/E.U.A
Sharp Eagle	2012	Oregon/E.U.A
	2015	
M3 wave project	2014	WanShan/China
Oscilla Power	2014	Oregon/E.U.A
RivGen Power	2014	New Hampshire/E.U.A
AWS-III	2014	Alasca/E.U.A
Havkraft WEC	2014	Orkney/Reino Unido
CETO	2014	Sogn og Fjordane/Noruega
Oceanus 2	2014-2016	Garden island/Australia
	2014	Cornwall/Reino Unido
2016		
Volta Wec	2015	Cornwall/Reino Unido
KRISO OWC	2012-2014	Yongsoo/Coreia do Sul
Seabased AB WEC	2015	Ada Foah/Ghana
	2015	Sotenas/Suécia
WaveEL	2016	Runde/Noruega

Quadro 0-2: Tabela 6, referente aos pontos do estudo feito por Silva et al. (2018).

Pontos	Latitude (°)	Longitude (°)	Profundidade (m)
Aguçadoura	41,95 N	350,68	76,00
Figueira da Foz	40,26 N	350,76	99,70
São Pedro de Moel	39,53 N	350,84	36,00
Peniche	39,36 N	350,30	64,00
Cascais	38,76 N	350,25	75,00
Sines	37,92 N	351,07	60,00

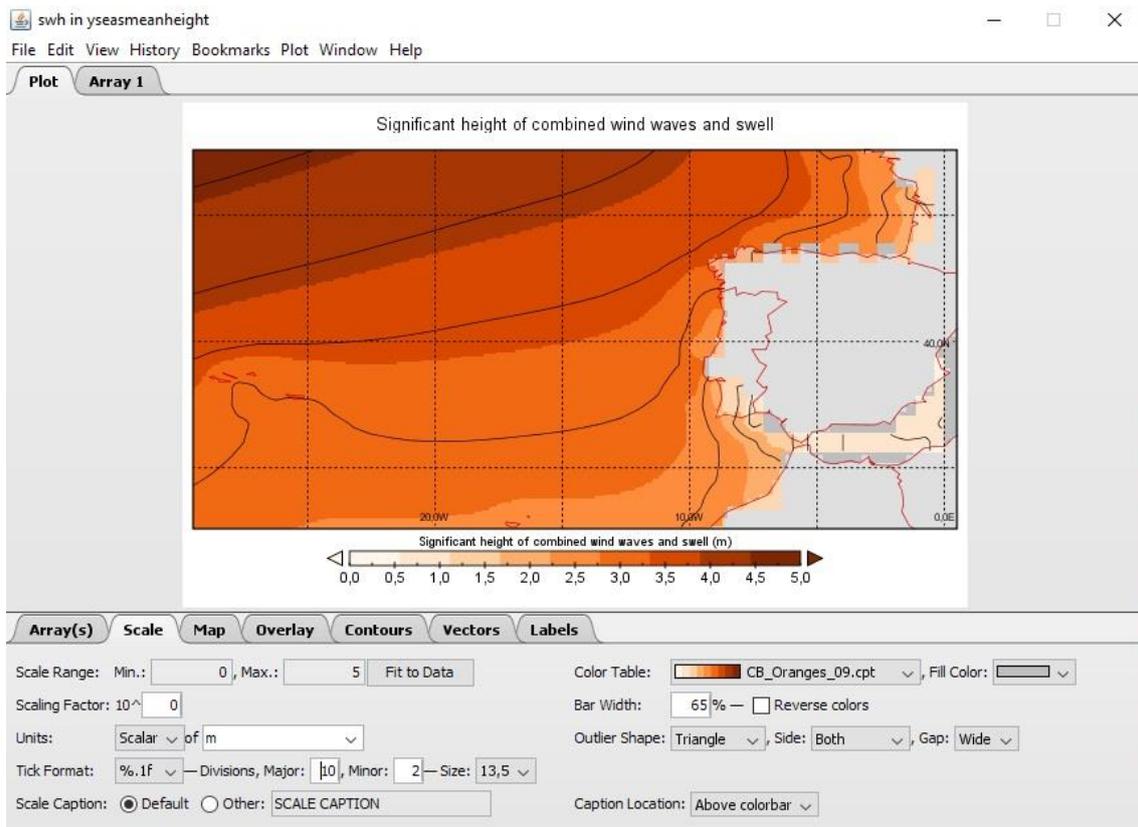


Figura 0-1: Exemplo da configuração do Panoply