

# **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA HÍBRIDO DE APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS PARA O QUEBRAMAR NORTE DE LEIXÕES**

**TOMÁS BARREIRA CALHEIROS BARBOSA CABRAL**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA**

---

Orientador: Professor Doutor Francisco de Almeida Taveira Pinto

---

Coorientador: Professor Doutor Paulo Jorge Rosa Santos

---

Coorientador: Doutor Engenheiro Hugo Guedes Lopes

JUNHO DE 2018

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2017/2018**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2017/2018 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2018.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais, família e amigos

*"Water is the driving force of all nature"*

*Leonardo da Vinci*



## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Francisco Taveira Pinto, por me ter proporcionado a possibilidade de participar no projeto *SE@PORTS* e pelos conhecimentos e conselhos que me tem vindo a transmitir. Gostaria de agradecer ao coorientador Professor Paulo Rosa Santos pela dedicação a esta dissertação, pela disponibilidade demonstrada para discutir ideias e resultados, e pelo apoio constante. Gostaria também de agradecer ao coorientador Doutor Eng. Hugo Guedes Lopes, da APDL, por me ter facultado a possibilidade desta parceria e pela disponibilidade demonstrada para me receber.

Agradecer à Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente pela cedência das instalações e dos meios para a realização dos ensaios experimentais. Agradecer também aos membros do INEGI (Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial) pelo trabalho realizado no âmbito do projeto *SE@PORTS* e o seu contributo para esta dissertação.

O meu obrigado à empresa ELEVO, por ter fornecido o material britado para a construção do modelo, ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), pelo empréstimo dos blocos Antifer utilizados na materialização do manto resistente do quebramar, e ao Prof. Jens Peter Kofoed, da Universidade de Aalborg, na Dinamarca, pela possibilidade de utilização do *software* WOPSim no contexto deste trabalho.

Um enorme obrigado à Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, nomeadamente ao Eng. Daniel Clemente por me ter ensinado a utilizar todo o equipamento dos ensaios, pela partilha de conhecimentos de modelação física e numérica, de engenharia e muito mais, e pela permanente atitude positiva. Agradeço ao Senhor Miguel Guerra por toda a ajuda e soluções inventivas para o *setup* experimental e incessante boa disposição e vontade de ajudar. Agradeço também à Dona Esmeralda Miguel pela ajuda prestada para tratar de toda a logística.

Agradeço, por fim, à minha Família e amigos pelo apoio incondicional ao longo deste trabalho e por estarem sempre ao meu lado, tornando tudo muito mais simples.



## **RESUMO**

A utilização excessiva dos combustíveis fósseis por parte da humanidade implicou consequências graves, como o aquecimento global, o aumento do nível médio da água do mar, a retração do gelo marinho na Antártida e a poluição atmosférica. De forma a assegurar um desenvolvimento sustentável, tornou-se necessário substituir as fontes de energia poluentes e não renováveis por outras limpas e renováveis. Estas fontes podem ser diversas, no entanto, o potencial da energia das ondas é muito significativo, e está ainda largamente inexplorado. Assim, na presente dissertação será estudado um dispositivo híbrido de aproveitamento da energia das ondas a ser aplicado em quebramares portuários, tendo como referência a obra de prolongamento do quebramar Norte do porto de Leixões.

O dispositivo híbrido em estudo utiliza as tecnologias de CAO (Coluna de Água Oscilante) e SSG (*Seawave Slot-cone Generator*). A primeira aproveita a oscilação da superfície livre da água dentro de uma câmara provocada pelas ondas do mar para gerar energia, enquanto a segunda utiliza os galgamentos de uma estrutura portuária. O objetivo deste trabalho é otimizar numericamente a geometria da componente SSG do dispositivo, bem como estudar em modelo físico o desempenho do dispositivo híbrido de aproveitamento da energia das ondas e avaliar o efeito da sua aplicação num quebramar de taludes.

Para o efeito, foi utilizado o *software* de modelação numérica WOPSim, versão 3.11, na otimização da geometria do SSG para condições de agitação marítima típicas da costa Norte portuguesa, e foram realizados ensaios em modelo físico 2D à escala geométrica 1:50 com o dispositivo híbrido integrado no quebramar. Ao longo dos ensaios foi medida a evolução da batimetria em frente ao quebramar, analisada a estabilidade dos blocos do manto resistente e da risberma do quebramar, quantificado o caudal médio de galgamento do coroamento da estrutura e nos quatro reservatórios do dispositivo SSG, medida a pressão à saída da câmara da CAO e avaliada a variação da superfície livre da água dentro da mesma.

Os estudos realizados permitiram definir uma geometria da componente SSG do dispositivo otimizada para as condições de agitação marítima e níveis de maré junto ao porto de Leixões, estimar a produção energética deste e avaliar a eficácia do quebramar com o dispositivo híbrido integrado. Concluiu-se que a utilização de um dispositivo SSG com quatro reservatórios conduzia à melhor eficiência global, e que a aplicação do dispositivo híbrido de aproveitamento da energia das ondas num quebramar não restringia nem a sua funcionalidade, nem a sua estabilidade.

Trabalhos futuros procurarão estudar e otimizar a produção de energia conjunta das duas tecnologias no mesmo dispositivo de forma a melhor avaliar o benefício da hibridação.

**PALAVRAS-CHAVE:** energia das ondas, SSG, CAO, porto de Leixões, WOPSim.





## **ABSTRACT**

The excessive burning of fossil fuels by humankind has brought dire consequences, such as global warming, the rise of the global mean sea level, retreating ice sheets in the Antarctic and air pollution. To assure sustainable development, it has become necessary to replace polluting and non-renewable energy sources with clean and renewable ones. Although these sources are numerous, wave energy shows great potential, and is yet largely untapped. Therefore, the purpose of the present dissertation is to study a hybrid wave energy converter to be integrated into port breakwaters, having as reference the extension of the North breakwater of the port of Leixões.

The hybrid device uses the OWC (Oscillating Water Column) and the SSG (Seawave Slot-cone Generator) technologies. The first makes use of the water's free surface oscillation inside a chamber caused by ocean waves to generate power, whilst the second uses the overtopping of a harbour structure. This dissertation aims at numerically optimizing the geometry of the device's SSG component, as well as studying its performance and assessing the effect of the application of a wave energy converter to a rubble-mound breakwater.

For the matter, the numerical simulation software WOPSim, version 3.11, was used in the optimization of the SSG's geometry for wave conditions typical of the Portuguese North coast, and 2D physical model tests were carried out at a geometrical scale of 1:50 with the hybrid device integrated into the breakwater. During the tests, the changes in the bathymetry in front of the breakwater were evaluated, the stability of the blocks of the breakwater's armour layer was assessed, the overtopping of the structure was quantified, as well as the mean overtopping flow of the four SSG device's reservoirs, the pressure at the exit of the OWC chamber was measured and the oscillation of the water's free surface inside the OWC chamber was evaluated.

The conducted studies enabled the definition of an optimized geometry of the device's SSG component for the wave conditions near the port of Leixões, the estimation of its energy production and the assessment of the breakwater's effectiveness with the hybrid wave energy converter applied. An SSG device with four reservoirs led to the best overall efficiency, and the application of the hybrid device to the breakwater neither reduced its functionality nor its stability.

Future works will seek to study and optimize the joint energy production of both technologies in the same device, as to better evaluate the benefits of the hybridization.

**KEYWORDS:** wave energy, SSG, OWC, port of Leixões, WOPSim.



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. CONSUMO DE ENERGIA .....	1
1.2. O PROJETO SE@PORTS .....	5
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	10
<b>2. ESTADO DA ARTE</b> .....	11
2.1. INTRODUÇÃO .....	11
2.2. APROVEITAMENTO DA ENERGIA DO MAR .....	11
2.2.1. ENERGIA SOLAR .....	12
2.2.2. ENERGIA EÓLICA .....	15
2.2.3. ENERGIA DAS MARÉS .....	17
2.2.4. ENERGIA DO GRADIENTE TÉRMICO .....	19
2.2.5. ENERGIA DO GRADIENTE DE SALINIDADE .....	20
2.2.6. ENERGIA A PARTIR DE MICROALGAS E MACROALGAS .....	20
2.2.7. ENERGIA DAS ONDAS .....	22
2.3. SISTEMAS DE APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS .....	24
2.3.1. COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE .....	24
2.3.1.1. Dispositivo Oceanlinx .....	25
2.3.1.2. O caso de Mutriku .....	26
2.3.2. CORPO OSCILANTE .....	29
2.3.3. DISPOSITIVOS POR GALGAMENTO .....	32
2.3.3.1. Wave Dragon .....	33
2.3.3.2. Seawave Slot-Cone Generator .....	35
2.3.4. SISTEMAS HÍBRIDOS .....	45
<b>3. CASO DE ESTUDO</b> .....	49
3.1. OBRA DE PROLONGAMENTO DO QUEBRAMAR NORTE DO PORTO DE LEIXÕES .....	49
3.2. PRÉ-DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA HÍBRIDO A ESTUDAR .....	50
3.3. OTIMIZAÇÃO DO DISPOSITIVO POR GALGAMENTO .....	52
3.3.1. INTRODUÇÃO .....	52
3.3.2. CARACTERIZAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA E DOS NÍVEIS DE ÁGUA .....	53

3.3.3. OTIMIZAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS – NÚMERO E COTAS DE ENTRADA.....	59
3.3.3.1. Sem consideração da maré.....	59
3.3.3.2. Com inclusão da maré.....	63
3.3.4. TURBINAS.....	65
3.3.5. COMPRIMENTO DOS RESERVATÓRIOS .....	72
3.3.6. ESTRATÉGIA DE TURBINAMENTO .....	73

## **4. ESTUDO EXPERIMENTAL**..... 77

### **4.1. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL** ..... 77

### **4.2. EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO** ..... 79

#### 4.2.1. SONDAS HIDRODINÂMICAS ..... 79

#### 4.2.2. SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CAUDAIS ..... 80

#### 4.2.3. MEDIÇÃO DA PRESSÃO ..... 85

#### 4.2.4. PERFILADOR 2D..... 85

#### 4.2.5. REGISTO EM VÍDEO DOS TESTES ..... 86

### **4.3. MODELO FÍSICO**..... 87

### **4.4. TESTES EXPERIMENTAIS** ..... 90

#### 4.4.1. PLANO DE TESTES..... 90

#### 4.4.2. SETUP EXPERIMENTAL..... 93

#### 4.4.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL..... 96

### **4.5. RESULTADOS** ..... 98

#### 4.5.1. DESEMPENHO ESTRUTURAL..... 99

##### 4.5.1.1. Série 1 ..... 99

##### 4.5.1.2. Série 3 ..... 103

##### 4.5.1.3. Comparação das duas soluções ..... 105

#### 4.5.2. DESEMPENHO FUNCIONAL ..... 107

##### 4.5.2.1. Série 1 ..... 107

##### 4.5.2.2. Série 3 ..... 108

##### 4.5.2.3. Comparação das duas situações ..... 109

#### 4.5.3. DESEMPENHO DO DISPOSITIVO..... 111

##### 4.5.3.1. Série 2 ..... 111

##### 4.5.3.2. Série 2W ..... 118

## **5. SÍNTESE E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**..... 123

### **5.1. SÍNTESE**..... 123

### **5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS** ..... 125

## **ANEXOS**.....137

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo mundial de energia elétrica entre 1990 e 2016 (Enerdata, 2017).....	1
Figura 2 – Geração de energia elétrica a nível mundial por fonte (U.S. Energy Information Administration, 2017a). .....	2
Figura 3 – Consumo de energia elétrica em Portugal (1994-2016) (PORDATA, 2018a).....	3
Figura 4 – Emissões de dióxido de carbono provenientes da combustão de combustíveis fósseis e concentrações atmosféricas (1752-2014) (Oak Ridge National Laboratory – Carbon Dioxide Information Analysis Center, 2017).....	4
Figura 5 – CAO da ilha do Pico, Açores (Tethys, 2017). .....	6
Figura 6 – CAO integrado no quebramar do porto de Mutriku, Espanha (Ente Vasco de la Energia, 2017). .....	6
Figura 7 – Representação artística do SSG (Margheritini et al., 2006). .....	7
Figura 8 – OBREC no porto de Nápoles, Itália (Climate Innovation Window, 2017). .....	7
Figura 9 – Organização das tarefas do projeto SE@PORTS e as relações entre elas. Adaptado de SE@PORTS (2016). .....	9
Figura 10 – Tengger Desert Solar Park (MEEE Services, 2018).....	13
Figura 11 – Central de Amareleja, Moura (de la Parra et al., 2015). .....	13
Figura 12 – Kagoshima Nanatsujima Mega Solar Power Plan (Kyocera, 2013). .....	14
Figura 13 – Sungrow Huainan Solar Farm (Designboom, 2018). .....	15
Figura 14 – Capacidade geradora eólica em Portugal no período 1996-2017 (INEGI e APREN, 2017). .....	16
Figura 15 – WindFloat 1 (Wind Power Offshore, 2017). .....	17
Figura 16 – Usine Marémotrice de la Rance, na Bretanha (L'Usine Nouvelle, 2017). .....	18
Figura 17 – Diferencial de temperatura da água entre os 20 e os 1000 m de profundidade (Ocean Energy Systems, 2011).....	19
Figura 18 – Processo de conversão de biomassa a partir de microalgas simplificado. Adaptado de Milano et al. (2016). .....	21
Figura 19 – Comparação da energia das ondas disponível com o consumo de eletricidade por continente. As barras de erro representam o intervalo de confiança de 95 % (Gunn e Stock-Williams, 2012). .....	22
Figura 20 – Caracterização das tecnologias de aproveitamento da energia das ondas. Adaptado de Pecher e Kofoed (2017).....	24
Figura 21 – Secção transversal duma CAO. Adaptado de Medina-Lopez et al. (2015).....	25
Figura 22 – Oceanlinx Mk1 (esquerda, superior), Oceanlinx Mk2 (direita, superior) e Oceanlinx Mk3 (inferior) (Thetys, 2018). .....	26
Figura 23 – Quebramar exterior com a coluna de água oscilante no centro (primeiro plano) e porto (segundo plano) (Henriques e Falcao, 2017). .....	26
Figura 24 – Planta da zona do quebramar com a CAO (Torre-Enciso et al., 2009).....	28
Figura 25 – Secção transversal da zona do quebramar com a CAO (Torre-Enciso et al., 2009). .....	28
Figura 26 – Colocação das células de betão prefabricadas (Torre-Enciso et al., 2009). .....	29
Figura 27 – OPT PowerBuoy PB40 (Ocean Power Technologies, 2018).....	30
Figura 28 – Wavebob (Science Gallery, 2018). .....	30
Figura 29 – Seabased (Seabased, 2018). .....	30
Figura 30 – Dispositivo Pelamis ao largo da Póvoa de Varzim (Pelamis Wave Power, 2018). .....	31
Figura 31 – Crestwing (esquerda) e Dexawave (direita) em funcionamento.....	31
Figura 32 – Waveroller antes de ser colocado no fundo do mar (Portal Energia, 2016).....	32
Figura 33 – Representações do Oyster (REUK, 2018) e do Langlee (Pecher e Kofoed, 2017). .....	32
Figura 34 – Vista superior do funcionamento do TAPCHAN (Mustapa et al., 2017). .....	33
Figura 35 – Esquema do Wave Dragon tal como proposto por Erik Friis-Madsen (Nielsen e Kofoed, 1997). .....	34
Figura 36 – Protótipo do Wave Dragon instalado na Dinamarca (esquerda) e princípio de funcionamento (direita) (Wave Dragon, 2018). .....	34
Figura 37 – Representação artística do SSG (Margheritini et al., 2006). .....	35
Figura 38 – Multi Stage Turbine (Margheritini et al., 2006).....	36
Figura 39 – Esquemas e fotos da instalação experimental usada por Kofoed (2002a). .....	37

Figura 40 – Parâmetros geométricos usados para dispositivos com vários reservatórios por Kofoed (2002a).	38
Figura 41 – Parâmetros descritivos do SSG (Meinert et al., 2008).	40
Figura 42 – Captura do ecrã do programa WOPSim.	41
Figura 43 – Secção transversal do SSG-quebramar para Sines (Margheritini, 2009).	44
Figura 44 – Secção transversal do SSG-quebramar para Swakopmund (Margheritini, 2009).	44
Figura 45 – Princípio de funcionamento de uma membrana flexível. Adaptado de Orphin et al. (2017).	46
Figura 46 – Dispositivo de aproveitamento da energia das ondas híbrido – CAO e dispositivo por galgamento (SE@PORTS, 2018).	47
Figura 47 – Dispositivo de aproveitamento da energia das ondas híbrido – CAO e dispositivo por galgamento (SE@PORTS, 2018).	47
Figura 48 – Dispositivo de aproveitamento da energia das ondas híbrido – Dispositivo por galgamento e membrana flexível (SE@PORTS, 2018).	48
Figura 49 – Dispositivo de aproveitamento da energia das ondas híbrido – CAO e membrana flexível (SE@PORTS, 2018).	48
Figura 50 – Vista aérea do porto de Leixões (Correio da Manhã, 2018).	49
Figura 51 – Vista em planta da solução projetada para o prolongamento do quebramar Norte do porto de Leixões com a secção onde vai ser integrado o dispositivo indicada.	51
Figura 52 – Esquema do pré-dimensionamento do dispositivo (Geometria A).	51
Figura 53 – Geometria B do sistema híbrido de aproveitamento da energia das ondas.	52
Figura 54 – Geometria C do sistema híbrido de aproveitamento da energia das ondas.	52
Figura 55 – Localizações relativas do ponto da boia de Leixões (ponto L), do ponto de cálculo do modelo de reconstituição WAM (ponto W), ambos ao largo de Leixões, e do ponto local, P – Google Earth© 2017 (LNEC, 2017).	54
Figura 56 – Distribuição conjunta de $H_s$ e $T_z$ no ponto L. Dados da boia de Leixões (LNEC, 2017).	55
Figura 57 – Distribuição conjunta de $H_s$ e $T_z$ no ponto L. Dados do ECMWF (LNEC, 2017).	55
Figura 58 – Distribuição conjunta de $H_s$ e $T_z$ no ponto P. Dados da boia de Leixões (LNEC, 2017).	56
Figura 59 – Distribuição conjunta de $H_s$ e $T_z$ no ponto P. Dados do ECMWF (LNEC, 2017).	57
Figura 60 – Distribuição conjunta de $H_s$ e $T_z$ no ponto P. Média dos dados da boia e do ECMWF.	57
Figura 61 – Energia média disponível para cada estado do mar em função da sua probabilidade de ocorrência.	58
Figura 62 – Agrupamento dos estados de mar por blocos.	60
Figura 63 – Eficiência hidráulica obtida através do WOPSim em função do número de reservatórios.	62
Figura 64 – Eficiência hidráulica em função da amplitude de maré (Vicinanza et al., 2012).	65
Figura 65 – Tipos de turbina a utilizar em função da queda e do caudal disponíveis (Gonçalves, 2016).	65
Figura 66 – Curva característica da turbina do nível mais baixo numa estrutura SSG de três níveis (Margheritini et al., 2012).	69
Figura 67 – Curva característica da turbina do nível médio numa estrutura SSG de três níveis (Margheritini et al., 2012).	69
Figura 68 – Curva característica da turbina do nível mais elevado numa estrutura SSG de três níveis (Margheritini et al., 2012).	69
Figura 69 – Resultados das simulações com o WOPSim.	71
Figura 70 – Esquema do tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP (SHRHA, 2018).	77
Figura 71 – Tanque de ondas do laboratório de hidráulica da FEUP (SHRHA, 2018).	78
Figura 72 – Sistemas de geração de agitação marítima do Laboratório de Hidráulica da FEUP (Taveira-Pinto et al., 2007).	78
Figura 73 – Sonda de níveis hidrodinâmicos pequena (superior) e grande (inferior).	79
Figura 74 – Unidade de condicionamento do sinal das sondas.	80
Figura 75 – Sistema de captação do caudal de galgamento da estrutura.	81
Figura 76 – Curva característica da bomba fornecida pelo fabricante em L/h (esquerda) e em L/s (direita).	82
Figura 77 – Curva característica real da bomba.	82
Figura 78 – Esquema explicativo do funcionamento das bombas (esquerda) e reservatório auxiliar de recolha do volume de galgamento (direita).	83
Figura 79 – Exemplo do registo numa sonda de níveis hidrodinâmicos colocada num reservatório.	83

Figura 80 – Esquema da disposição dos reservatórios auxiliares no canal criado no tanque de ondas. ....	84
Figura 81 – Saída das condutas flexíveis dos reservatórios do SSG (esquerda) e ligação aos reservatórios auxiliares (direita). ....	85
Figura 82 – Perfilador apoiado na calha sobre o canal (a), vareta (b), módulo móvel (c) e sensor (d). ....	86
Figura 83 – Perfil inicial dos fundos. ....	86
Figura 84 – Esquema da disposição das câmaras (C1 e C2) em relação ao modelo físico. ....	87
Figura 85 – Dispositivo híbrido de conversão da energia das ondas realizado em SolidWorks® (INEGI, 2018). ....	88
Figura 86 – Dispositivo de conversão da energia das ondas: configuração B. ....	88
Figura 87 – Ligação da coluna de água oscilante ao reservatório de ar auxiliar para compensar a compressibilidade do ar (esquerda) e diafragma utilizado como simulador do PTO (direita). ....	89
Figura 88 – Reservatório auxiliar para simular a compressibilidade do ar. ....	90
Figura 89 – Solução escolhida para o prolongamento do quebramar na secção onde se considera aplicar o dispositivo de aproveitamento da energia das ondas. ....	93
Figura 90 – Esquema do modelo visto da janela de visualização (sem dispositivo). ....	94
Figura 91 – Esquema do modelo visto da janela de visualização (com dispositivo, Geometria C). ....	94
Figura 92 – Esquema em planta do quebramar com o dispositivo integrado. ....	95
Figura 93 – Disposição do modelo físico para os ensaios da Série 1. Vista de cima (esquerda) e lateral (direita). ....	95
Figura 94 – Disposição do modelo físico para os ensaios da Série 2, 2W e 3 (esquerda) e ligação aos cinco reservatórios auxiliares (direita). ....	96
Figura 95 – Exemplo das séries temporais registadas por duas sondas em valores de protótipo. Sonda de registo de altura de onda (superior) e sonda de reservatório (inferior). ....	99
Figura 96 – Fotografias da evolução do manto resistente e da risberma do quebramar ao longo da Série 1. ....	101
Figura 97 – Levantamento do perfil dos fundos inicial (superior) e no final da Série 1 (inferior). ....	102
Figura 98 – Fotografias da evolução do manto resistente e da risberma do quebramar ao longo da Série 3. ....	104
Figura 99 – Levantamento do perfil dos fundos inicial (superior) e no final da Série 3 (inferior). ....	105
Figura 100 – Fotografia do quebramar após a Série 1 (esquerda) e após a Série 3 (direita). ....	106
Figura 101 – Levantamento do perfil dos fundos no final de Série 1 (superior) e no final da Série 3 (inferior). ....	106
Figura 102 – Caudal médio de galgamento da estrutura por metro de desenvolvimento da estrutura (m <sup>3</sup> /h/m) na Série 1. ....	108
Figura 103 – Caudal médio de galgamento da estrutura por metro de desenvolvimento da estrutura (m <sup>3</sup> /h/m) na Série 3. ....	109
Figura 104 – Comparação dos caudais médios de galgamento da estrutura na baixa-mar (m <sup>3</sup> /h/m) na Série 1 e na Série 3. ....	109
Figura 105 – Comparação dos caudais médios de galgamento da estrutura na preia-mar (m <sup>3</sup> /h/m) na Série 1 e na Série 3. ....	110
Figura 106 – Potência capturada para as três geometrias para $H = 1m$ em função de $T$ . ....	111
Figura 107 – Comparação da potência média total capturada por metro de desenvolvimento do dispositivo para as geometrias A, B e C. ....	113
Figura 108 – Amplitude de variação do nível da superfície livre da água dentro da câmara para $T=6s$ . ....	113
Figura 109 – Amplitude da variação da pressão média para a geometria A. ....	114
Figura 110 – Amplitude da variação da pressão média para a geometria B. ....	114
Figura 111 – Amplitude da variação da pressão média para a geometria C. ....	115
Figura 112 – Potência capturada para as três geometrias em função de $H$ . ....	116
Figura 113 – Potência capturada para as três geometrias em função de $H$ , para o período ressonante. ....	116
Figura 114 – Comparação da potência total capturada por metro de desenvolvimento para as geometrias A, B e C. ....	117
Figura 115 – Amplitude de variação do nível da superfície livre da água dentro da câmara para $H = 2 m$ . ....	117

Figura 116 – Amplitude de variação do nível da superfície livre da água dentro da câmara para $H = 3 \text{ m}$ . .....	117
Figura 117 – Amplitude de variação do nível da superfície livre da água dentro da câmara para $H = 4 \text{ m}$ . .....	118
Figura 118 – Potência capturada pelos reservatórios para todos os ensaios da Série 2W. ....	119
Figura 119 – Potência capturada pelos reservatórios para todos os ensaios da Série 2W ponderada pelas respectivas probabilidades de ocorrência. ....	120
Figura 120 – Eficiência hidráulica global do dispositivo em função da altura de onda significativa $H_s$ . .....	120



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Plano nacional de produção de energia a partir de fontes renováveis em 2020 (República Portuguesa, 2009).....	5
Tabela 2 – Estimativas do recurso teórico e extraível para países selecionados (intervalo de confiança de $\pm 95\%$ ).....	23
Tabela 3 – Estados do mar típicos da parte dinamarquesa do Mar do Norte. Os estados apresentados cobrem 85 % do tempo (Kofoed, 2002). ....	38
Tabela 4 – Estatísticas descritivas das séries de altura de onda significativa ( $H_s$ ), período médio ( $T_z$ ), e direção de onda média ( $DIR$ ) da boia (ponto L) e estimados pelo ECMWF (ponto W) (LNEC, 2017).....	54
Tabela 5 – Estatísticas descritivas das séries de altura de onda significativa ( $H_s$ ), período médio ( $T_z$ ), e direção de onda média ( $DIR$ ) no ponto P, referentes aos dados da boia (ponto L) e aos dados estimados por ECMWF (ponto W) (LNEC, 2017).....	56
Tabela 6 – Estatísticas descritivas da maré no porto de Leixões para os períodos indicados. ....	58
Tabela 7 – Frequência de ocorrência de marés no porto de Leixões.....	59
Tabela 8 – Estados de mar considerados.....	60
Tabela 9 – Cotas das cristas dos reservatórios e eficiência hidráulica associada. ....	61
Tabela 10 – Cotas das cristas dos reservatórios otimizadas impondo uma distância mínima igual a 1.25 m entre cotas de cristas dos reservatórios.....	63
Tabela 11 – Cotas das cristas dos reservatórios otimizadas impondo uma distância mínima igual a 1.25 m entre cotas de cristas dos reservatórios e uma cota mínima de 1 m para o primeiro reservatório. ....	63
Tabela 12 – Cotas das cristas dos reservatórios otimizadas impondo uma distância mínima igual a 1.25 m entre cotas de cristas dos reservatórios e uma cota mínima de 0.75 m para o primeiro reservatório. ....	64
Tabela 13 – Comparação entre as designações de turbinas usadas nesta dissertação e por Margheritini et al. (2012).....	68
Tabela 14 – Dimensões do dispositivo. ....	70
Tabela 15 – Resultados das simulações em WOPSim. ....	70
Tabela 16 – Comprimentos máximos dos reservatórios.....	72
Tabela 17 – Resultados da otimização da estratégia de turbinamento. ....	73
Tabela 18 – Curvas características das turbinas. ....	74
Tabela 19 – Resultados obtidos das simulações em WOPSim.....	75
Tabela 20 – Programa teórico de ensaios da Série 1, dimensões em protótipo. ....	90
Tabela 21 – Programa teórico de ensaios da Série 2, dimensões em protótipo (1).....	91
Tabela 22 – Programa teórico de ensaios da Série 2, dimensões em protótipo (2).....	91
Tabela 23 – Programa teórico de ensaios da Série 2, dimensões em protótipo (3).....	91
Tabela 24 – Programa teórico de ensaios da Série 2W, dimensões em protótipo.....	92
Tabela 25 – Programa teórico de ensaios da Série 3, dimensões em protótipo. ....	92
Tabela 26 – Fatores de ganho utilizados. ....	97
Tabela 27 – Altura de onda significativa gerada real e perto do quebramar na Série 1.....	100
Tabela 28 – Altura de onda significativa gerada real e perto do quebramar na Série 1.....	103
Tabela 29 – Caudais médios de galgamento da estrutura na Série 1 em valores de protótipo. ....	107
Tabela 30 – Caudais de galgamento da estrutura na Série 3. ....	108
Tabela 31 – Redução do caudal médio de galgamento pela introdução do dispositivo de aproveitamento da energia das ondas. ....	110
Tabela 32 – Altura de onda gerada real na Série 2. ....	112



## **SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS**

AGV – *Automated Guided Vehicles*

APDL – Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo

BM – Baixa-Mar

BMAV – Baixa-Mar de Águas Vivas

BOE – *Barrel of Oil Equivalent*

BRICS – Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul

CAO – Coluna de Água Oscilante

CFD – *Computational Fluid Dynamics*

DOF – *Degree Of Freedom*

ECMWF – *European Centre for Medium-range Weather Forecasts* (Centro Europeu de Previsão Meteorológica a Médio Prazo)

EDP – Energias de Portugal

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

GRG – *Generalized Reduced Gradient*

HES – *Hybrid Energy Systems*

HTF – *Heat Transfer Fluid*

I&D – Investigação e Desenvolvimento

INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

IRENA – *International Renewable ENergy Agency* (Agência Internacional para as Energias Renováveis)

JONSWAP – *JOint North Sea WAve Project*

LIMPET – *Land Installed Marine Power Energy Transmitter*

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MST – *Multi Stage Turbine*

NM – Nível Médio

NMM – Nível Médio (da água) do Mar

OBREC – *Overtopping BReakwater for the Energy Conversion*

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico

OTD – *OverTopping Device*

OTEC – *Ocean Thermal Energy Conversion*

OWC – *Oscillating Water Column*

P – Potência

PM – Preia-Mar

PMAV – Preia-Mar de Águas Vivas  
PRO – *Pressure-Retarded Osmosis*  
PTO – *Power Take-Off*  
RANS – *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*  
RED – *Reverse ElectroDialysis*  
REN – Rede Elétrica Nacional  
SHRHA – Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente  
SSG – *Seawave Slot-cone Generator*  
TAPCHAN – *TAPpered CHANnel*  
TEU – *Twenty-foot Equivalent Unit*  
TRL – *Technology Readiness Level*  
WAB – *Wave Activated Bodies*  
WEC – *Wave Energy Converter*  
WFA – *WindFloat Atlantic*  
WP – *Work Packages*  
ZEE – Zona Económica Exclusiva  
ZHL – Zero Hidrográfico Local

d – Calado  
D – Diâmetro  
f – Espaço livre ou frequência característica  
g – Aceleração da gravidade  
H – Altura de onda  
h – Queda  
HD – Distância horizontal entre reservatórios  
 $h_j$  – Queda disponível no reservatório j  
 $H_{máx}$  – Altura de onda máxima  
 $H_s$  – Altura de onda significativa  
 $H_u$  – Queda útil  
L – Comprimento  
l – Comprimento característico  
N – Velocidade de rotação

$P_{\text{crista}}$  – Potência na crista do reservatório

$P_{\text{ocorrência}}$  ou  $P_{\text{occur}}$  – Probabilidade de ocorrência

$P_{\text{onda}}$  – Potência da onda

$P_{\text{res}}$  – Potência no reservatório

$Q$  – Caudal

$q$  – Caudal médio de galgamento

$Q_{\text{in},j}$  – Caudal de galgamento que entra no reservatório  $j$

$q_{\text{ov},j}$  – Caudal médio de galgamento no reservatório  $j$

$Q_{\text{over},j}$  – Caudal que transborda do reservatório  $j$

$q_{\text{turb},j}$  – Caudal médio turbinado pela turbina associada ao reservatório  $j$

$R_{c,n}$  – Cota da crista do reservatório  $n$

$S$  – Secção

$S_t$  – Número de Strouhal

$T$  – Período de onda

$T_e$  – Período de onda energético

$T_{\text{máx}}$  – Período de onda máximo

$T_p$  – Período de onda de pico

$T_z$  – Período de onda médio

$U$  – Velocidade periférica

$v$  – Velocidade característica

$V$  – Volts

$W$  – Largura

$z$  – Cota

$\bar{h}_j$  – Queda média no reservatório  $j$

$\lambda_{d_r}$  – Coeficiente corretivo relativo ao calado da estrutura

$\eta$  – Eficiência

$\eta_{\text{hid}}$  – Eficiência hidráulica

$\eta_j$  – Eficiência da turbina associada ao reservatório  $j$

$\eta_{\text{res}}$  – Eficiência de reservatório

$\rho$  – Massa volúmica da água



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. CONSUMO DE ENERGIA

O mundo tornou-se extremamente dependente da produção de energia elétrica pois esta é necessária em grande parte das atividades humanas. Está presente na vida moderna de todos os dias, nomeadamente na iluminação, no aquecimento, nos dispositivos eletrónicos, e ainda com uma quota crescente no transporte pessoal graças ao aumento das viaturas movidas a energia elétrica. Assim, é indispensável assegurar a sua produção em quantidade suficiente e de forma sustentável, por forma a suprir as necessidades presentes e futuras.

O consumo de eletricidade no mundo tem vindo a aumentar regularmente ao longo dos anos, sendo que em 1990 este era de cerca de 10 000 TWh, e em 2016 de cerca de 20 000 TWh, duplicando em 26 anos, o equivalente a uma subida no consumo de 2,7 %/ano (Enerdata, 2017). A Figura 1 mostra a evolução do consumo de energia elétrica por região.

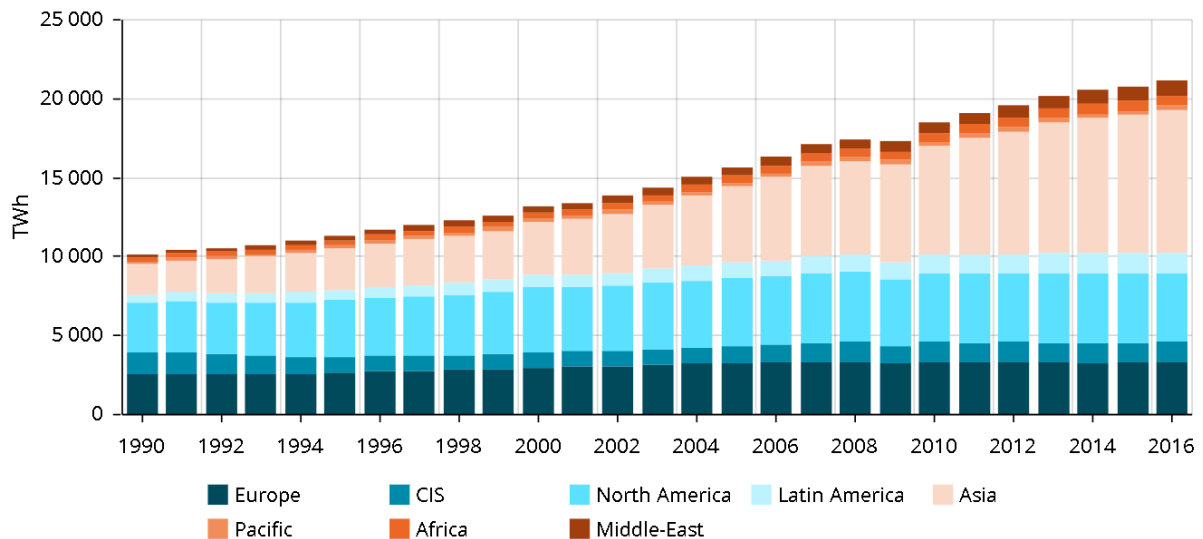


Figura 1 – Consumo mundial de energia elétrica entre 1990 e 2016 (Enerdata, 2017).

É ainda previsível que o consumo aumente cerca de 28% até 2040 (U.S. Energy Information Administration, 2017a), ou seja, 1,1 %/ano, perfazendo então um consumo mundial de cerca de 26 000

TWh. O aumento do consumo entre 2015 e 2016, após uma estabilização em 2015, é um indicador desta propensão, apesar deste aumento ter sido inferior à tendência de crescimento de longo termo. No entanto, estas previsões devem ser consideradas com cautela pois baseiam-se em conjecturas e nas opiniões, consequentemente subjetivas, de entidades da economia e da demografia. O consumo de eletricidade na China, motivado pela recuperação industrial do país e apesar da melhoria na eficiência, é responsável por mais de metade do aumento do consumo a nível mundial (Enerdata, 2017). Os países asiáticos não pertencentes à O.C.D.E. (Índia, Indonésia, Malásia, Tailândia), devido ao seu desenvolvimento económico dinâmico e à crescente eletrificação do seu território, são a segunda principal região responsável pelo aumento do consumo energético mundial (Enerdata, 2017). Não obstante, os consumos energéticos na Europa têm-se mantido estáveis, sem grandes flutuações desde 2005, em que o consumo era de 3 300 TWh, o mesmo que foi registado em 2016. Os Estados Unidos da América e o Japão apresentam mesmo uma diminuição no consumo de eletricidade, devido principalmente ao aumento da eficiência energética (Enerdata, 2017). É perceptível uma tendência para a estabilização, ou mesmo diminuição, do consumo de eletricidade nos países mais desenvolvidos, enquanto que os países em rápido desenvolvimento, nomeadamente os BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul), têm vindo a conhecer um aumento do consumo.

A fonte de energia com maior peso na geração de eletricidade a nível mundial são os combustíveis fósseis, responsáveis por 66 % da produção total de eletricidade em 2015, dos quais 40 % se devem ao carvão. A energia nuclear, também não renovável, representa 11% da produção mundial, e as energias renováveis produzem 23 % (U.S. Energy Information Administration, 2017a). Não obstante, prevê-se um aumento da produção através de energias renováveis até 2040, totalizando nessa altura cerca de 31 % da produção total. A Figura 2 mostra a divisão da produção de energia elétrica no mundo por fonte. A designação “líquidos” corresponde nomeadamente aos combustíveis líquidos derivados do petróleo, como a gasolina, o gasóleo e o gás de petróleo liquefeito (GPL), mas também a outros combustíveis líquidos não derivados do petróleo, como o biodiesel, diversos tipos de álcool e o hidrogénio líquido.

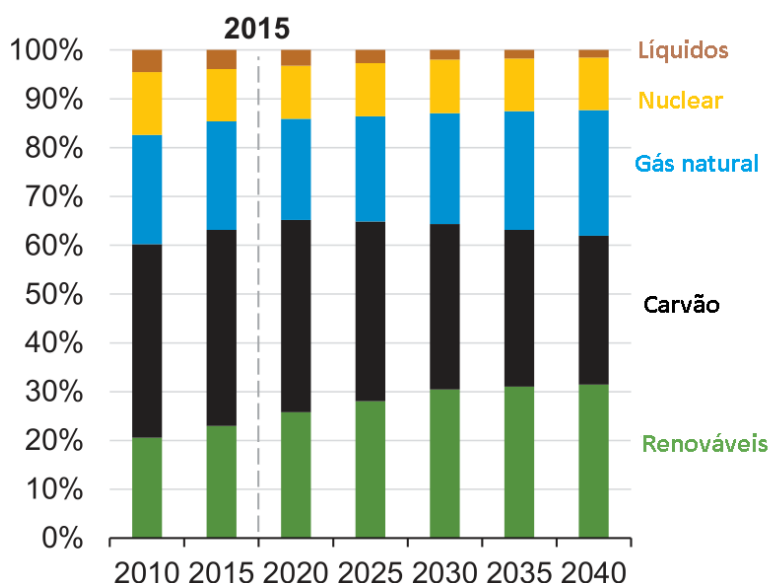


Figura 2 – Geração de energia elétrica a nível mundial por fonte (U.S. Energy Information Administration, 2017a).



As fontes de energia renovável são diversas. A nível mundial, a fonte renovável com maior quota na produção de energia elétrica é a energia hidráulica, com cerca de 72 % em 2015. A energia eólica é responsável por cerca de 13 % da produção elétrica mundial proveniente de fontes renováveis. Outras fontes significativas são a solar e a geotérmica. A *U.S. Energy Information Administration* prevê no relatório *International Energy Outlook 2017* (U.S. Energy Information Administration, 2017a) um aumento da percentagem de produção de energia através do sol e do vento entre 2015 e 2040, passando estas respetivamente de 4 % para 13 % e de 13 % para 24 %.

No cenário nacional, o consumo anual de energia elétrica manteve-se sensivelmente constante desde 2005 (47,0 TWh), tendo atingido o pico em 2010 (50,5 TWh). De 2015 para 2016 houve um aumento no consumo de 1 %, totalizando nesse ano 47,3 TWh (PORDATA, 2018a). Sem embargo, na Figura 3 é notória a tendência para a estabilização do consumo, após a subida acentuada desde 1994 até 2007.

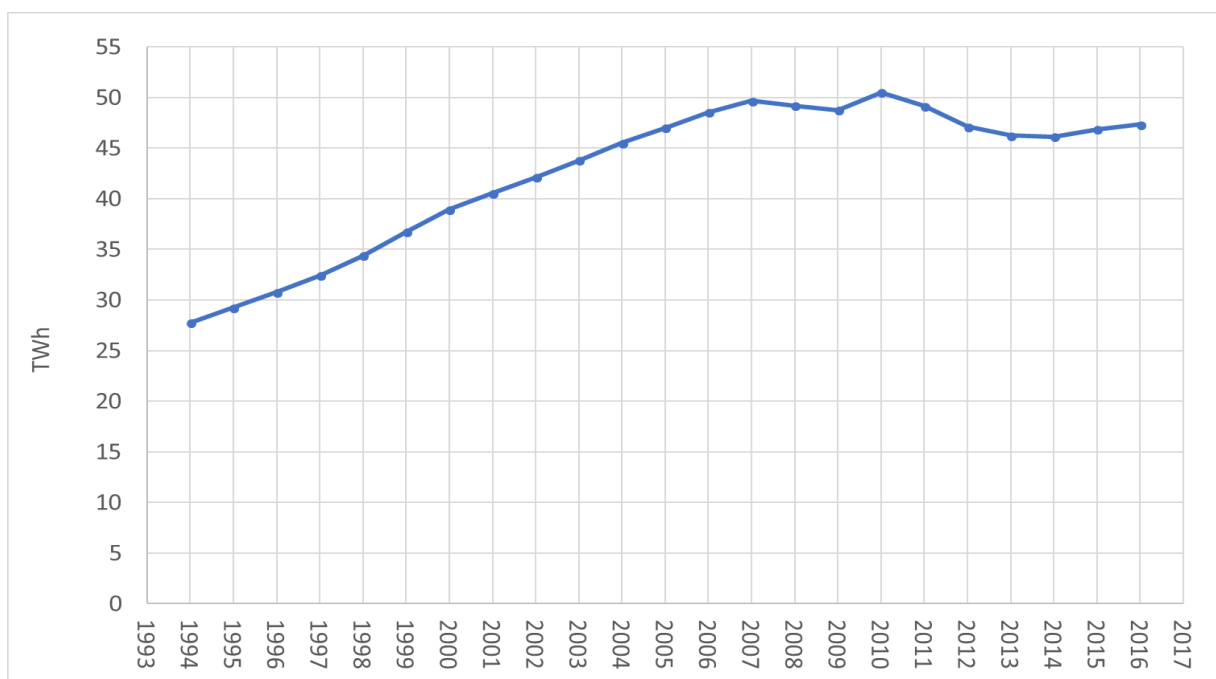


Figura 3 – Consumo anual de energia elétrica em Portugal (1994-2016) (PORDATA, 2018a).

A origem da energia elétrica em Portugal é diversa, sendo que as fontes de energia renováveis representam mais de metade da produção de energia elétrica em 2016. De entre estas, a hídrica e a eólica são preponderantes, responsáveis por 51 % e 37 % da produção de energia a partir de origens renováveis, respetivamente. A produção a partir de biomassa totaliza 9 %, sendo as outras fontes a geotérmica e a fotovoltaica com um total agregado de 3 % (PORDATA, 2018b).

Da combustão dos combustíveis fósseis advêm graves consequências ambientais, nomeadamente as emissões de dióxido de carbono. Verificou-se um crescimento muito acentuado destas emissões devido à queima de combustíveis fósseis desde o início da industrialização em grande escala, em meados do séc. XIX (U.S. Energy Information Administration, 2017b). A Figura 4 mostra esta subida acentuada.

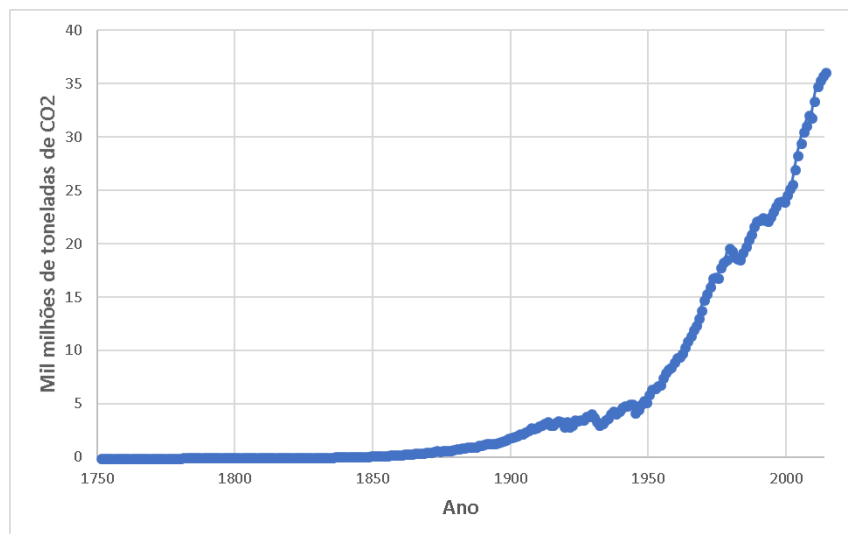


Figura 4 – Emissões de dióxido de carbono provenientes da combustão de combustíveis fósseis e concentrações atmosféricas (1752-2014) (Oak Ridge National Laboratory – Carbon Dioxide Information Analysis Center, 2017).

Estas emissões, associadas a outros fatores, são responsáveis pelas consequências nefastas que assolaram o planeta nas últimas décadas, como o aumento da temperatura média da Terra, a subida do nível médio da água do mar, o degelo dos polos e outros glaciares e o decaimento da qualidade do ar. Em resposta à crescente degradação do ambiente e dos recursos naturais, e em prol da sustentabilidade, vários países apresentaram diretivas que promovem a utilização de energias de fontes renováveis. O Parlamento Europeu lançou em 2009 uma diretiva que estipula como objetivo para a União Europeia em 2020 que pelo menos 20 % da sua energia total provenha de fontes renováveis, e ainda que 10 % da sua energia para o transporte tenha como origem fontes de energia renováveis (Parlamento Europeu, 2009). Neste contexto, cada país tem um objetivo específico em função do seu ponto de partida e do potencial geral para a utilização de energia renovável. Portugal, sendo já em 2005 um país cuja quota de energia proveniente de fontes renováveis no consumo final bruto de energia era de 20,5 %, tem como objetivo para 2020 mudar este valor para 31 %. Este é um valor bastante alto, sendo o país com o 5º objetivo mais ambicioso dos 27 Estados-Membros da União Europeia em 2009. Os países com metas mais altas são a Áustria (34 %), a Finlândia (38 %), a Letónia (40 %) e finalmente a Suécia (49 %). Para o cumprimento das metas, foi lançado o Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis ao Abrigo da Diretiva 2009/28/CE. Este plano estabelece como estratégia os valores apresentados na Tabela 1 para a produção de energia a partir de fontes renováveis em 2020.

Para além dos países da União Europeia, outros países estabeleceram metas de produção de energia através de fontes renováveis. Num discurso ambicioso, em 2011, o então presidente dos Estados Unidos da América, Barack Obama, sugeriu como objetivo para 2035 que 80 % da produção de energia elétrica dos E.U.A. viesse de energias limpas (incluindo também a nuclear, carvão limpo e gás natural, para além das renováveis) (RenewableEnergyWorld, 2011). A Dinamarca tem como meta 100 % de energia elétrica proveniente de fontes renováveis para 2050, enquanto que a Alemanha tem para o mesmo ano o objetivo de 80 %. A mais curto prazo, vários países têm diferentes metas. De referir as seguintes para 2020: Egito (20 %), Irlanda (40 %), Madagáscar (75 %), Filipinas (40 %) e Tailândia (14 %). Para 2030, o objetivo do Kuwait é de 15 %, da África do Sul de 42 % e 40 % para a Tunísia (REN21, 2013).

Tabela 1 – Plano nacional de produção de energia a partir de fontes renováveis em 2020 (República Portuguesa, 2009).

Ano	2020 (GWh)
<b>Tecnologia</b>	
Hidroelétrica	14 074
Geotérmica	488
Solar	2475
Marés, ondas, oceanos	437
Eólica	14 596
Biomassa	3 516
Total	35 584

## 1.2. O PROJETO SE@PORTS

Os quebramares portuários são estruturas projetadas para dissipar a energia das ondas que embatem sobre eles. Visam assim assegurar as condições de segurança necessárias dentro do porto que protegem, permitindo que a atividade portuária se desenrole em segurança e abrigada da agitação marítima incidente. No entanto, a enorme energia presente nas ondas não é aproveitada, originando o desperdício dum recurso valioso e inesgotável.

Devido às necessidades energéticas significativas dos portos, inerente à sua atividade, estes têm um grande interesse em reduzir os seus custos energéticos e as consequências ambientais e sociais negativas associadas à sua atividade. Este consumo energético é inevitável pois está associado à operação de equipamento portuário essencial, como pórticos de cais e trailers, à iluminação e ao aprovisionamento dos navios, indispensáveis ao bom funcionamento do porto. Consequentemente, as autoridades portuárias, nomeadamente as europeias, têm vindo a estudar a possibilidade de incorporação nas suas instalações de fontes produtoras de energia renovável, que possam suprir os seus consumos e produzir até para venda. Isto implicará também uma transição dos motores de combustão interna, correntemente utilizados, para motores elétricos. No *Wave Energy - Technology Brief* (junho de 2014), a IRENA (Agência Internacional para as Energias Renováveis) afirmou que criar sinergias com outras indústrias *offshore* seria vantajoso para a indústria da energia das ondas (PLOCAN, 2017). O relatório conclui que devem ser procuradas soluções que incluam infraestruturas que suportem a instalação, operação e manutenção de dispositivos de aproveitamento da energia das ondas (WEC's). Os três principais portos europeus (Roterdão, Antuérpia e Hamburgo) têm já instalados sistemas de geração de energia eólica e solar (SE@PORTS, 2016). O comércio entre países de todo o mundo, associado à forte globalização desde os anos 1990, levou ao aumento do tráfego marítimo e consequente aumento da atividade portuária e do consumo de recursos associado, sendo que se prevê que continue a aumentar. Assim, a integração de sistemas de conversão de energia das ondas em quebramares portuários possibilitaria facilitar a construção e reduzir os seus custos, tal como da operação e manutenção dos WEC's, enquanto permite aos portos gerar energia de forma sustentável, atenuando o seu impacto negativo no ambiente.

O projeto *SE@PORTS – Sustainable Energy at Sea PORTS* é financiado pela OCEANARA-NET *Second Joint Call 2016* e tem uma duração de 24 meses. Este projeto insere-se no *Horizon 2020*, e pretende suportar projetos inovadores de desenvolvimento científico. O *SE@PORTS* é financiado por quatro organizações, a FCT, a SODERCAN, a GOBCAN-ACIISI e a VLAIO. Conta com vários parceiros pertencentes a três diferentes países europeus, Portugal, Espanha e Bélgica, nomeadamente o

INEGI (PT), a UPorto (PT), a APDL (PT), o Fórum Oceano (PT), o IH Cantabria (ES), a PLOCAN (ES) e a IMDC (BE).

É um projeto que tem como objetivo estudar a integração de sistemas de aproveitamento da energia das ondas em quebra-mares portuários, pretendendo demonstrar que este conceito favorece tanto os sistemas de aproveitamento da energia das ondas como os quebra-mares. O projeto passa por avaliar os WEC's existentes em relação à sua aptidão a serem integrados em infraestruturas portuárias e desenvolver os conceitos selecionados para o *Technology Readiness Level* (TRL) seguinte. A partir deste estudo pretende-se desenvolver um conceito de WEC híbrido, combinando mais do que um modo de extração da energia das ondas, desenhado especificamente para ser integrado em quebra-mares de portos marítimos, aproveitando assim a sua alta exposição à agitação marítima para produzir energia. Os WEC's *onshore* existentes baseiam-se nos princípios da coluna de água oscilante (CAO), no galgamento (OTD) ou na membrana flexível (SE@PORTS, 2016).

Existem alguns projetos piloto de dispositivos para o aproveitamento da energia das ondas. As CAO da ilha do Pico, nos Açores (Figura 5), e da cidade de Mutriku, em Espanha (Figura 6), aproximam-se do TRL 8, embora a CAO da ilha do Pico tenha sido parcialmente destruída no último inverno. O *Seawave Slot-Cone Generator* (SSG) (Figura 7) encontra-se ainda no TRL 3/4 (PLOCAN, 2017). Estes protótipos, instalados com o propósito de prova de conceito em ambientes reais encontram-se, contudo, aquém dum nível de desenvolvimento que os torne economicamente interessantes para investidores privados.



Figura 5 – CAO da ilha do Pico, Açores (Tethys, 2017).



Figura 6 – CAO integrado no quebramar do porto de Mutriku, Espanha (Ente Vasco de la Energia, 2017).

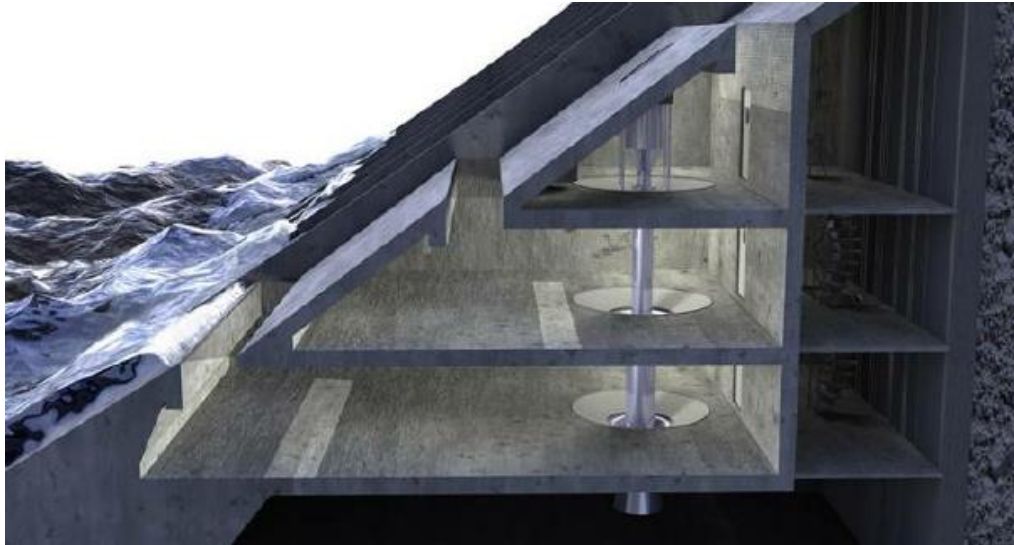


Figura 7 – Representação artística do SSG (Margheritini *et al.*, 2006).

Existem outros projetos em teste, tal como o OBREC (Figura 8) no porto de Nápoles, em Itália, que já atingiu o TRL 5 (Climate Innovation Window, 2017). À data desta dissertação o dispositivo não tem ainda nenhuma turbina instalada, embora esteja prevista a instalação de turbinas de baixa queda do tipo Kaplan nos próximos meses.



Figura 8 – OBREC no porto de Nápoles, Itália (Climate Innovation Window, 2017).

Ao combinar diversas formas de extração de energia das ondas, o novo conceito híbrido permite compensar as limitações de cada um dos métodos, potenciando uma forma eficaz e eficiente de aproveitar a energia das ondas.

O projeto divide-se em seis tarefas distintas (*Work Packages*). A primeira (WP1) corresponde à Gestão e Coordenação de Projeto e é liderado pelo INEGI, que é também o coordenador do projeto. A WP1 pretende estabelecer a comunicação entre todas as entidades envolvidas, produzir relatórios das reuniões e o relatório final do projeto.

A segunda tarefa (WP2) corresponde à Caracterização do Caso de Estudo, liderado pela PLOCAN. Os casos de estudo escolhidos são o porto de Leixões e o porto de Las Palmas, que estão protegidos pelos tipos mais comuns de quebramares, um quebramar de taludes no caso de Leixões e um quebramar vertical no caso de Las Palmas. Estes dois quebramares estão implantados a diferentes profundidades, e expostos a diferentes condições de agitação marítima e regimes de marés, o que permite fazer uma avaliação mais completa do potencial do dispositivo pois abrange diferentes condições. A WP2 permite caracterizar as condições de agitação marítima nas proximidades dos quebramares em questão.

A terceira tarefa (WP3), cujo líder é o IH Cantabria, consiste na Modelação e Otimização Numérica. O trabalho desenvolvido na presente dissertação envolve a otimização numérica do dispositivo de galgamento, e insere-se em parte nesta WP, embora o objetivo principal seja a modelação física. Nesta WP são utilizados modelos numéricos de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), que simulam a interação de fluidos e gases com superfícies definidas pelas condições fronteira. São utilizados os modelos IH2VOF e IHFOAM, ambos modelos RANS desenvolvidos pelo IH Cantabria, sendo o IHFOAM baseado no OpenFOAM®. Com esta WP pretende-se fazer um dimensionamento preliminar do WEC a utilizar e do sistema de extração da energia (PTO) procedendo-se, de seguida, a uma otimização do desempenho através da implementação de estratégias de controlo.

A quarta tarefa (WP4) refere-se à modelação física do WEC híbrido integrado no quebramar, e constitui o objetivo principal desta dissertação. O líder deste WP é a UPorto, que conta com o apoio do INEGI e do IH Cantabria para a sua concretização. Pretende-se, nesta fase, fazer uma análise experimental de alternativas para incorporar um WEC híbrido num quebramar de taludes e vertical, de forma a melhorar o seu desempenho. Também é nesta tarefa que se identifica e tenta superar as dificuldades associadas à integração dum dispositivo de conversão de energia das ondas em estruturas marítimas e portuárias, permitindo os conceitos selecionados alcançar um TRL superior. Durante os ensaios efetuados em modelo físico avalia-se também de que modo é que a incorporação dum dispositivo deste tipo num quebramar afeta a estabilidade estrutural e a funcionalidade da obra de defesa. Pretende-se construir um modelo do quebramar do porto de Leixões no Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, cujo tanque de ondas tem as dimensões 28x12x1.2 m<sup>3</sup> e um sistema de geração de agitação marítima. O INEGI fornece um modelo do WEC a ser integrado no quebramar com um sistema de PTO simplificado e instaurando estratégias de controlo, que permitem obter uma boa estimativa da energia produzida. Também se pretende construir modelos 2D de ambos os casos de estudo (porto de Leixões e porto de Las Palmas) nas instalações do IH Cantabria.

A quinta tarefa (WP5) permite desenvolver um método para a avaliação preliminar da viabilidade comercial. É liderada pelo IMDC e pretende providenciar aos utilizadores finais (por exemplo às autoridades portuárias) um guia prático para a avaliação de requerimentos técnicos chave para a integração de dispositivos de aproveitamento da energia das ondas em infraestruturas portuárias, permitindo assim uma avaliação da adequação dos seus sistemas à introdução dum WEC. Possibilita também a criação duma estrutura onde constam os WEC's mais promissores e que torna possível para os utilizadores optarem pelos WEC's mais atrativos comercialmente.

Finalmente, a sexta tarefa (WP6) tem como objetivo a disseminação do projeto *SE@PORTS* e das suas conclusões. Consegue-se assim divulgar os resultados obtidos nos estudos realizados por todas as partes interessadas, de forma a que os seus resultados sejam convenientemente explorados e aproveitados.

A Figura 9 apresenta a organização das tarefas e a relação entre elas.

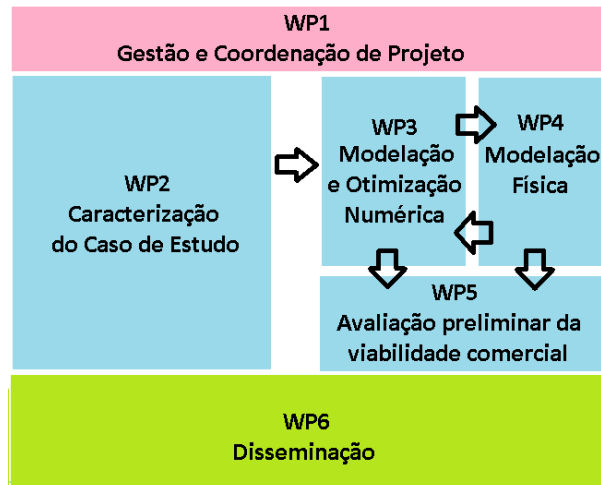


Figura 9 – Organização das tarefas do projeto *SE@PORTS* e as relações entre elas. Adaptado de *SE@PORTS* (2016).

O impacto do *SE@PORTS* é em parte assegurado pelo cariz internacional (a nível europeu) do projeto, aspeto essencial para ultrapassar dificuldades nacionais e para permitir a conceção de soluções flexíveis, facilmente adaptáveis a diversas regiões europeias. Os sete parceiros que participam no projeto são altamente qualificados, e a cooperação entre eles resulta num agregado de competências técnicas de diversos campos, o que permite produzir resultados de excelência nos diversos aspetos contemplados nesta iniciativa.

O *SE@PORTS* pretende reduzir o custo e o impacto ambiental de estruturas portuárias através da incorporação de sistemas capazes de gerar energia de forma limpa, nomeadamente a energia das ondas. Isto permitiria que as exigências energéticas que correntemente existem nos portos passassem a ser conseguidas de uma forma mais ecológica. O impacto dos portos na poluição do ar é considerável, sendo os motores a diesel a principal causa de poluição. Assim, a substituição destes motores por outros que funcionem a energia elétrica permitiria torná-los menos prejudiciais para o meio ambiente, e ainda reduzir custos da sua operação, pois a energia utilizada seria gerada no próprio porto, tornando-o assim autossustentável energeticamente. Poderia ainda tornar-se numa fonte de lucro, pois a energia em excesso que pudesse eventualmente ser produzida poderia ser vendida à rede energética do país.

A utilização de veículos elétricos em portos já acontece por exemplo na Noruega, em que o navio *MS Fjordlys* é movido a 100% por dois motores elétricos (Bostek, 2015), o *HLHA*, empresa de logística e transportes que opera três terminais de contentores em Hamburgo, utiliza 64 veículos elétricos (*HHLA*, 2018) e a *Terex Port Solutions* está a desenvolver monta-cargas *AGV's* (*Automated Guided Vehicles*) alimentados por baterias para fornecer ao porto de Roterdão (Transportweekly, 2012) (*SE@PORTS*, 2016).

Todos estes equipamentos elétricos implicam uma maior exigência energética, que poderia ser providenciada pelo WEC, apresentando vantagens a nível ecológico, económico e logístico. No futuro seria expectável ter portos marítimos a funcionar exclusivamente a energia das ondas e atuando ainda como produtores de energia elétrica, sendo todos os seus equipamentos movidos a energia elétrica.

Neste momento, não existe nenhuma tecnologia que tenha atingido um nível de maturidade que permita que uma solução sustentável de aproveitamento da energia das ondas possa ser instalada num quebramar portuário. O projeto *SE@PORTS* irá explorar a possibilidade de conjugação de mais do que uma

tecnologia em apenas um local, esperando assim ultrapassar os desafios que a utilização de apenas uma tecnologia apresenta. No desenvolvimento dum sistema híbrido espera-se que as tecnologias se completem, compensando as fraquezas de cada uma, e permitindo que juntas formem uma solução robusta e sustentável, que permita uma produção energética a partir das ondas, levando a utilização da energia azul para o próximo patamar. Finalmente, o *SE@PORTS* pretende induzir os avanços necessários para que a procura energética possa ser, em parte, respondida através duma fonte de energia até agora pouco explorada, contribuindo assim para o fim da utilização da queima de combustíveis fósseis e para um mundo mais sustentável.

### **1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

A presente dissertação divide-se em cinco capítulos. O primeiro, no qual este subcapítulo se insere, faz um enquadramento geral do âmbito deste trabalho. Inicialmente, refere-se a importância da utilização de fontes de energia renovável e os efeitos negativos decorrentes da utilização de combustíveis fósseis. De seguida, apresenta-se o projeto *SE@PORTS*, no qual este trabalho se enquadra, e faz-se uma breve descrição da sua estrutura. Finalmente, descreve-se a organização da dissertação.

No segundo capítulo é feita uma caracterização dos recursos energéticos marinhos e do seu potencial, e são referidos alguns exemplos concretos de tecnologias para o seu aproveitamento. De seguida, estuda-se mais pormenorizadamente o recurso energia das ondas e as tecnologias de aproveitamento desta existentes, aprofundando o estudo daquelas que podem ser aplicadas em quebra-mares portuários.

O terceiro capítulo apresenta o caso de estudo e descreve o pré-dimensionamento e o processo de otimização do sistema híbrido a estudar, através da simulação numérica.

O quarto capítulo apresenta o estudo experimental realizado, descrevendo as instalações, o equipamento utilizado, o modelo desenvolvido, o plano de ensaios e os resultados obtidos.

Finalmente, o quinto capítulo faz uma síntese do trabalho realizado e apresenta considerações para os desenvolvimentos futuros do tema.



# 2

## ESTADO DA ARTE

### 2.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma descrição do estado de desenvolvimento do aproveitamento da energia do mar. Inicialmente, far-se-á uma descrição geral das diferentes formas de aproveitamento da energia do mar, mencionando alguns exemplos concretos existentes. De seguida, será feita uma análise específica sobre os sistemas de aproveitamento da energia das ondas, apresentando alguns exemplos de tecnologias desenvolvidas com esse fim. Destas, dar-se-á especial enfoque às soluções de aproveitamento de energia das ondas *onshore* e integráveis em quebramares portuários, convergindo finalmente para os sistemas híbridos existentes, comparando diferentes soluções possíveis.

### 2.2. APROVEITAMENTO DA ENERGIA DO MAR

Quem vive numa zona costeira e assiste ao desenvolvimento duma tempestade, observando o embate das ondas em estruturas de proteção costeira, rochas, falésias ou mesmo infraestruturas localizadas à beira-mar, percebe que as ondas transportam uma grande quantidade de energia. Existem, no entanto, diversas outras formas de energia presentes no mar.

O conhecimento destas formas de energia não chega para que seja aproveitada e utilizada nas atividades humanas e para a produção de energia elétrica. É preciso não só conhecer, mas também compreender as características associadas a estes fenómenos, pois só assim podem ser explorados de forma viável e sustentável. Nesta questão, as ciências marítima e energética têm de trabalhar em conjunto para que, com o tempo, esta fonte de energia renovável possa contribuir para um mundo com uma produção de energia suficiente e sustentável.

Portugal possui uma das maiores Zonas Económicas Exclusivas (ZEE) do mundo. De acordo com a Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar, a ZEE é uma área adjacente ao mar territorial dum país, sobre o qual este tem prerrogativas na utilização dos recursos e responsabilidade sobre a sua gestão. Esta zona estende-se por 200 milhas náuticas a partir do limite do mar territorial (United Nations, 1982). Assim, devido à sua extensa costa no continente e aos arquipélagos da Madeira e dos Açores, Portugal possui um enorme potencial marítimo. A área total da ZEE portuguesa é de 1 721 751 km<sup>2</sup> (Pauly e Zeller, 2015), quase 20 vezes maior do que a área terrestre portuguesa, que conta 92 090 km<sup>2</sup> (CIA, 2016).

A energia do mar pode ser dividida nas seguintes formas:

- Energia solar;
- Energia eólica;

- Energia das marés;
- Energia do gradiente térmico;
- Energia do gradiente de salinidade;
- Energia a partir de microalgas/macroalgas;
- Energia das ondas.

Será de seguida feita uma breve descrição de cada tipo de energia do mar.

### 2.2.1. ENERGIA SOLAR

A energia solar é uma forma de energia conhecida e muito explorada correntemente. Esta provém da luz e do calor do Sol, e é capturada ou utilizada através de diversas tecnologias. Representa uma forma de geração de eletricidade que não produz poluição e sem risco de picos de preço devido à sua constância e ao facto de ser inesgotável. Este recurso é enorme, sendo que apenas 18 dias de sol na Terra contêm a mesma ordem de grandeza de energia armazenada em todas as reservas de carvão, petróleo e gás natural do planeta (Union of Concerned Scientists USA, 2018). Fora da atmosfera terrestre, a energia solar contém cerca de 1.3 kW/m<sup>2</sup>. No entanto, apenas uma fração chega à superfície terrestre. Em média, um metro quadrado de superfície do globo recebe 175 W, o que se traduz em cerca de 4.2 kWh de energia por dia. Em termos comparativos, um barril de petróleo (1 BOE) contém 1 628 kWh, logo um metro quadrado de energia solar pode produzir por ano a energia equivalente a um barril de petróleo. A potência instalada de energia solar a nível mundial era de 303 GW no final de 2016 (International Energy Agency, 2017).

Existem essencialmente duas formas preferenciais de utilização deste recurso: os coletores solares e os painéis fotovoltaicos. Os primeiros utilizam o calor do sol para produzir energia térmica. No passado, esta energia era utilizada essencialmente para aquecimento do ambiente e de água. Simplificadamente, para aquecer água, utiliza-se a energia solar para aumentar a temperatura de um fluido de transferência de calor (HTF – *Heat Transfer Fluid*) que passa para um sistema de armazenamento para uso posterior. Para o aquecimento do ambiente, o processo é semelhante. O ar que envolve o edifício a ser aquecido é aspirado da envolvente deste e, fazendo-o passar pelo coletor, aquece por condução térmica e é depois abastecido à zona habitável. Estes processos de aquecimento utilizam uma forma de energia gratuita e inesgotável, não sendo poluentes para o meio-ambiente, e representam assim uma forma sustentável de aquecimento da água e habitacional. Estes aquecimentos deixariam de ser feitos através de outras formas, nomeadamente elétrica, que dependendo da origem da eletricidade pode ser prejudicial para o meio-ambiente, e aligeirando assim a rede elétrica para poder suprir mais facilmente as outras necessidades energéticas.

Os painéis fotovoltaicos permitem a produção de eletricidade e baseiam-se no efeito fotovoltaico. Este efeito fotovoltaico, um processo que gera corrente elétrica numa célula fotovoltaica quando exposta à luz solar, representa o princípio de funcionamento dos painéis fotovoltaicos e ocorre em células solares.

É assim possível gerar energia elétrica através da energia solar, que representa uma fonte sustentável e inesgotável. Existem já inúmeras aplicações de painéis fotovoltaicos quer a nível particular quer a nível comercial. Uma central solar fotovoltaica é um sistema de larga escala que utiliza um conjunto de painéis fotovoltaicos para gerar eletricidade abastecida à rede elétrica. A primeira central deste tipo foi construída em 1982 em Lugo, Califórnia, pela empresa Arco Solar, com uma capacidade de 1 MW<sub>p</sub> (MWatt-pico) (Arnett *et al.*, 1984). Desde então, vários países investiram fortemente nestas centrais, nomeadamente a Alemanha e Espanha, e mais recentemente a China e a Índia. Em 2008 foi construído em Olmedilla de Alarcón, Espanha, a maior central do mundo da altura, com uma capacidade instalada

de 60 MW (Telegraph, 2018). Em Portugal, a central de Amareleja, Moura, era segundo a empresa que a instalou, Acciona Energy, a maior do género no mundo (Solar Industry, 2018). Não obstante, a sua capacidade instalada era de 46 MW, menos 14 MW do que a construída no mesmo ano em Espanha. Neste momento, as sete maiores instalações deste tipo são na China e na Índia, e as dezasseis maiores são na China, na Índia e nos Estados Unidos da América. A maior do mundo, o Tengger Desert Solar Park, encontra-se localizada no deserto de Tengger, na China. A Figura 10 mostra o Tengger Desert Solar Park e a Figura 11 a central de Amareleja.



Figura 10 – Tengger Desert Solar Park (MEEE Services, 2018).



Figura 11 – Central de Amareleja, Moura (de la Parra *et al.*, 2015).

Todas as aplicações previamente referidas foram feitas *onshore*, não se relacionando assim com a energia do mar. Sem embargo, o interesse por instalações de captação da energia solar *offshore* estão a ganhar cada vez maior interesse, havendo mesmo já alguns projetos para a sua execução. Este interesse justifica-se, pois existem no alto mar vastas áreas que não têm qualquer tipo de utilização, poupando-se

assim espaço terrestre e reduzindo os impactes visuais originados por estas instalações. A Europa tem especial interesse devido à sua alta densidade populacional. Estudos revelam ainda que há um aumento de eficiência de entre 1.58 % e 2 % devido ao efeito de arrefecimento dos sistemas fotovoltaicos flutuantes comparativamente a sistemas terrestres tradicionais (Liu *et al.*, 2017). As desvantagens são as dificuldades de construção e manutenção, de ligação às redes elétricas e o ambiente marítimo agressivo para os componentes. Foi também estudado o desempenho duma instalação solar flutuante para o Mar Mediterrâneo, focando-se o estudo no movimento da plataforma e no ângulo de incidência solar (Diendorfer *et al.*, 2014). Neste estudo foi desenhada uma plataforma que reduz ao máximo o movimento devido às ondas, de tal forma que a influência deste movimento na eficiência pode ser desprezada. Neste momento existem já instalações solares flutuantes, mas apenas em lagos artificiais. Em 2013 foi inaugurada a Kagoshima Nanatsujima Mega Solar Power Plant, uma estação fotovoltaica situada numa plataforma de terra ganha ao mar. Esta plataforma, que a IHI Corporation pretendia utilizar como estaleiro naval, tem agora instalados 70 MW de capacidade de produção energética e ocupa uma área de 1.27 km<sup>2</sup> (Kyocera, 2013). A Figura 12 mostra uma vista aérea desta instalação.



Figura 12 – Kagoshima Nanatsujima Mega Solar Power Plan (Kyocera, 2013).

Na China, mais precisamente em Huainan, na província de Anhui, encontra-se operacional a maior instalação solar flutuante, a Sungrow Huainan Solar Farm. Esta encontra-se localizada num lago, numa zona que anteriormente era usada para exploração mineira, mas que devido a fortes chuvas e assentamentos ficou inundada. Tem uma capacidade instalada de 40 MW. A Figura 13 mostra a instalação.



Figura 13 – Sungrow Huainan Solar Farm (Designboom, 2018).

No entanto, é na Europa que está prevista a instalação da primeira central solar flutuante no oceano. Os Países Baixos pretendem transformar uma aquacultura de algas *offshore* numa central solar. Existe um projeto piloto que pretende estudar ainda no verão de 2018 o comportamento de 30 m<sup>2</sup> de painéis solares a 15 km da costa da cidade de The Hague, que será investigado pela Universidade de Utrecht. Se o teste correr bem, prevê-se que a central esteja funcional dentro de três anos. Wilfried van Sark, professor de energia solar na Universidade de Utrecht, afirmou que “Há mais Sol no mar e há ainda o benefício dum sistema de refrigeração para os painéis, o que aumenta a produção até 15 %”, e que é expectável que a energia solar *offshore* seja mais barata do que a energia eólica *offshore* e que a energia solar *onshore*, nomeadamente devido à ausência de custos com a compra de terrenos para a instalação dos sistemas (Reuters, 2018).

#### 2.2.2. ENERGIA EÓLICA

A energia eólica já é, atualmente, bastante explorada, quer no mar, quer em terra. No entanto, a exploração deste tipo de energia no mar pode trazer inúmeras vantagens, nomeadamente a nível de impacto visual e de gestão do espaço. A opção de colocar os dispositivos de captação de energia em alto mar permite contornar alguns problemas, mas traz outros, nomeadamente a questão da manutenção e das ligações à rede elétrica em terra. Não obstante, estas alternativas estão já a ser exploradas, e prevê-se um crescimento forte da produção de energia elétrica a partir da energia eólica ao largo.

No final de 2017, a potência instalada de energia eólica a nível mundial era de 539 GW, sendo que neste último ano foram instalados no mundo 52 GW. Apenas na China a capacidade total é de 188 GW, enquanto que a Europa chega aos 178 GW. Destes 178 GW, 16 GW (10 %) são provenientes de instalações *offshore*. Não obstante, em 2017 foram instalados 15.6 GW de potência eólica na Europa, dos quais 3.1 GW (20 %) são *offshore*, apresentando uma tendência para o aumento das soluções ao largo, e demonstrando uma aposta forte da Europa nesta tecnologia, decorrente da sua grande falta de espaço em terra para a produção de energia. A nível mundial estão instalados 19 GW em energia eólica *offshore*, sendo a Europa responsável por 84 %. O ano de 2017 foi um ano recorde para a energia eólica, tendo havido um aumento de instalações novas de 87 % em relação a 2016, e representando um incremento de 30 % em capacidade cumulativa. O preço do kWh em vários locais tal como Marrocos, Índia, México e o Canadá é de cerca de 0.03 €/kWh (Global Wind Energy Council, 2017).

Em Portugal, 21 % da energia consumida é gerada através de energia eólica (PORDATA, 2018b), sendo que a potência instalada é de 5.3 GW (Global Wind Energy Council, 2017). Esta começou a ser aproveitada em 1985 quando foi construído o primeiro parque eólico do país na ilha do Porto Santo, no arquipélago da Madeira (INEGI e APREN, 2014) (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2015). Desde então Portugal tem apostado fortemente na energia eólica. Na Figura 14, que mostra a capacidade geradora eólica em Portugal, observa-se um crescimento muito forte da capacidade geradora instalada em Portugal no século XXI. Não obstante, nota-se uma tendência de diminuição deste crescimento, tendo mesmo havido uma diminuição de 2016 para 2017.

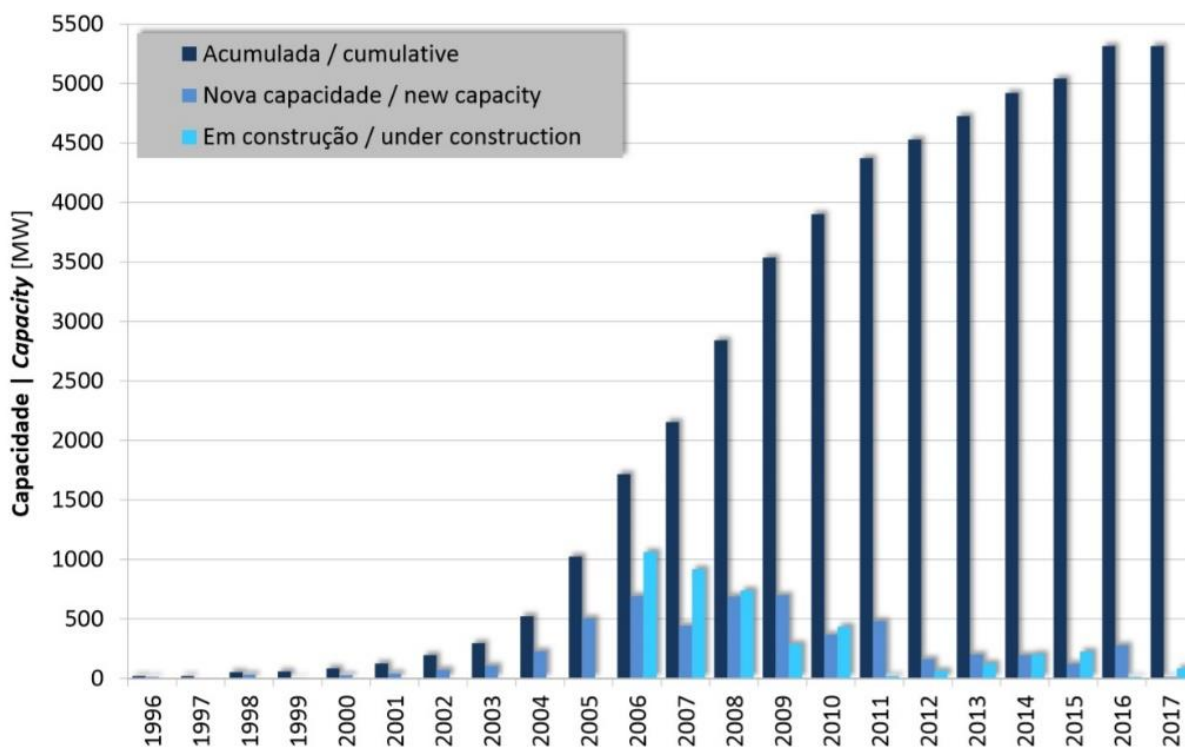


Figura 14 – Capacidade geradora eólica em Portugal no período 1996-2017 (INEGI e APREN, 2017).

Está planeada a instalação dum parque eólico *offshore* ao largo de Viana do Castelo, o *WindFloat Atlantic* (WFA), numa zona com uma profundidade de água da ordem dos 100 m. Convém referir que entre 2011 e 2016 foram feitos testes, perto da Aguçadoura, com uma plataforma que incluía uma turbina de 2 MW, que permitiram testar a robustez da instalação, tendo esta estado submetida a ondas com mais de 17 m de altura e ventos de velocidade superior a 110 km/h. Estas tempestades, de magnitude muito considerável, não comprometeram a capacidade de produção da turbina eólica assente na plataforma flutuante ao largo da costa portuguesa (Expresso, 2016). Durante esta fase de testes, o *Windfloat* produziu mais de 17 GWh de eletricidade, por vezes com estados de agitação marítima com alturas de onda significativas superiores a 7 m. No verão de 2016, o *Windfloat 1* foi retirado de funcionamento, com impacte reduzido no ambiente (EDP, 2018). A Figura 15 mostra o protótipo em funcionamento.



Figura 15 – *WindFloat 1* (Wind Power Offshore, 2017).

Tendo a fase de testes sido bem-sucedida, o projeto terá continuação mais a norte, a 20 km da costa de Viana do Castelo, onde serão instaladas três plataformas cada uma com uma turbina eólica de 8 MW, perfazendo um total de cerca de 25 MW, tornando-se na primeira central eólica *offshore* instalada em Portugal. Estas plataformas estarão amarradas ao fundo do mar, e a sua estabilidade será assegurada através dum sistema de comportas que se enchem de água na base dos três pilares da estrutura, associadas a um sistema de lastro estático e dinâmico (Noctula, 2018). O projeto, coordenado pela EDP através da EDP Renováveis, é desenvolvido por um consórcio composto pela *Principle Power* (empresa que desenvolveu a tecnologia *Windfloat*), a *Mitsubishi Corporation*, a *Chiyoda Corporation*, a Engie e a Repsol, e terá financiamentos através de fundos de I&D nacionais e europeus, ao abrigo do programa de financiamento NER 300 e do Fundo Português de Carbono. Este é o primeiro projeto no mundo de instalação de turbinas eólicas ao largo que não implica a utilização de pesados sistemas de construção e montagem no mar. No início de 2018 o Governo avançou com o alargamento da zona piloto para energias renováveis oceânicas, incluindo a Aguçadoura, de forma a viabilizar o desenvolvimento do projeto (Diário de Notícias, 2018). Uma das dificuldades do projeto era a instalação do cabo submarino que liga o sistema *Windfloat* à rede elétrica nacional. A REN – Rede Elétrica Nacional, previu a construção dum cabo com capacidade até 80 MW de potência, de forma a acautelar futuros empreendimentos, que se prevê que venha a ter um custo de 48 milhões de euros. Sem embargo, foi fechado no final de abril de 2018 o acordo entre a REN e o Governo português para a sua construção (Jornal de Negócios, 2018), e que permitirá avançar com o projeto *Windfloat*, de forma a este estar concluído e a produzir energia em 2019.

### 2.2.3. ENERGIA DAS MARÉS

O aproveitamento da energia das marés, ou energia maremotriz, é uma forma de energia hídrica. A maré é um efeito das forças atrativas da Lua e do Sol, que provoca uma oscilação periódica do nível das águas dos oceanos (Fisheries and Oceans Canada, 2018). Este fenómeno é constante e facilmente previsível, o que o torna atrativo do ponto de vista energético.

Esta variação de nível da água já era usada há mais de mil anos para operar moinhos na Europa. Hoje, já é possível utilizar a energia das marés para gerar eletricidade, fazendo rodar uma turbina hidráulica

adequada. É, no entanto, necessária uma amplitude de maré grande e a possibilidade de construção de uma barragem de maré para que seja economicamente viável a produção de energia (École Nationale Supérieure de Paris, 2018), o que restringe a um número limitado as localizações em que esta energia poderá ser interessante de explorar. França, Canadá, Inglaterra e Rússia são países que têm um grande potencial de aproveitamento deste tipo de energia (U.S. Energy Information Administration, 2017c).

A Usine Marémotrice de la Rance, na Bretanha, foi a primeira central do mundo a utilizar a energia das marés para produzir eletricidade (Ouest France, 2016). Esta tem um comprimento de 390 m e uma capacidade instalada de 240 MW, e aproveita uma amplitude média de maré de 8 m, chegando por vezes aos 13.5 m (École Nationale Supérieure de Paris, 2018). Serve também de ponte de ligação entre as duas margens, Figura 16. Os custos de construção foram elevados devido ao carácter inédito da instalação, mas foram já recuperados e o custo de produção de energia pela central é já inferior ao preço da produção por central nuclear (0.016 €/kWh contra 0.022 €/kWh) (Wyre Tidal Energy, 2018). Inaugurada em 1967, foi a maior do mundo até 2011, ano em que foi ultrapassada pela Sihwa Lake Tidal Power Station, na Coreia do Sul, com 254 MW instalados.



Figura 16 – Usine Marémotrice de la Rance, na Bretanha (L'Usine Nouvelle, 2017).

Apesar das dificuldades inerentes a este tipo de exploração, existem algumas grandes centrais maremotrizes no mundo. Para além das duas que foram já referidas, existe a Annapolis Royal Generating Station, no Canadá, com uma capacidade instalada de 20 MW e produzindo 50 GWh de eletricidade anualmente. Até à data estas são as três maiores centrais maremotrizes existentes no mundo. No entanto, existem grandes projetos deste tipo em execução. Na Grã-Bretanha estão em estudo mais duas: o Swansea Bay Tidal Lagoon, no Reino Unido, e o MeyGen Tidal Energy Project, na Escócia. Estes dois projetos, com respetivamente 240 MW e 86 MW, testemunham a forte aposta da Grã-Bretanha na energia do mar, sendo que a central escocesa é o maior projeto de turbina de maré submarina do mundo (Power Technology, 2014). Este aproveita as fortes correntes causadas pelo caudal que circula entre o Mar do Norte e o Oceano Atlântico para gerar energia através de turbinas ancoradas ao leito do oceano. Numa fase posterior, pretende-se aumentar a capacidade desta central até 398 MW (Atlantis Resources Ltd, 2018). O projeto de Swansea Bay é a primeira lagoa de marés do mundo. Esta assemelha-se a um quebramar fechado, criando assim uma lagoa com um nível de água diferente do mar, e permitindo a geração de energia (Tidal Lagoon Power, 2018).



Existe ainda um projeto para uma lagoa de marés com uma capacidade de 1 320 MW em Incheon, Coreia do Sul. No entanto, este foi cancelado devido a questões ambientais em 2012, e ainda não se sabe se será retomado. A ser completado, esta seria a maior lagoa de marés do mundo, com uma capacidade de cerca de cinco vezes maior do que a Sihwa Lake Tidal Power Station, também na Coreia do Sul.

Em Portugal, foi colocado no verão de 2017 um protótipo na Ria Formosa para aproveitar a energia das marés. Este projeto levado a cabo pela Universidade do Algarve pretende obter dados do desempenho do dispositivo de forma a poder validar modelos hidrodinâmicos e estimar a produção de energia à escala comercial, e assim avaliar a capacidade de extração de energia das marés no local (TSF, 2017) (Sul Informação, 2017).

#### 2.2.4. ENERGIA DO GRADIENTE TÉRMICO

A temperatura dos oceanos difere em alguns sítios, entre a superfície e as zonas mais profundas, em mais de 20°C. Este diferencial de temperatura pode ser aproveitado para gerar energia elétrica. A diferença de temperatura para que seja possível utilizar esta energia térmica tem de ser de pelo menos 20°C. Ora, a temperatura da água dos oceanos em profundidade tende a ser relativamente constante, rondando os 4°C, sem variar muito entre diferentes locais nem entre estações. No entanto, a temperatura da água à superfície varia consideravelmente dependendo do local. A Figura 17 mostra um mapa onde se pode ver quais os locais com maior diferença térmica.

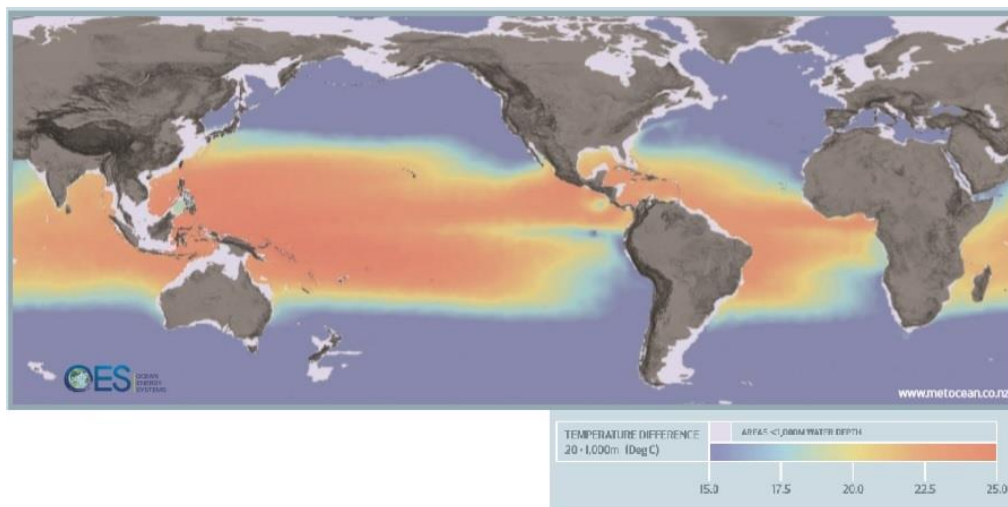


Figura 17 – Diferencial de temperatura da água entre os 20 e os 1000 m de profundidade (Ocean Energy Systems, 2011).

Quanto maior a diferença de temperatura, maior será a capacidade de geração de energia. A Figura 17 mostra que é nas latitudes tropicais que existe um maior potencial teórico explorável. O potencial energético da energia térmica do oceano foi estimado em 10 TW, ou 85 000 TWh/ano (Pelc e Fujita, 2002). Existem três sistemas para a produção de eletricidade:

- Sistema OTEC de ciclo fechado;
- Sistema OTEC de ciclo aberto;
- Sistema híbrido dos dois anteriores.

O sistema OTEC de ciclo fechado utiliza a água superficial quente do mar para aquecer e vaporizar um líquido, com um ponto de ebulição baixo, como a amónia. O vapor de alta pressão gerado faz acionar uma turbina conectada a um gerador elétrico. O vapor é depois arrefecido e condensado pela água fria que é bombeada do fundo do oceano.

O sistema OTEC de ciclo aberto utiliza diretamente água quente superficial como fluido. A alteração de pressão numa câmara de vácuo faz com que a água seja evaporada. De seguida, o vapor é condensado utilizando a água fria bombeada do fundo do oceano. A constante vaporização e condensação faz acionar uma turbina. Pode ainda ser obtida água dessalinizada como subproduto deste mecanismo.

Esta tecnologia ainda não está num estado de maturidade que permita a exploração comercial desta fonte de energia, e conseqüentemente não há instalações com este objetivo. Existem, no entanto, algumas instalações com o objetivo de estudar a viabilidade desta, como a Okinawa Prefecture Ocean Thermal Energy Conversion Power Demonstration Project, no Japão (Okinawa Renewable Energy for the Future, 2018), ou a NEMO - New Energy for Martinique and Overseas, na Martinica (Akuo Energy, 2018).

#### 2.2.5. ENERGIA DO GRADIENTE DE SALINIDADE

A energia do gradiente de salinidade, ou energia osmótica, aproveita a diferença de energia interna entre a água salgada e a água doce para produzir energia elétrica. Este recurso pode ser explorado na foz dos rios, onde a água salgada encontra a água doce. Este tipo de energia foi identificada pela primeira vez em 1950, é renovável e está diretamente ligada ao ciclo da água (Schaetzle e Buisman, 2015). Existem dois processos práticos que chegaram à fase piloto, a eletrodialise invertida (RED – Reverse Electrodialysis) e a osmose a pressão retardada (PRO – Pressure-Retarded Osmosis). Ambos os processos são baseados na osmose com membranas. Um estudo mostrou que a energia máxima extraível da osmose a pressão retardada com pressão constante é de 0.81 kWh/m<sup>3</sup>, o que corresponde a uma eficiência de 91.1 % (Yip e Elimelech, 2012). No entanto, como o sistema de PRO é muito sensível à colmatção da membrana, a empresa que desenvolvia o estudo desta tecnologia deixou de a explorar, visto que o seu custo não lhe permitia ser competitiva (Schaetzle e Buisman, 2015). Existe atualmente um projeto que estuda o método RED, com uma instalação piloto em Afsluitdijk, numa barragem nos Países Baixos, onde a água salgada e doce estão separadas por um açude com 90 m de largura.

À escala mundial, estima-se um potencial de energia osmótica teórico entre 1.4 TWh/ano e 2.6 TWh/ano (Schaetzle e Buisman, 2015). No entanto, existem ainda diversas dificuldades associadas à sua exploração que têm de ser tratadas antes desta fonte de energia se tornar competitiva. Paralelamente ao desenvolvimento do método RED, existem ainda outras tecnologias em estudo, tais como condensadores (Brogioli, 2009) e baterias de água salgada (Sales *et al.*, 2010). Embora ainda num estado pouco desenvolvido, a produção de energia baseada em gradientes está a tornar-se cada vez mais estudada e apresenta um potencial significativo para se tornar numa fonte energética apelativa e capaz de contribuir para a procura energética mundial.

#### 2.2.6. ENERGIA A PARTIR DE MICROALGAS E MACROALGAS

Esta fonte de energia refere-se à produção de biocombustíveis através de micro e macroalgas. Não gera diretamente energia elétrica, mas as microalgas têm um grande potencial na produção de biocombustível a nível industrial (INEGI *et al.*, 2012).

As macroalgas são geralmente obtidas a partir de habitats naturais ou culturas próximas da costa, enquanto que as microalgas são maioritariamente provenientes de produções artificiais. As primeiras já

são utilizadas para produção de biocombustível desde 1893, quando o químico britânico Edward Curtis produziu biogás a partir de macroalgas para alimentar sistemas de iluminação. Sem embargo, nomeadamente desde o *boom* do preço do petróleo nos finais dos anos 1990, a utilização de biocombustível em detrimento de combustíveis fósseis ganhou atenção crescente (Jiang *et al.*, 2016). No entanto, a utilização de macroalgas para a produção de biocombustível ainda está num estado embrionário (Tan e Lee, 2015).

A produção de biocombustível a partir de microalgas é uma forma de armazenamento da energia solar, pois estas transformam-na em energia química, através de fotossíntese, que fica armazenada nas microalgas. As microalgas têm uma taxa de crescimento alta, maior do que as plantas, e têm requerimentos de nutrientes simples, o que torna possível o seu cultivo em áreas que não são normalmente utilizadas para agricultura comum (Milano *et al.*, 2016). Os biocombustíveis obtidos a partir da cultura de microalgas podem ser utilizados para substituir os combustíveis fósseis, quer como fonte de energia para os motores de combustão interna, quer para a produção de eletricidade.

Para a conversão de microalgas e macroalgas em biocombustível é necessário fazer a seleção do tipo de alga da qual se vai fazer cultura, baseado nas condições locais. De seguida, passa-se à produção em culturas abertas *onshore* ou *offshore*, ou culturas fechadas em ambientes controlados, mas mais dispendiosas. Passa-se então à colheita, cujo processo é escolhido em função das características das algas. Finalmente, o processamento pode ser feito por conversão química, bioquímica ou termoquímica, conforme se pode ver na Figura 18 sendo que os produtos finais dependem do processo utilizado.

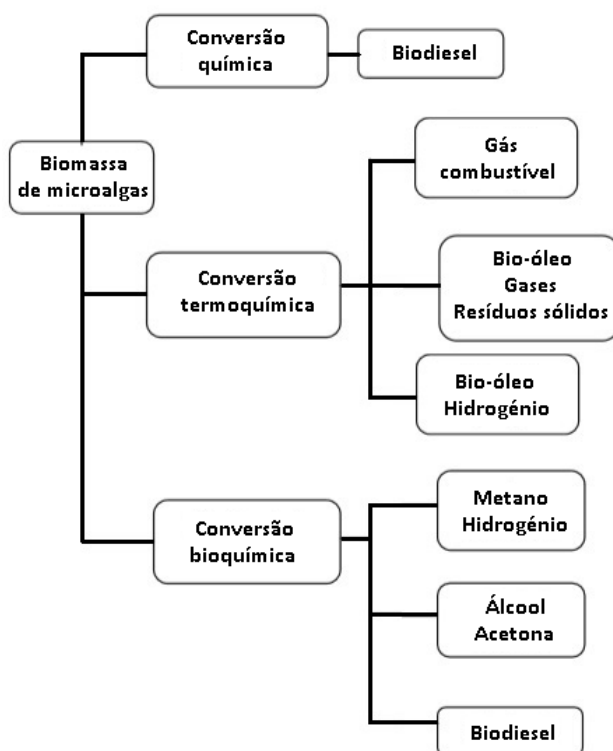


Figura 18 – Processo de conversão de biomassa a partir de microalgas simplificado. Adaptado de Milano *et al.* (2016).

### 2.2.7. ENERGIA DAS ONDAS

É possível aproveitar a energia das ondas graças a conversores de energia das ondas (WEC's). A energia das ondas total disponível a nível mundial foi estimada por Gunn e Stock-Williams (2012) utilizando o modelo global NOAA WaveWatch III. Este modelo numérico permite estimar o estado do mar a partir de informações providenciadas por boias ou satélites, que caracterizam pontualmente as condições marítimas. Tendo por base estes dados, o modelo faz a propagação das condições de acordo com a conservação da ação da onda, considerando a propagação das ondas e fenómenos como a refração e o emolamento. O resultado é uma descrição do espectro da onda, com amplitudes associadas a cada frequência e direção de propagação. Geralmente, estes dados são resumidos através da altura de onda significativa, do período da onda e da direção de propagação dominante, parâmetros de saída utilizados por Gunn e Stock-Williams. Devido à resolução que o modelo permite, a linha de costa foi traçada a uma distância de 30 milhas náuticas, ou seja, 55.6 km, daquela estipulada nos dados da Natural Earth (<http://www.natureearthdata.com/>) à escala 1:50. As zonas económicas exclusivas (ZEE) de cada país foram estipuladas com base no “VLIZ. Maritime boundaries geodatabase, version 6.0” (agora disponível em [www.marineregions.org](http://www.marineregions.org)), de forma a ser estipulada a energia disponível por país. Neste estudo, por razões de escala, as ilhas de menores dimensões foram excluídas, tais como certas zonas no Ártico e na Antártida onde não há interesse na extração de energia. O estudo conclui que o recurso global disponível é de  $2.11 \pm 0.05$  TW. A Figura 19 apresenta a comparação entre a energia das ondas disponível por continente e o respetivo consumo de eletricidade em 2010.

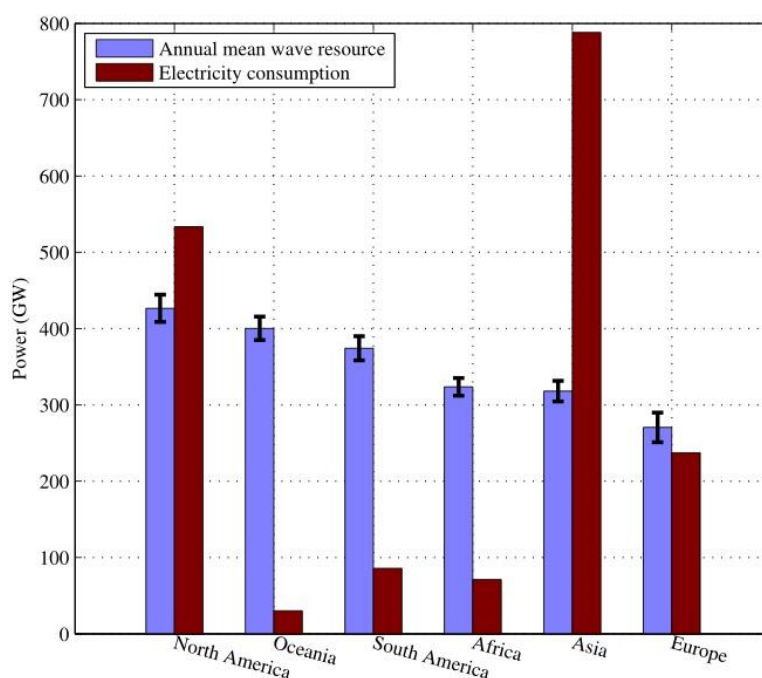


Figura 19 – Comparação da energia das ondas disponível com o consumo de eletricidade por continente. As barras de erro representam o intervalo de confiança de 95 % (Gunn e Stock-Williams, 2012).

O gráfico permite verificar que apenas a energia das ondas disponível permite satisfazer as necessidades em eletricidade na Europa, em África, na América do Sul e na Oceânia, e ficando próxima de satisfazer as da América do Norte. Apenas na Ásia o recurso disponível fica muito aquém da procura. Não obstante, a energia extraível é consideravelmente mais pequena. Gunn e Stock-Williams (2012)

estimaram a energia possível de obter, baseando-se na eficiência do WEC Pelamis, igual  $96.6 \pm 1.3$  GW, o que representa uma eficiência *wave-to-wire* de 4.6 %. Os autores estimam ainda a potência disponível e extraível para alguns países, entre os quais Portugal, cujos valores são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Estimativas do recurso teórico e extraível para países selecionados (intervalo de confiança de  $\pm 95$  %).

<b>País</b>	<b>P (GW)</b>	<b><math>\Psi</math> (GW)</b>	<b><math>\eta_{\psi}</math>(%)</b>
Austrália	$280 \pm 13$	$8.3 \pm 0.2$	3.0
Estados Unidos da América	$223 \pm 12$	$3.59 \pm 0.17$	1.6
Chile	$194 \pm 11$	$4.62 \pm 0.17$	2.4
Nova Zelândia	$89 \pm 16$	$3.51 \pm 0.16$	4.0
Canadá	$83 \pm 7$	$5.13 \pm 0.19$	6.2
África do Sul	$69 \pm 4$	$2.17 \pm 0.08$	3.1
Reino Unido	$43 \pm 4$	$2.44 \pm 0.14$	5.7
Irlanda	$29 \pm 4$	$1.13 \pm 0.09$	3.8
Noruega	$29 \pm 4$	$1.67 \pm 0.12$	5.7
Espanha	$20 \pm 3$	$0.65 \pm 0.05$	3.3
Portugal	$15 \pm 2$	$0.49 \pm 0.04$	3.2
França	$14 \pm 3$	$0.57 \pm 0.06$	3.9

Para Portugal, os autores estimaram que a potência total é de 15 GW, e a extraível de 0,49 GW, resultando numa eficiência de 3,2 %. Não obstante, esta eficiência é baseada num conversor específico, e desde que o estudo foi feito as eficiências aumentaram consideravelmente, sendo que Margheritini (2009) calculou a eficiência *wave-to-wire* do SSG, dispositivo de aproveitamento da energia das ondas que funciona por galgamento, em 25 %-30 %. Para perspetivar o potencial energético das ondas do mar, o consumo energético em Portugal em 2016 foi de 5,4 GW, sugerindo que pelo menos 10 % da energia em Portugal pode provir das ondas. Conclui-se, portanto, que a energia das ondas pode ser determinante na estratégia energética mundial, mas com ênfase particular no potencial português.

O potencial da energia das ondas como fonte limpa e renovável de produção de eletricidade está estabelecido, no entanto, é necessário o desenvolvimento de tecnologias que permitam capturar esta energia e transformá-la. As primeiras tentativas de utilização da energia das ondas datam dos anos 1800, embora só mais recentemente, a partir do segundo milénio, tenha voltado a haver progressos significativos na área. Atualmente, os dispositivos de conversão de energia das ondas podem-se separar em três grupos (Pecher e Kofoed, 2017):

- Coluna de água oscilante;
- Corpos oscilantes;
- Galgamento.

Entre estes, há ainda outras distinções possíveis. A Figura 20 apresenta um fluxograma ilustrativo da categorização utilizada por Pecher e Kofoed (2017), que se basearam na abordagem da *IEA – Ocean Energy Systems*, apresentando também alguns exemplos.

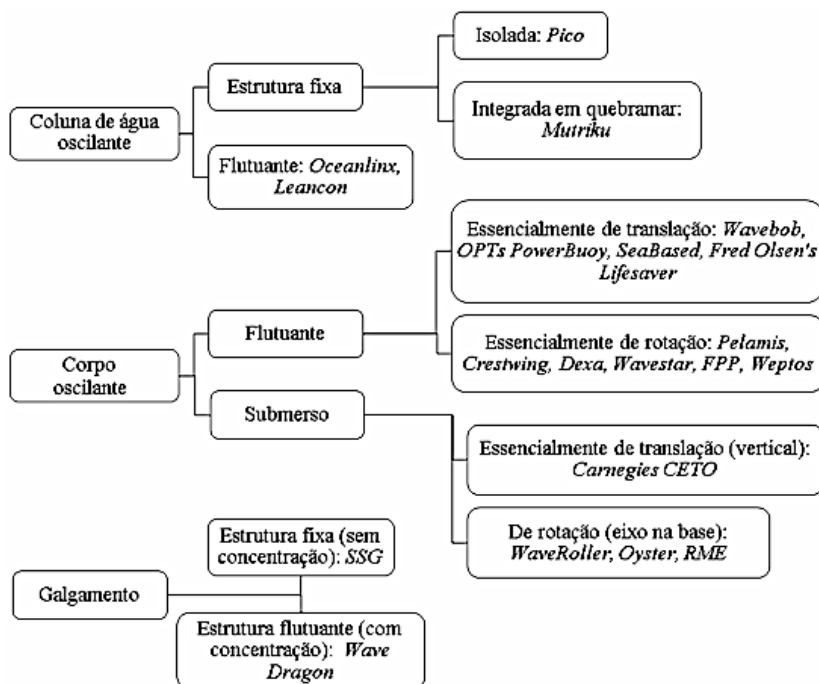


Figura 20 – Caracterização das tecnologias de aproveitamento da energia das ondas. Adaptado de Pecher e Kofoed (2017).

Estes dispositivos podem ainda separar-se conforme a sua localização. Uns são projetados para serem implantados *offshore*, outros *nearshore*, e alguns *onshore*. Ora, a energia das ondas disponível *offshore* é superior àquela disponível *onshore*, advindo daí o interesse em instalar os dispositivos ao largo, acrescentando-se ainda as vantagens de ocupação de espaço e de impacto ambiental e visual reduzido. No entanto, os dispositivos *onshore* e *nearshore* têm custos construtivos menores, maior facilidade de ligação à rede e de manutenção. Assim, existem estudos de conceitos para as três localizações, não havendo um local que se sobreponha aos outros, sendo que a aplicação de qualquer um dos conceitos dependerá do caso em questão.

### 2.3. SISTEMAS DE APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS

Após a apresentação de diversos modos de aproveitamento da energia do mar, será feita uma apresentação de alguns casos práticos de dispositivos de aproveitamento da energia das ondas. Indo ao encontro do objetivo da presente dissertação, serão analisadas com maior pormenor as soluções que permitem a sua aplicação em quebramares.

#### 2.3.1. COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE

O princípio da coluna de água oscilante baseia-se na elevação e abaixamento da superfície livre da água dentro duma estrutura de betão, que funciona como uma câmara de ar. A estrutura é aberta nas duas extremidades: a extremidade inferior abaixo da superfície livre da água do mar, a superior acima e ocupada por uma turbina eólica. A ação da agitação marítima incidente provoca uma oscilação da superfície livre da água dentro da câmara, o que faz com que a coluna funcione como um pistão, forçando o ar enclausurado a passar por uma turbina. Esta turbina movimenta um gerador, produzindo

assim energia. O PTO (*Power Take-Off*) é um componente de extrema importância numa coluna de água oscilante pois é determinante na eficiência do sistema. De forma a tirar o maior aproveitamento do fluxo de ar bidirecional existente, é usualmente utilizada nas CAO a turbina eólica Wells, que roda sempre no mesmo sentido, independentemente da direção do fluxo de ar. Esta permite gerar energia nos dois sentidos de oscilação da coluna de água e dispensa a utilização de sistemas dispendiosos de válvulas de retenção. Mais recentemente, tem sido também estudada a turbina de impulso biradial, que apresenta uma eficiência global superior à turbina Wells (Falcão *et al.*, 2013a) (Falcão *et al.*, 2013b) (Falcão *et al.*, 2014). A Figura 21 ilustra o princípio de funcionamento duma CAO.

Conforme se vê no fluxograma da Figura 20, existem CAO's que funcionam como estruturas fixas (CAO de Mutriku) e outros como estruturas flutuantes (Oceanlinx).

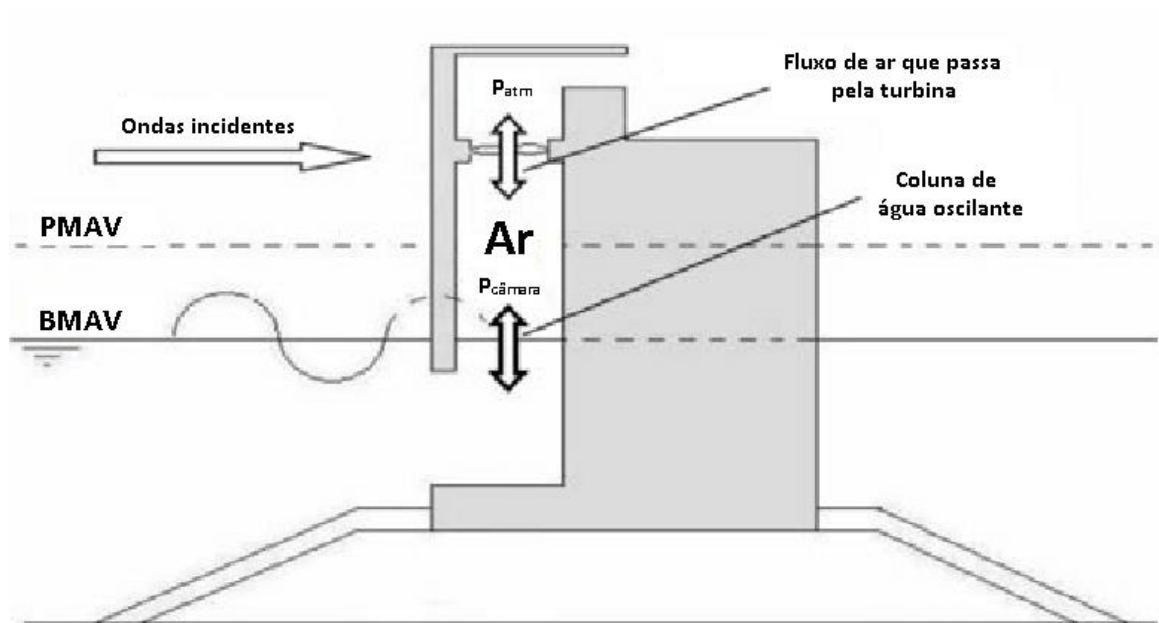


Figura 21 – Seção transversal duma CAO. Adaptado de Medina-Lopez *et al.* (2015).

#### 2.3.1.1. Dispositivo Oceanlinx

O dispositivo de conversão de energia das ondas Oceanlinx utiliza uma coluna de água oscilante sustentada por uma plataforma fixa ou flutuante, o que lhe permite ser colocado em alto mar, tendo assim acesso a condições de agitação marítima mais energéticas comparativamente a uma instalação costeira (International Water Power & Dam Construction, 2008). Um protótipo à escala, o Oceanlinx Mk1, foi projetado e construído em Port Kembla, em 2005, com uma capacidade de 450 kW. O objetivo era de testar o dispositivo em condições reais, ter uma base para melhoramentos no dimensionamento e aliciar potenciais investidores na tecnologia. No entanto, acabou por ser ligado à rede elétrica, produzindo energia da forma esperada. Esteve ativo até 2009, providenciando dados para o desenvolvimento da tecnologia. Entre 2007 e 2010 foram testados no mesmo local outros dois dispositivos, o Oceanlinx Mk2 e Mk3. Estes dispositivos conseguiram demonstrar o potencial e a viabilidade da utilização de sistemas de coluna de água oscilante em estruturas flutuantes, e estabeleceram assim a possibilidade de instalação de CAO's em alto mar e favorecer assim as instalações de todos os benefícios inerentes à instalação de um WEC *offshore*. A Figura 22 mostra os três dispositivos em funcionamento.



Figura 22 – Oceanlinx Mk1 (esquerda, superior), Oceanlinx Mk2 (direita, superior) e Oceanlinx Mk3 (inferior) (Thetys, 2018).

### 2.3.1.2. O caso de Mutriku

A CAO de Mutriku, no norte de Espanha, é um dispositivo de aproveitamento de energia das ondas que foi integrado no quebramar do porto. Este dispositivo foi a primeira instalação com múltiplas turbinas a ser inserido num quebramar e o primeiro projeto comercial de energia das ondas (Torre-Enciso *et al.*, 2009). Na Figura 23 pode-se ver uma foto aérea do dispositivo aplicado no quebramar.



Figura 23 – Quebramar exterior com a coluna de água oscilante no centro (primeiro plano) e porto (segundo plano) (Henriques e Falcao, 2017).



O porto de Mutriku está localizado no Golfo da Biscaia, no País Basco, e serve uma pequena vila piscatória. Devido às fortes tempestades que assolam a costa Norte espanhola, e à estreita zona de entrada no porto, com apenas 20 m de largura, ocorreram vários acidentes, alguns fatais. Para resolver estes problemas, o Governo Basco analisou dezassete alternativas para melhorar o acesso ao porto, incluindo a extensão do quebramar existente, a execução dum quebramar submerso ou a construção dum quebramar destacado. Em 2004 foi aprovado o projeto escolhido de construção dum quebramar destacado.

Este projeto consistiu num quebramar de taludes destacado com um comprimento de 440 m, acessível a partir da costa. A opção de construção permitiu a preservação da encosta escarpada e a construção duma praia balnear interior, resguardada pelo quebramar, em substituição da previamente existente. As cotas de implantação variam entre -2 m e -17 m em relação à baixa-mar de águas vivas (BMAV). O coroamento da superestrutura encontra-se à cota 16.5 m e o manto resistente é constituído por blocos de enrocamento de 15, 25 e 45 t.

Após a definição do projeto inicial foi considerada a hipótese de incluir um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas no quebramar. O Departamento Governamental de Transportes e das Obras Públicas Basco iniciou uma colaboração com a *Ente Vasco de la Energia* para a instalação dum dispositivo de aproveitamento da energia das ondas. A coluna de água oscilante foi a tecnologia escolhida como a mais indicada para o projeto por poder ser integrada no quebramar sem alterar significativamente o projeto, e salvaguardando a funcionalidade do quebramar. Foi estudado o recurso energético disponível a partir de dados da agitação marítima ao largo, e verificou-se que este variava consideravelmente entre o verão e o inverno. Os fluxos de energia obtidos para a costa de Mutriku, a 30 m de profundidade, foram os seguintes:

- Fluxo de energia médio no Inverno: 18 kW/m;
- Fluxo de energia médio no Verão: 4.8 kW/m;
- Fluxo de energia médio nos períodos de transição: 8.8 kW/m.

Para a definição da localização do dispositivo, foi feito um estudo de propagação das ondas para quatro pontos específicos do quebramar. De entre as quatro consideradas (três no tronco do quebramar e uma na parte exterior da cabeça), duas foram testadas em modelo físico 3D para determinar a melhor opção. A localização escolhida foi a da zona curva do tronco do quebramar.

Em parceria com a Voith Hydro Wavegen, optou-se pela instalação de 16 câmaras, em que cada uma está ligada a um gerador com uma capacidade de 18.5 kW, totalizando uma capacidade total de 296 kW. A Voith Hydro Wavegen tinha trabalhado previamente nos projetos da CAO da ilha do Pico, nos Açores, e do protótipo LIMPET na ilha Islay, na Noruega. Foram utilizadas turbinas Wells devido à sua robustez e ao facto de girar sempre no mesmo sentido independentemente da direção do fluxo de ar. Para estimar a produção energética foram realizados testes em tanque de ondas, e a energia média produzida anualmente foi estimada em 600 MWh.

O dispositivo ocupa uma extensão curvilínea de 100 m do quebramar, na qual em vez dum quebramar de taludes existe um quebramar vertical para acomodar a CAO. Para facilitar o processo, as câmaras do dispositivo são compostas por células prefabricadas que se sobrepõem, formando uma parede vertical. As células são enchidas com betão ou enrocamento para assegurar o funcionamento monolítico da estrutura, exceto as dezasseis câmaras que contêm a coluna de água oscilante. A superestrutura construída *in situ* assegura a continuidade entre a zona de quebramar de taludes e do dispositivo, à cota 16.5 m. A Figura 24 mostra uma vista em planta do dispositivo e a Figura 25 um corte do quebramar na zona do dispositivo.

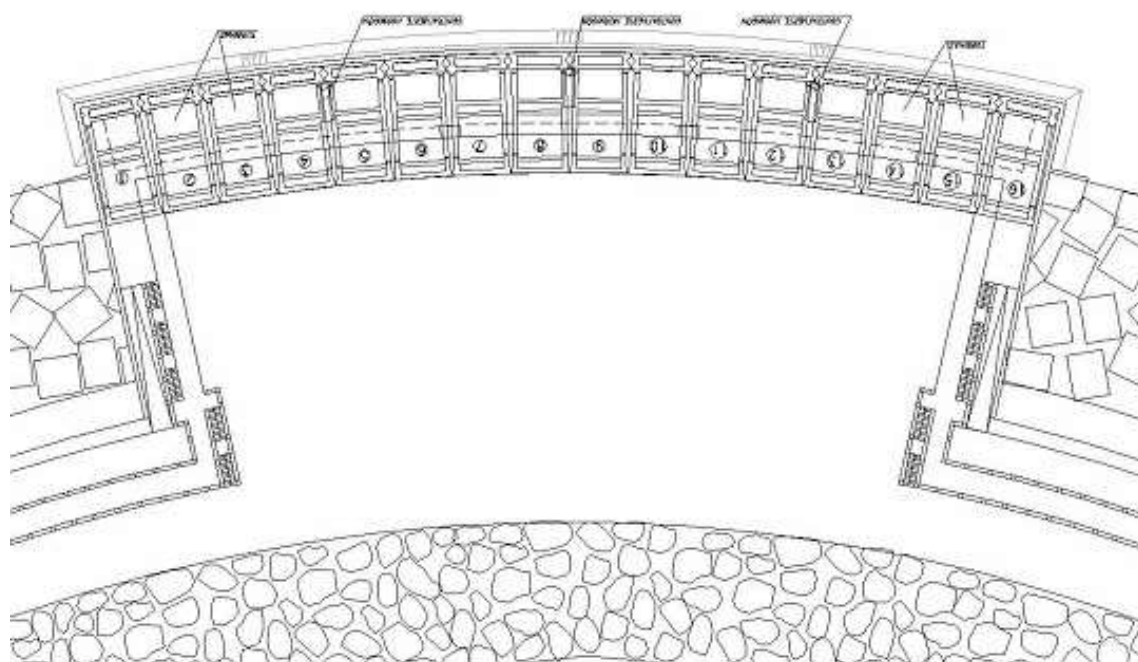


Figura 24 – Planta da zona do quebramar com a CAO (Torre-Enciso *et al.*, 2009).

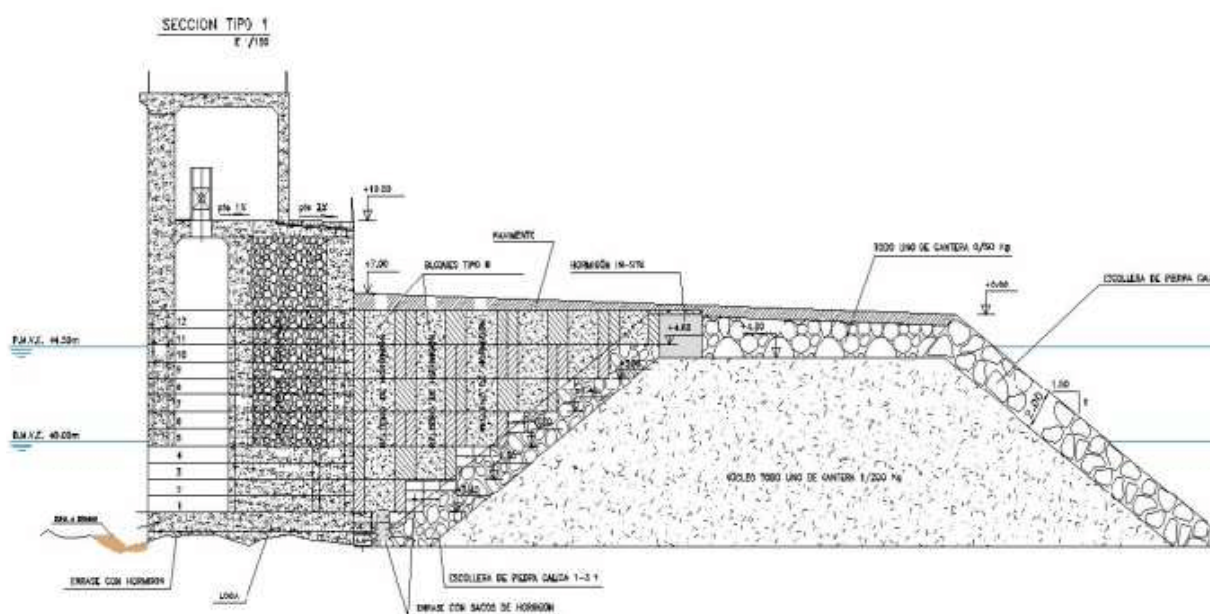


Figura 25 – Secção transversal da zona do quebramar com a CAO (Torre-Enciso *et al.*, 2009).

A construção do quebramar exterior do porto de Mutriku com a CAO foi concluída em 2011, sendo que a inclusão da CAO aumentou o tempo de construção em cerca de 7 meses. O investimento extra estimado para a inclusão da CAO foi de 6.4 milhões de euros, cerca de 25 % do custo total da obra, sendo que o projeto recebeu financiamento do 7º Programa Quadro da Comissão Europeia. A Figura 26 mostra a colocação das células prefabricadas por uma grua.



Figura 26 – Colocação das células de betão prefabricadas (Torre-Enciso *et al.*, 2009).

Um estudo realizado para um período de tempo de mais de dois anos, entre 2014 e 2016, revela que a produção energética média anual foi de cerca de 250 MWh/ano, que fica muito aquém da previsão inicial de 600 MWh/ano. Para um período de retorno de 10 anos, o preço da energia fica em cerca de 2.56 €/kWh, que é pouco competitivo em relação a outras fontes de energia renovável. Não obstante, o dispositivo permitiu estudar o funcionamento duma CAO à escala real instalada num quebramar, permitindo assim o desenvolvimento da tecnologia e abrindo oportunidades para novas instalações do mesmo tipo noutros locais.

### 2.3.2. CORPO OSCILANTE

Os corpos oscilantes, ou os *Wave Activated Bodies* (WAB), são dispositivos de aproveitamento da energia das ondas que geram energia elétrica através da oscilação de um ou mais corpos. Esta categoria engloba um grande número de conceitos, sendo por isso a mais geral, e, portanto, serão apenas mencionados os mais relevantes. No entanto, existem centenas de dispositivos que funcionam desta forma (Pecher e Kofoed, 2017). Os WABs contêm elementos móveis que são diretamente ativados pela oscilação cíclica das ondas, cuja energia cinética é transformada em energia elétrica. Estes dispositivos podem extrair energia a partir de um ou mais graus de liberdade (DOF). De forma a maximizar a potência extraível, os componentes móveis dos dispositivos devem ser pequenos comparativamente ao comprimento de onda, e no caso da existência de vários componentes móveis, estes devem ser espaçados de meio comprimento de onda.

Esta categoria pode ainda ser diferenciada em três tipos:

- *Point absorbers*;
- *Terminators*;
- *Attenuators*.

Os *point absorbers* são dispositivos com pequena extensão comparativamente ao comprimento de onda predominante (Pecher e Kofoed, 2017). Estes dispositivos utilizam normalmente um corpo submerso ou flutuante para capturar a força oscilatória da onda, e possuem a vantagem de poderem aproveitar a energia das ondas de todas as direções. São geralmente colocados na superfície livre do mar, ou perto

desta, longe da linha da costa, e podem ser instalados entre pequenas e muito grandes profundidades, dependendo do conceito e do sistema de ancoragem. Alguns exemplos de *point absorbers* são o PowerBuoy (Figura 27), o Wavebob (Figura 28) e o SeaBased (Figura 29).

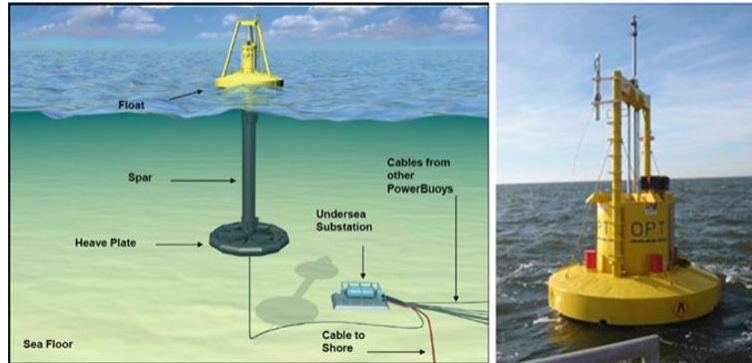


Figura 27 – OPT PowerBuoy PB40 (Ocean Power Technologies, 2018).

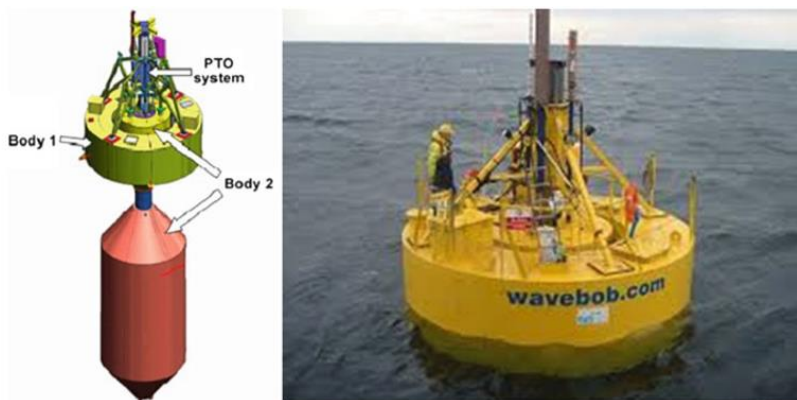


Figura 28 – Wavebob (Science Gallery, 2018).

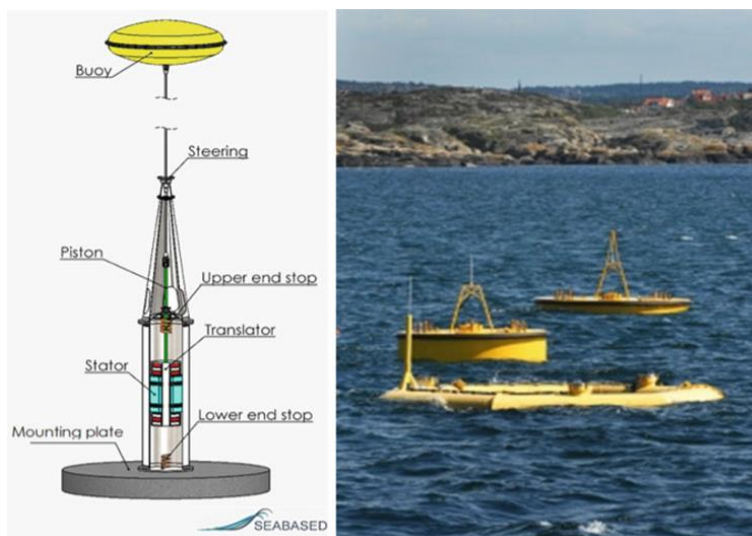


Figura 29 – Seabased (Seabased, 2018).

Os *attenuators* são dispositivos com grande extensão horizontal paralelamente à direção de propagação das ondas (Pecher e Kofoed, 2017). Estes dispositivos são constituídos por múltiplos segmentos, em que os mecanismos de atuação utilizam geralmente o movimento de rotação nas juntas (Xie e Zuo, 2013). A variação da elevação da superfície livre da água em cada ponto do dispositivo faz com que as juntas sejam mobilizadas para gerar energia. Um exemplo comum de *attenuators* é o Pelamis, tecnologia utilizada em Portugal no Parque de Ondas da Aguçadoura. Este parque foi o primeiro parque de aproveitamento da energia das ondas do mundo. Encontra-se localizado a 5 km de distância da costa da Póvoa de Varzim, no Norte de Portugal, e entrou em funcionamento em setembro de 2008. No entanto, problemas técnicos obrigaram a retirar os três dispositivos do mar passados uns meses. A Figura 30 mostra um dispositivo Pelamis em funcionamento.



Figura 30 – Dispositivo Pelamis ao largo da Póvoa de Varzim (Pelamis Wave Power, 2018).

O Crestwing e o Dexawave (Figura 31) são outros exemplos deste tipo de dispositivo.



Figura 31 – Crestwing (esquerda) e Dexawave (direita) em funcionamento.

Os *terminators* são dispositivos com grande extensão horizontal ortogonalmente à direção de propagação das ondas (Pecher e Kofoed, 2017). Estes dispositivos têm um funcionamento similar aos *attenuators*, como o Pelamis, em que a rotação induzida pelas ondas faz gerar energia elétrica. Geralmente esta rotação não se dá em torno duma rótula, mas sim dum eixo de rotação. Alguns exemplos

de dispositivos deste tipo são o Oyster, o Waveroller e o Langlee. O Waveroller está a ser utilizado em Peniche desde 2012, e recebeu um financiamento de 10 milhões de euros em 2016 pela Comissão Europeia no âmbito do projeto *Horizon 2020*. Existem três protótipos em fase de testes, cada um com 100 kW de potência (Portal Energia, 2016). A Figura 32 mostra o Waveroller no mar, e a Figura 33 representações artísticas do Oyster e do Langlee.



Figura 32 – Waveroller antes de ser colocado no fundo do mar (Portal Energia, 2016).

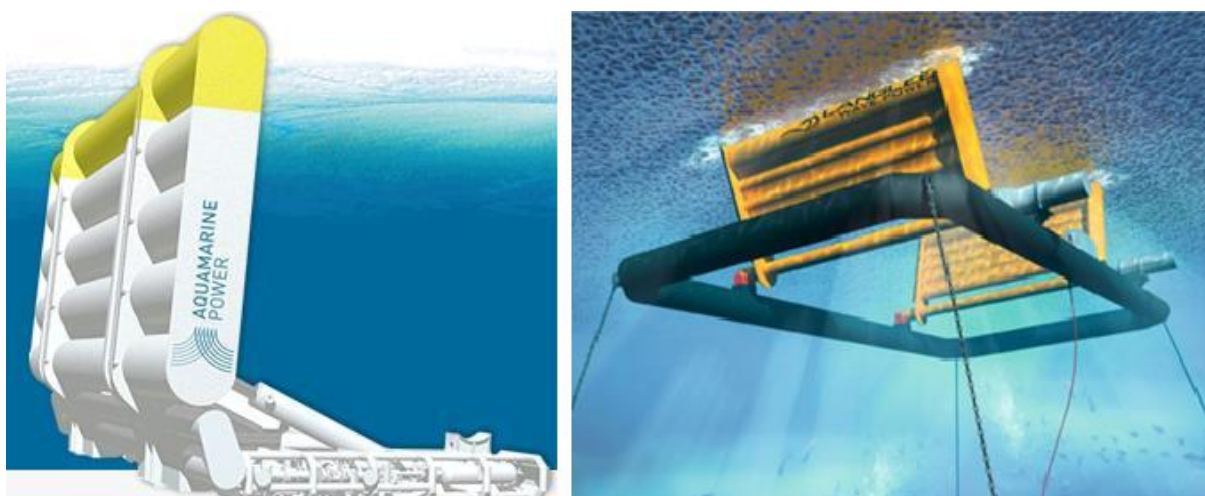


Figura 33 – Representações do Oyster (REUK, 2018) e do Langlee (Pecher e Kofoed, 2017).

### 2.3.3. DISPOSITIVOS POR GALGAMENTO

Os dispositivos por galgamento, ou *overtopping devices* (OTD's), convertem a energia cinética das ondas em energia potencial. O princípio de funcionamento consiste em armazenar um volume de água acima do nível médio da água do mar, utilizando depois este volume para fazer atuar uma turbina hidráulica através do caudal que se escoia do reservatório para o mar. Para o efeito, os dispositivos utilizam uma superfície inclinada, ortogonal à direção de propagação das ondas, que funciona como rampa para fazer com que a água proveniente da agitação marítima incidente suba para uma cota superior à do NMM. Possuem um ou mais reservatórios elevados onde a água é provisoriamente armazenada,

antes de ser turbinada e restituída ao mar. Das três categorias distinguidas nesta dissertação, os dispositivos por galgamento são talvez os menos desenvolvidos.

O primeiro conceito a utilizar o princípio de galgamento para gerar energia elétrica a partir da energia das ondas foi um canal afunilado, conhecido como o TAPCHAN (*TAPpered CHANnel*) (Mustapa *et al.*, 2017). Este foi desenvolvido na Noruega em 1980 (Evans e Falcao, 1986), e é semelhante à geração hidroelétrica tradicional, como se pode ver na Figura 34. O primeiro protótipo do TAPCHAN foi instalado em Toftestallen, na Noruega, em 1985, e tinha uma potência de 500 kW.

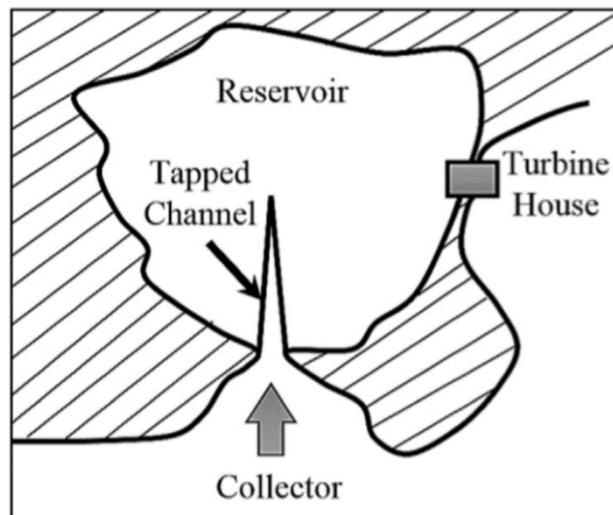


Figura 34 – Vista superior do funcionamento do TAPCHAN (Mustapa *et al.*, 2017).

Baseados no TAPCHAN, surgiram mais dois conceitos de dispositivos de galgamento: o *Wave Dragon* e o *Seawave Slot-cone Generator* (SSG). O primeiro é um dispositivo flutuante com uma ancoragem folgada, constituído por uma rampa com dois concentradores que direcionam a água para um reservatório, para utilização em alto mar. O segundo é uma estrutura com vários reservatórios, posicionado *onshore* perpendicularmente à direção de propagação das ondas ou *offshore* com um formato redondo, podendo captar a energia das ondas provenientes de qualquer direção. É constituído por uma rampa que direciona a água para os reservatórios, que se encontram a diferentes cotas de forma a capturar da melhor forma a energia disponível em vários estados de agitação marítima. Não obstante, existem ainda outros conceitos baseados no mesmo princípio, tais como o *Wave Plane* (<http://www.waveplane.com/>) e o *Power Pyramid* (Kofoed, 2002b).

#### 2.3.3.1. Wave Dragon

O *Wave Dragon* foi desenvolvido por Erik Friis-Madsen em associação com o *Danish Hydraulic Institute*, o *Danish Maritime Institute*, Rasmussen & Schiøtz East A/S e outros, entre 1987 e 1997 (Nielsen e Kofoed, 1997). O desenho inicial do dispositivo considera como principal material constituinte o betão armado, Figura 35.

Esta tecnologia continua em desenvolvimento e deu origem à empresa *Wave Dragon Aps*, que obteve financiamento da União Europeia, da *Welsh Development Agency*, da *Danish Energy Authority* e da *Danish Utilities PSO Programme* (Wave Dragon, 2018). Este sucesso pode ser atribuído à simplicidade

do conceito e à utilização dos princípios de funcionamento das instalações hidroelétricas, que estão bem estudados e têm já a sua eficácia estabelecida.

Em 2003 um protótipo em aço à escala 1:4.5 de 237 t foi rebocado para um local de testes no Fiorde de Lim, na Dinamarca. Estes testes, que decorreram até 2005, permitiram projetar, fabricar e instalar turbinas para o dispositivo. Mostraram também correspondência entre as previsões e os resultados de produção de energia do *Wave Dragon*, tendo este fornecido potência à rede elétrica local, tornando-se no primeiro dispositivo de aproveitamento da energia das ondas *offshore* a fazê-lo (Wave Dragon, 2018), Figura 36.

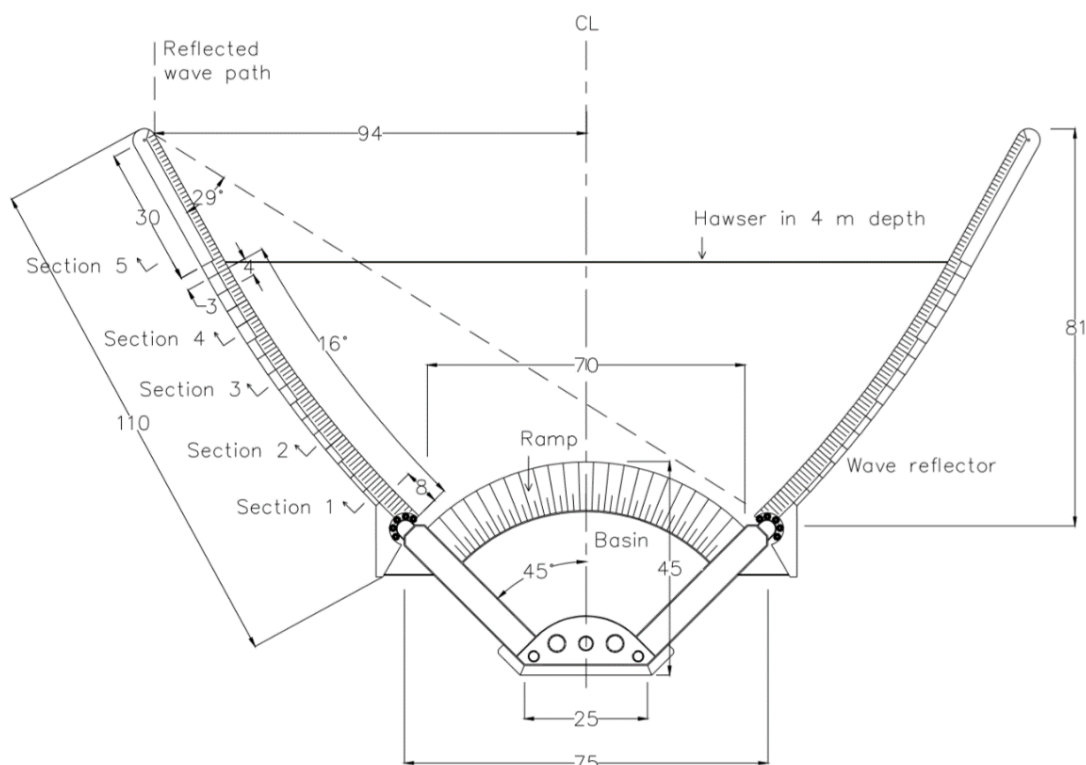


Figura 35 – Esquema do *Wave Dragon* tal como proposto por Erik Friis-Madsen (Nielsen e Kofoed, 1997).

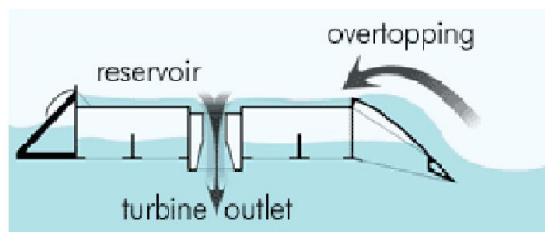


Figura 36 – Protótipo do *Wave Dragon* instalado na Dinamarca (esquerda) e princípio de funcionamento (direita) (Wave Dragon, 2018).



Entretanto surgiram novos projetos de dispositivos de aproveitamento de energia das ondas para vários sítios, incluindo Portugal, tendo sido criada uma empresa de desenvolvimento de projeto chamada *TecDragon* para o efeito (Wave Dragon, 2018). Esta empresa tinha em vista o aproveitamento da energia das ondas em todo o território nacional, sendo que pretendia instalar numa primeira fase um parque de 50 MW na costa marítima portuguesa (TecDragon, 2018). No entanto, não existem à data informações que mostrem que este projeto esteja em desenvolvimento.

Um projeto correntemente em desenvolvimento é o WD-DanWEC, que desde 2015 efetua estudos de viabilidade da instalação dum dispositivo de aproveitamento da energia das ondas no porto de Hanstholm.

### 2.3.3.2. Seawave Slot-Cone Generator

O *Seawave Slot-Cone Generator* (SSG) é um conceito relativamente recente, que difere do *Wave Dragon* e do TAPCHAN num aspeto essencial, que é a utilização de múltiplos reservatórios. No entanto, o princípio básico deste dispositivo é o mesmo: o de capturar a energia cinética das ondas incidentes sobre a estrutura, transformando-a em energia potencial através do armazenamento da água a uma cota superior à do nível da água do mar. Aquando da restituição do volume de água armazenado nos reservatórios ao mar, este faz acionar uma turbina, que produz energia através da utilização dum gerador. Em 2004 foi criada a companhia WAVE Energy AS, sediada em Stavanger, na Noruega, com o intuito de desenvolver o conceito. A empresa é detentora da patente do SSG, embora não haja indicação de que esteja ainda em funcionamento.

O dispositivo SSG foi concebido de forma a que possa ser facilmente aplicado num quebramar portuário. A aplicação dum dispositivo de aproveitamento da energia das ondas traz diversas vantagens, nomeadamente a partilha dos custos de construção, a redução dos impactes ambientais, a facilidade de acesso para trabalhos de manutenção e a ligação à rede elétrica. A sua estrutura pode ser vista como uma junção dos dois principais tipos de quebramares, o quebramar de taludes e o quebramar vertical. O SSG é constituído por um caixão oco de betão armado, cuja face de barlar é inclinada, formando uma rampa com aberturas que funcionam como entradas para os reservatórios onde a água é armazenada. A Figura 37 apresenta uma representação artística do SSG que facilita a compreensão do funcionamento do dispositivo.

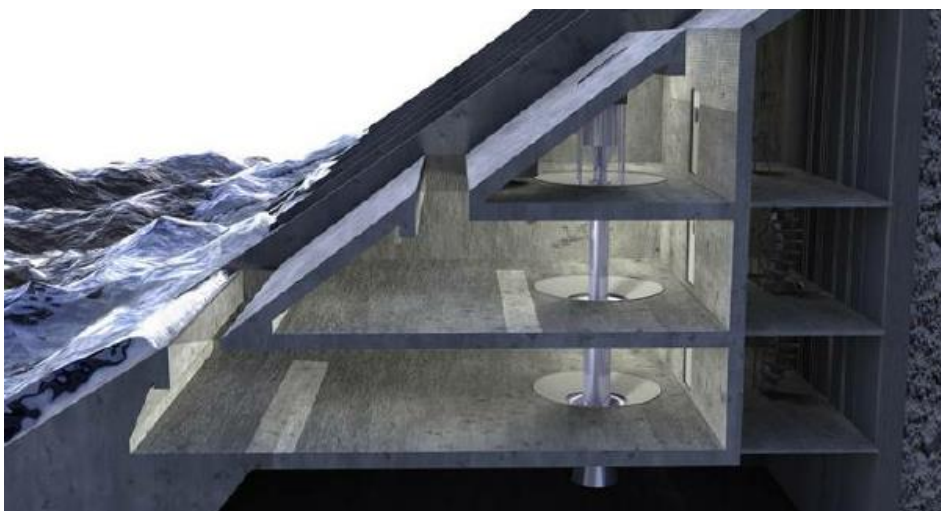


Figura 37 – Representação artística do SSG (Margheritini *et al.*, 2006).

A principal vantagem que o SSG apresenta em relação a outros dispositivos de aproveitamento da energia das ondas que funcionem por galgamento é a utilização de vários reservatórios. Um estudo realizado por Kofoed e Frigaard (2000) mostra que a utilização de três reservatórios em vez de apenas um origina um aumento de 38 - 53 % da energia potencial no galgamento.

Uma turbina foi estudada para utilização no SSG, a *Multi Stage Turbine* (Turbina de Múltiplas Fases), que é capaz de utilizar várias quedas de água na roda de apenas uma turbina (Margheritini *et al.*, 2009a). Possui apenas um eixo e necessita apenas de um gerador e de um sistema de conexão à rede para todos os reservatórios. A Figura 38 mostra uma representação da MST para três reservatórios.

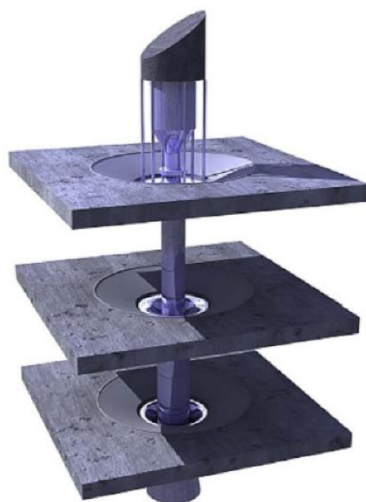


Figura 38 – *Multi Stage Turbine* (Margheritini *et al.*, 2006).

Esta turbina permitiria reduzir as perdas de arranque e paragem das turbinas, melhorando assim a eficiência do dispositivo e tornando mais constante a produção elétrica deste. Margheritini *et al.* (2006) previam a utilização desta turbina numa instalação de testes, de forma a estudar o desempenho da turbina, que estaria em desenvolvimento na Universidade Norueguesa da Ciência e da Tecnologia. Não obstante, até à data não há indicações de que a turbina tenha sido desenvolvida.

Estava prevista a construção dum dispositivo SSG à escala real para ser testado na ilha de Kvitsøy, na Noruega. Este teria três reservatórios, uma capacidade instalada de 150 kW e entraria em funcionamento no verão de 2007 (Margheritini *et al.*, 2006). O dispositivo teria todos os componentes necessários à produção de energia elétrica e previa-se que fosse ligado à rede elétrica local. Sem embargo, preocupações ambientais impediram a realização do projeto no local escolhido (Frigaard *et al.*, 2008). Desde então, tem sido estudada a construção dum dispositivo noutros locais, como Liseleje (Borgarino e Kofoed, 2007) e Hanstholm (Margheritini e Kofoed, 2010) (Margheritini *et al.*, 2012).

O galgamento de estruturas de defesa costeira foi estudado nos últimos anos por diversos autores, e têm sido desenvolvidas ferramentas para a quantificação do caudal de galgamento. No entanto, ao desenvolver dispositivos de aproveitamento da energia das ondas, surge a questão de como prever corretamente o galgamento de estruturas com configurações consideravelmente diferentes das estruturas de defesa costeira comuns. Assim, Kofoed (2002) investigou esta questão de forma a preencher a falta de conhecimento quanto ao cálculo do galgamento de WEC's. Na sua investigação foram realizados diversos testes em modelo físico para as geometrias de dispositivos de galgamento existentes, e foram

desenvolvidas expressões que permitem calcular o caudal de galgamento em função da geometria da estrutura e das condições de agitação marítima. Após a realização de testes para uma estrutura com vários reservatórios, Kofoed (2002) desenvolveu uma expressão que permite estimar o caudal de galgamento em cada reservatório em função da altura de onda significativa e das alturas das cristas dos reservatórios, e apresenta um coeficiente de correlação  $R^2=0.96$  em relação aos dados experimentais.

A Figura 39 e a Figura 40 apresentam, respetivamente, o modelo experimental e os parâmetros geométricos utilizados por Kofoed (2002a) para caracterizar a estrutura.

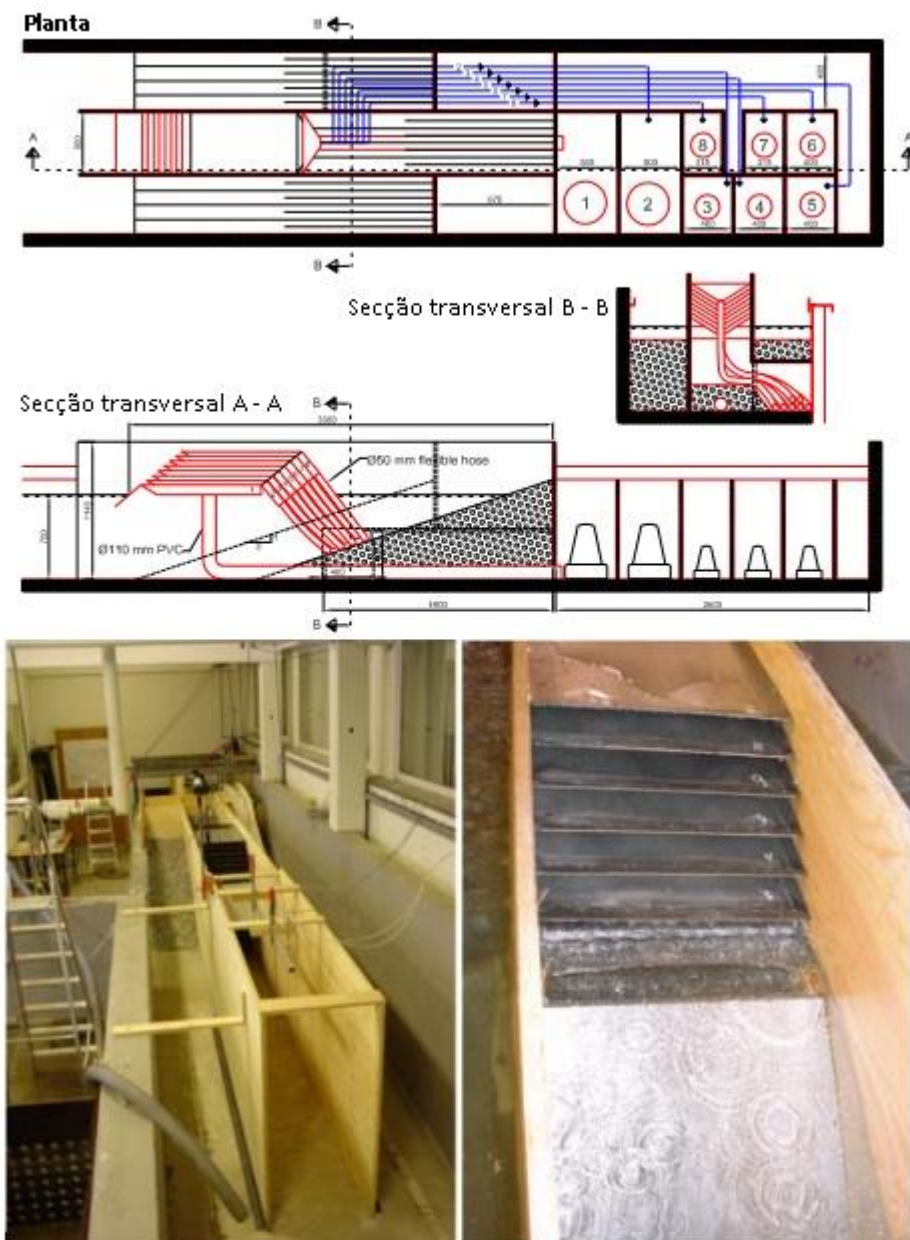


Figura 39 – Esquemas e fotos da instalação experimental usada por Kofoed (2002a).

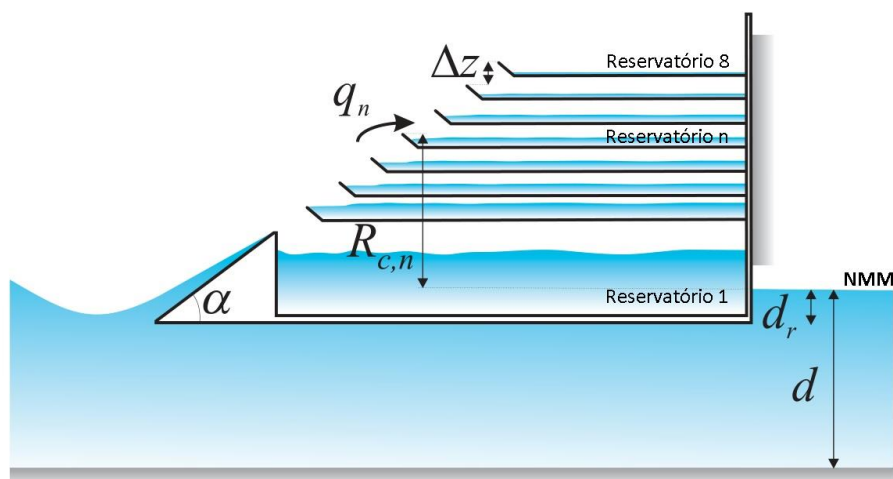


Figura 40 – Parâmetros geométricos usados para dispositivos com vários reservatórios por Kofoed (2002a).

Os testes referidos focaram-se no desempenho de estruturas em relação à energia média obtida do galgamento de água durante um longo período (por exemplo um ano), na costa dinamarquesa. Consequentemente, foram utilizadas condições de agitação marítima representativas dos estados do mar médios da parte dinamarquesa do Mar do Norte para solicitar a estrutura. Estas são apresentadas na Tabela 3, conjuntamente com a sua probabilidade de ocorrência e a energia que contêm.

Tabela 3 – Estados do mar típicos da parte dinamarquesa do Mar do Norte. Os estados apresentados cobrem 85 % do tempo (Kofoed, 2002).

$H_s$ (m)	$T_P$ (s)	$P_{\text{ocorrência}}$ (%)	$P_{\text{onda}}$ (kW/m)
1.0	5.6	46.8	2.4
2.0	7.0	22.6	11.9
3.0	8.4	10.8	32.2
4.0	9.8	5.1	66.7
5.0	11.2	2.4	119.1

Durante os testes foi medida a elevação da superfície livre da água, o nível de água nos reservatórios e o caudal de galgamento que entra nos reservatórios. Através da análise dimensional e de métodos de regressão, foi obtida uma expressão para quantificar o caudal de galgamento (Kofoed, 2002),

$$\frac{dq}{dz} = A e^{B \frac{z}{H_s}} c \frac{R_{c,1}}{H_s} \lambda_{d_r} \sqrt{g H_s} \quad (1)$$

em que  $q$  representa o caudal,  $z$  a cota de entrada do reservatório,  $\lambda_{d_r}$  um coeficiente corretivo relativo ao calado da estrutura,  $g$  a aceleração da gravidade,  $H_s$  a altura de onda significativa,  $A$ ,  $B$  e  $C$  coeficientes empíricos e  $R_{c,1}$  a cota do primeiro reservatório.

Reescrevendo a expressão, obtém-se,

$$\frac{dq}{dz} = \lambda_{dr} \sqrt{gH_s} A e^{B \frac{z}{H_s}} C^{\frac{R_{c,1}}{H_s}} \quad (2)$$

Procedendo à integração em ordem a  $z$ , obtém-se o caudal de galgamento médio por unidade de largura no reservatório  $n$ ,

$$q_n(z_1, z_2) = \lambda_{dr} \sqrt{gH_s^3} \frac{A}{B} e^{C \frac{R_{c,1}}{H_s}} (e^{B \frac{z_2}{H_s}} - e^{B \frac{z_1}{H_s}}) \quad (3)$$

em que  $z_1$  e  $z_2$  representam as cotas das fronteiras inferior e superior do reservatório, respetivamente. Geralmente considera-se  $z_1 = R_{c,n}$  e  $z_2 = R_{c,n+1}$ . Como para o reservatório superior  $z_2$  é teoricamente infinito, para questões práticas pode-se usar um valor alto, por exemplo considerar  $z_2 = 2z_1$ . Os coeficientes  $A$ ,  $B$  e  $C$  devem ser determinados empiricamente. Kofoed (2005) efetuou testes em modelo físico com três reservatórios e diversas geometrias, de forma a estudar o comportamento hidráulico destas. Usando os dados dos testes para estruturas com as cotas  $R_{c,1} = 1.50$  m e  $R_{c,1} = 2.25$  m,  $R_{c,2} = 3.30$  m,  $R_{c,3} = 4.65$  m e rampa de aproximação com uma inclinação de  $30^\circ$  a estender-se até ao fundo do mar obteve os valores de  $A$ ,  $B$  e  $C$ . Por regressão não-linear, os valores obtidos foram 0.197, -1.753 e -0.408, respetivamente para  $A$ ,  $B$  e  $C$ , que definem o SSG. Esta descrição de modelo é bastante geral (Borgarino *et al.*, 2007) e pode ser considerada como uma equação geral para um dispositivo de vários níveis, como o SSG.

Em 2008 foi desenvolvido pela Universidade de Aalborg um programa de simulação numérica, WOPSim, que permite prever, nomeadamente, o caudal de galgamento e a energia produzida por um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas que funcione por galgamento. O programa permite escolher o número de reservatórios do dispositivo e as suas cotas da crista. O programa baseia também a determinação do caudal de galgamento na expressão (3) obtida por Kofoed. O modelo de galgamento utilizado foi o de “*General Multi-Level*”, caracterizado pelos coeficientes da equação (3)  $A=0.197$ ,  $B=-1.753$  e  $C=-0.408$ . Para a definição da geometria de cada reservatório inserem-se os seguintes parâmetros:

- Altura da crista –  $R_c$ ;
- Espaço livre –  $f$ ;
- Queda –  $h$ ;
- Calado –  $d$ ;
- Comprimento –  $L$ ;
- Largura –  $W$ .

A Figura 41 permite uma mais fácil compreensão destes parâmetros. A cota da crista é a distância vertical entre o nível médio da água (NMM) e o ponto mais alto da rampa de entrada no reservatório correspondente. O espaço livre é a distância vertical entre a crista do reservatório e a superfície da água dentro deste. A queda representa a altura entre a água dentro do reservatório e o nível do mar. O calado corresponde à distância entre o NMM e o fim da rampa de galgamento. Este é igual à profundidade quando a rampa se estende até ao fundo do mar.

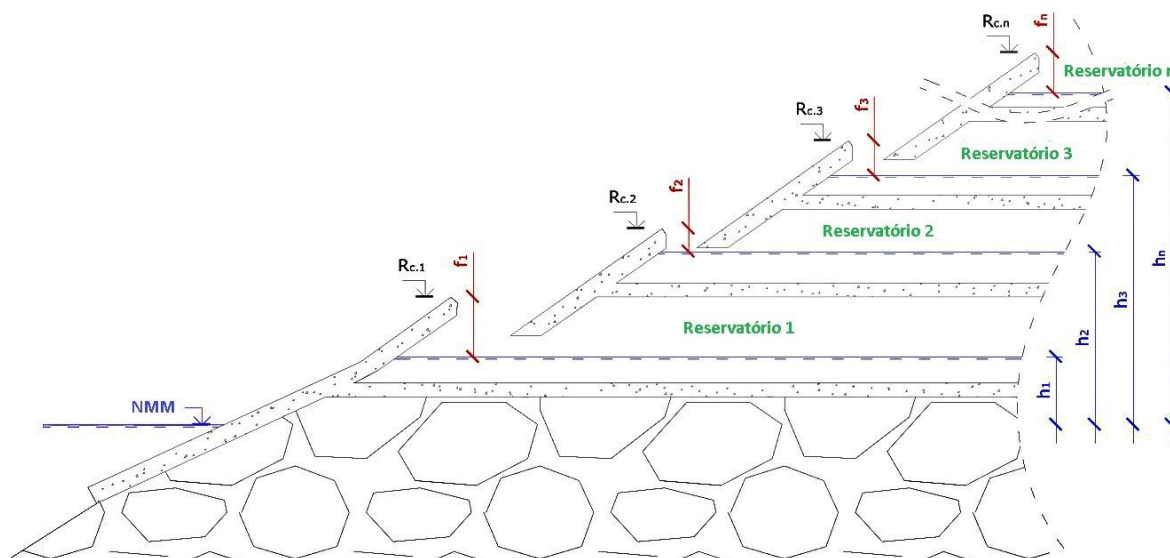


Figura 41 – Parâmetros descritivos do SSG (Meinert *et al.*, 2008).

As condições de agitação marítima são definidas por:

- Período de onda de pico –  $T_p$ ;
- Altura de onda significativa –  $H_s$ ;
- Probabilidade de ocorrência –  $P_{ocurr}$ ;
- Número de ondas geradas;
- Nível médio da água.

O WOPSim permite simular sete estados de mar em cada simulação, devendo a soma das suas probabilidades de ocorrência totalizar 100 %.

O programa WOPSim tem ainda em conta outros parâmetros, tais como o ângulo de incidência das ondas e o ângulo da rampa. Finalmente, é possível também inserir as curvas características de turbinas associadas a cada um dos reservatórios, de forma a simular a produção de energia elétrica de forma realista. Estas curvas relacionam a queda com o caudal turbinado e o rendimento. A estratégia de turbinamento é definida em função da distância entre a superfície livre da água dentro do reservatório e a cota de entrada deste. Estes limites podem referir-se diretamente ao espaço livre, ou então podem também ter em conta a altura de onda significativa. Os algoritmos utilizados pelo programa para ligar e desligar a turbina são os seguintes:

Se  $f < f_{ligar}(H_s)$  então,

Iniciar a turbina

$$f_{ligar}(H_s) = \min(\text{Max}((A \times H_s + B), C), D)$$

A=Inclinação da função  $H_s$  para ligar a turbina

B=Coefficiente linear da função de  $H_s$  para ligar a turbina

C=Limite inferior para ligar a turbina

D= Limite superior para ligar a turbina

e

Se  $f > f_{desligar}(H_s)$  então,

Parar a turbina

$$f_{desligar}(H_s) = \min(\max((A \times H_s + B), C), D)$$

A=Inclinação da função de  $H_s$  para parar a turbina

B=Coefficiente linear da função de  $H_s$  para parar a turbina

C=Limite inferior para parar a turbina

D= Limite superior para parar a turbina

A Figura 42 apresenta uma captura de ecrã do programa onde se definem todos estes parâmetros.

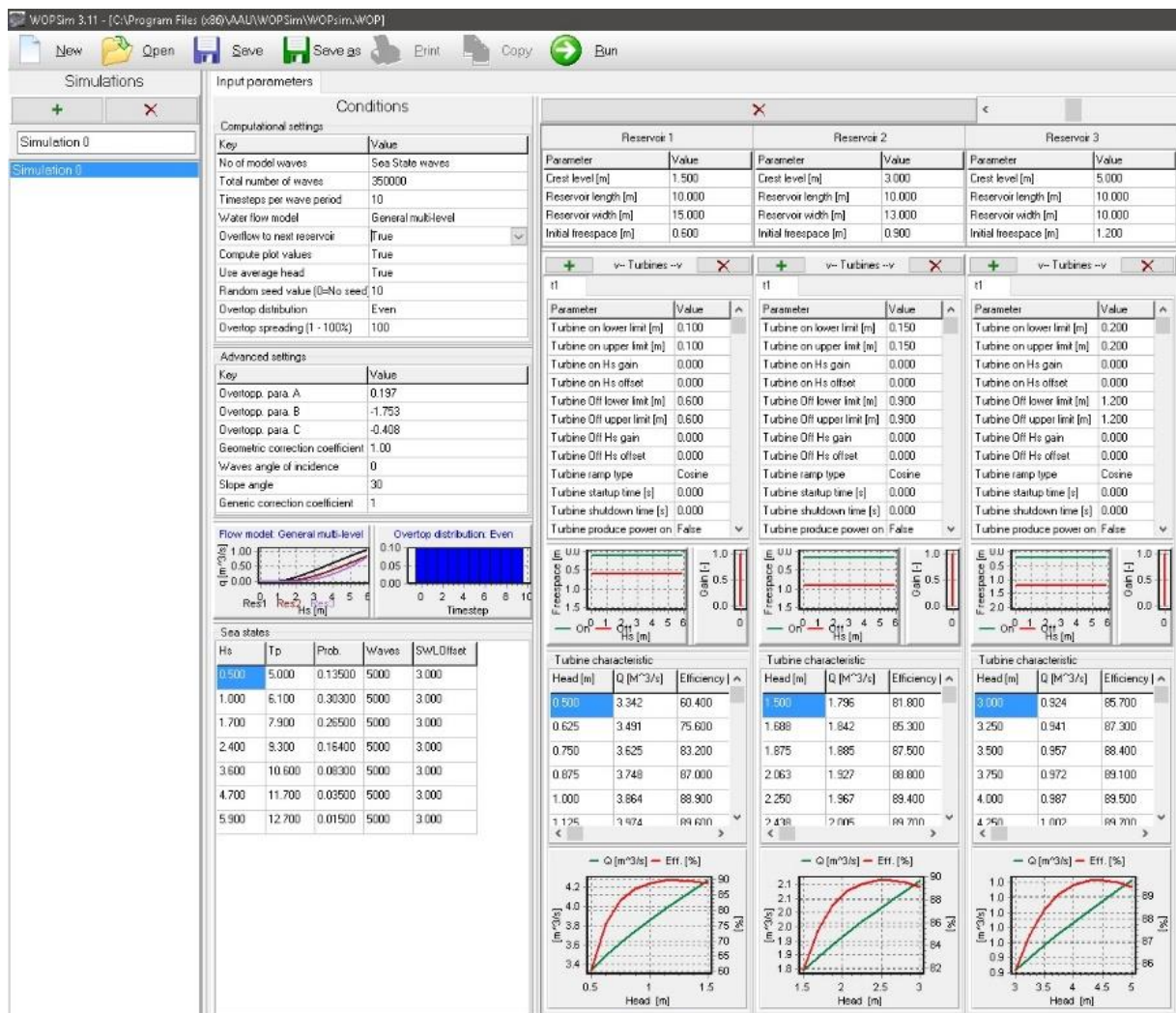


Figura 42 – Captura do ecrã do programa WOPSim.

Após correr a simulação, o programa fornece diversos resultados, nomeadamente:

- O caudal médio que entra em cada reservatório;
- O caudal médio turbinado;
- A energia das ondas disponível;
- A energia elétrica produzida;

- A eficiência hidráulica;
- A eficiência do reservatório.

O desempenho dos dispositivos de aproveitamento da energia das ondas pode ser medido pela eficiência deste. A eficiência refere-se à relação entre a potência extraída e a potência disponível. O fluxo de energia das ondas irregulares por metro de crista em águas profundas (W) pode ser calculado por,

$$P_{onda} = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (4)$$

em que  $\rho$  representa a massa volúmica da água ( $\text{kg.m}^{-3}$ ),  $g$  a aceleração da gravidade ( $\text{m.s}^{-2}$ ),  $H_s$  a altura de onda significativa (m) e  $T_e$  o período energético (s).

A potência na crista do reservatório  $j$  é dada por,

$$P_{crista} = \rho q_{ov,j} R_{c,j} \quad (5)$$

em que  $R_{c,j}$  representa a cota da crista do reservatório  $j$  em relação ao nível da água e  $q_{ov,j}$  o caudal médio de galgamento no reservatório  $j$  calculado com a equação (3).

A potência no reservatório  $j$  é dada por,

$$P_{res} = (Q_{in,j} - Q_{over,j}) \bar{h}_j \rho g \quad (6)$$

em que  $Q_{in,j}$  representa o caudal de galgamento que entra no reservatório  $j$ ,  $Q_{over,j}$  representa o caudal que transborda do reservatório  $j$  (*overflow*) e  $\bar{h}_j$  é a queda média no reservatório  $j$ .

Assim, a eficiência hidráulica é dada por,

$$\eta_{hid} = \frac{P_{crista}}{P_{onda}} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{res}} \rho q_{ov,j} R_{c,j}}{\frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e} \quad (7)$$

e a eficiência de reservatório é calculada através de,

$$\eta_{res} = \frac{P_{res}}{P_{onda}} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{res}} (Q_{in,j} - Q_{over,j}) \bar{h}_j \rho g}{\frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e} \quad (8)$$

Após o estudo de Kofoed (2002a) foram feitos vários estudos sobre diferentes parâmetros e características geométricas que influenciam o desempenho do SSG. Nomeadamente, Margheritini (2009) analisou diversos aspetos práticos para a utilização deste dispositivo, que permitem que a geometria do SSG seja otimizada de forma a ter um melhor desempenho conforme o local de instalação. Os parâmetros geométricos que influenciam a eficiência hidráulica do dispositivo são o comprimento e o ângulo da rampa frontal, o comprimento e o ângulo da frente de cada reservatório, a distância ortogonal entre as duas frentes de dois reservatórios consecutivos, o número de reservatórios e as cotas das suas cristas (Margheritini *et al.*, 2009a) e o comprimento dos reservatórios (Margheritini e Kofoed, 2008) (citados por Margheritini (2009)). Os estudos realizados por Margheritini *et al.* (2009a) permitiram compreender a influência dos diversos parâmetros no caudal de galgamento.



Concluíram que o ângulo ótimo da rampa frontal para maximizar o galgamento é de 30°, sendo que há poucas diferenças entre 30° e 40°.

Observaram também que o aumento do número de reservatórios do dispositivo se traduz num aumento da potência capturada. No entanto, esse aumento de potência capturada é cada vez menor, sendo que a passagem de um para dois e de dois para três reservatórios se traduz num aumento de, respetivamente, 20 % e 15 % na eficiência hidráulica, enquanto que a passagem de três para quatro e de quatro para cinco resulta num aumento da eficiência hidráulica de 12 % e 5 %, respetivamente. É preciso ainda considerar o custo de construção adicional por cada reservatório acrescentado.

Sem embargo, os autores observam que acrescentar um reservatório ao dispositivo permite mitigar o efeito negativo da maré. A existência duma amplitude de variação do nível da água do mar de 1.6 m traduziu-se numa perda de eficiência hidráulica de 6.9 %, enquanto que uma variação de 4.8 m resulta numa perda de 29.9 %. Não obstante, Vicinanza *et al.* (2012) observaram que a otimização das cotas das cristas dos reservatórios tendo em conta não só o regime de agitação marítima local mas também a variação do nível da água do mar permite ter um aumento da eficiência hidráulica de até 3 %.

Margheritini e Kofoed (2010) analisaram a influência da distância horizontal entre as frentes dos reservatórios, e estimaram que esta distância deve ser entre  $H_s$  e  $2H_s$  de forma a permitir que o caudal suba para os reservatórios superiores, sem, no entanto, impedir a entrada da água nos reservatórios inferiores.

Finalmente, estudos em modelo físico realizados por Kofoed (2005) demonstraram que se a rampa frontal do dispositivo for cortada antes de atingir o fundo do mar, há uma redução do caudal de galgamento de até 40 %. O autor determinou um parâmetro corretivo,  $\lambda_{dr}$ , que consta na equação (3), e que permite ter em conta esse parâmetro geométrico. O corte da rampa pode ser nomeadamente necessário em dispositivos aplicados em quebramares, tal como se observa na Figura 43 e na Figura 44.

Margheritini (2009) avaliou geometrias de dispositivos SSG propostas para aplicação no porto de Sines, Portugal (Figura 43), e no porto de Swakopmund, Namíbia (Figura 44).

Os dois esquemas apresentados permitiram tirar conclusões práticas para o estudo realizado nesta dissertação. Nomeadamente, observa-se a existência de aberturas para a extração do ar na parte traseira dos dispositivos.

Vê-se também que a base do reservatório inferior se encontra abaixo do nível médio do mar. Isto poderá dever-se à consideração da variação do nível da água, pois doutra forma não haveria interesse em armazenar um volume de água abaixo do NMM.

A cota da crista do primeiro reservatório encontra-se a 0.75 m e 1.00 m do nível médio do mar para o dispositivo de Sines e Swakopmund, respetivamente. A consideração duma cota mínima para a crista do primeiro reservatório, em relação ao NMM, poderá advir da necessidade duma queda mínima para que a turbina deste reservatório possa funcionar, o que deverá ser tido em conta aquando do estudo da geometria dum dispositivo SSG.

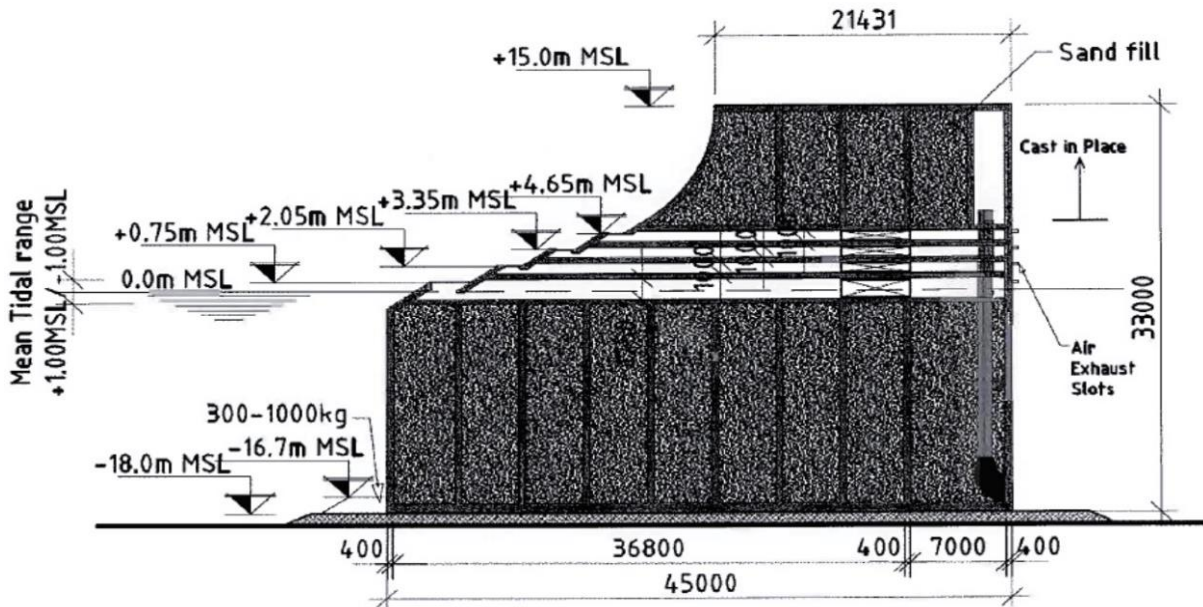


Figura 43 – Secção transversal do SSG-quebramar para Sines (Margheritini, 2009).

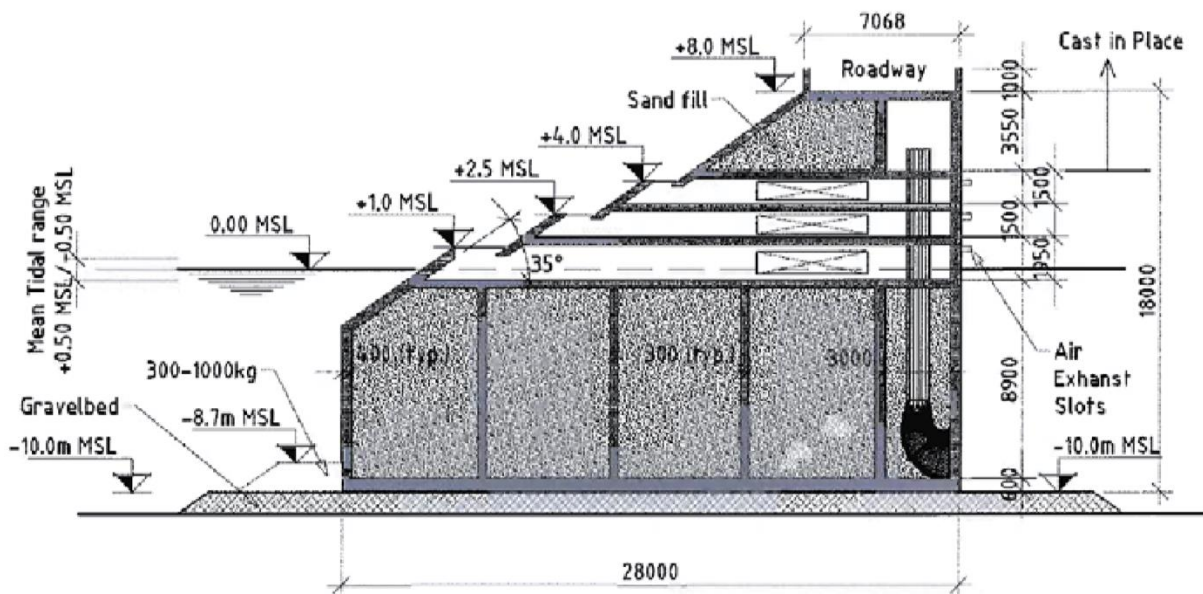


Figura 44 – Secção transversal do SSG-quebramar para Swakopmund (Margheritini, 2009).

Finalmente, o dispositivo de Sines apresenta na parte superior uma curvatura na rampa acima dos reservatórios. Esta rampa funciona como defletor e pode ser um aspeto importante para o funcionamento do dispositivo como quebramar, de forma a evitar um aumento dos galgamentos devido à aplicação do SSG em quebramares portuários, não afetando assim a funcionalidade da estrutura.

O processo de conversão da energia consiste numa sequência de transformações, para as quais Margheritini (2009) estimou as seguintes eficiências:

- Das ondas para as cristas dos reservatórios – 40 %;
- Das cristas dos reservatórios para os reservatórios – 75 %;

- Na passagem pelas turbinas – 98 %;
- No gerador elétrico e no equipamento elétrico – 95 %.

Consequentemente, a eficiência final (ou eficiência *wave-to-wire*), situa-se entre 25 % – 35 % para o dispositivo SSG.

Margheritini (2009) faz uma análise de custo da aplicação dos dispositivos SSG em Sines e Swakopmund, e compara o preço da energia com a do OWC de Mutriku. O custo adicional da construção dos dispositivos é estimado em 48 800 €/m para Swakopmund e em 54 800 €/m em Sines. A produção energética estimada para Swakopmund é de 19 000 kWh/m/ano e para Sines é de 12 000 kWh/m/ano. Estes valores traduzem-se num custo de 0.26 €/kWh e 0.45 €/kWh para Swakopmund e Sines, respetivamente, considerando um período de retorno de 10 anos. Comparativamente, o custo previsto para Mutriku para o mesmo período de retorno seria de 0.33 €/kWh.

Não obstante, Margheritini (2009) não considerou o custo adicional relacionados com a obra de construção civil, e a produção energética real ficou muito aquém da prevista. Consequentemente, o custo foi de 2.56 €/kWh para Mutriku.

Tendo em conta as estimativas feitas por Margheritini (2009), a tecnologia SSG tem grande potencial como fonte de energia elétrica limpa e renovável, acrescentando-se as vantagens inerentes à sua integração em quebramares portuários. Não obstante, apenas após a construção dum dispositivo é que poderá ser apreciado o custo e a eficiência reais do dispositivo.

#### 2.3.4. SISTEMAS HÍBRIDOS

O potencial energético das ondas é enorme e encontra-se ainda muito pouco explorado. Existem inúmeras tecnologias que aproveitam esta fonte de energia, com protótipos e instalações funcionais que demonstram a viabilidade técnica destes, tal como já foram apresentados. No entanto, recentemente tem sido estudada a possibilidade de utilização de sistemas híbridos de geração de energia.

A hibridação refere-se à junção de duas ou mais tecnologias num só dispositivo, o que torna possível a produção de energia elétrica de mais do que uma forma. Localizações remotas, como ilhas, não estão normalmente ligadas à rede principal de eletricidade e, por isso, é frequente estas recorrerem a micro-redes alimentadas por geradores a diesel. No entanto, é comum estes locais terem excelentes recursos energéticos renováveis, e recentemente os sistemas de energia híbridos, ou HES (*Hybrid Energy Systems*), têm-se revelado competitivos ao nível de custo de produção de energia para estes locais. Geralmente, com um HES, 10 % da energia é fornecida por geradores a diesel, enquanto que a restante energia provem de fontes renováveis (Friedrich, 2016). Apesar do peso da energia fornecida pelo gerador ser baixo, este continua a ser uma fonte poluente e não renovável, não sendo consequentemente sustentável a sua utilização a longo prazo. Finalmente, pode ser considerada a possibilidade de utilização de dois sistemas de geração de energia elétrica renováveis, juntando conceitos existentes.

De forma a melhor aproveitar a energia do mar disponível, têm sido estudados sistemas de energia que utilizem mais do que um tipo de energia do mar. Yu *et al.* (2017) estudaram a utilização de sistemas híbridos de energia renovável para serem aplicados em plataformas *offshore*, nomeadamente os recursos solar e eólico. Um dos principais desafios da energia renovável é providenciar energia de forma ininterrupta, e Yu *et al.* (2017) avaliam a capacidade dum sistema híbrido de reduzir a variação e incerteza associada à energia gerada.

Yang *et al.* (2014) apresentam o estudo realizado para o desenvolvimento dum dispositivo capaz de gerar eletricidade através da energia das ondas e do vento. O dispositivo pode converter

simultaneamente os dois tipos de energia em energia cinética de rotação dum eixo e gerar assim energia elétrica. Chen *et al.* (2017) apresentam também o projeto e as simulações feitas para um dispositivo que gera eletricidade a partir das mesmas fontes.

A utilização de sistemas híbridos de conversão de energia visa aumentar a eficiência global dos sistemas de geração de energia elétrica e resolver as dificuldades que advêm da natureza estocástica das fontes renováveis. Assim, a utilização de duas ou mais tecnologias de aproveitamento da energia das ondas no mesmo dispositivo pode ajudar a ultrapassar dificuldades associadas a cada uma das tecnologias individualmente. A junção visa criar um sistema em que os dois métodos se completam de forma a que uma tecnologia compense as situações em que a outra apresenta piores resultados, dando origem a um sistema mais robusto e fiável, eventualmente com uma eficiência global mais elevada.

No âmbito do projeto *SE@PORTS* foram desenvolvidas soluções inovadoras de dispositivos híbridos de aproveitamento da energia das ondas. Estes dispositivos conciliam duas de três tecnologias de aproveitamento da energia das ondas já desenvolvidas, nomeadamente:

- Coluna de água oscilante;
- Dispositivo por galgamento;
- Membrana flexível.

As duas primeiras tecnologias foram já apresentadas nas secções 2.3.1 e 2.3.3. A tecnologia de membrana flexível utiliza um dispositivo submersível fixo no fundo do mar ou a um elemento rígido fixo, que aproveita o diferencial de pressão originado pela passagem de uma onda para gerar energia elétrica, através duma turbina de ar. A Figura 45 apresenta o princípio de funcionamento duma membrana flexível.

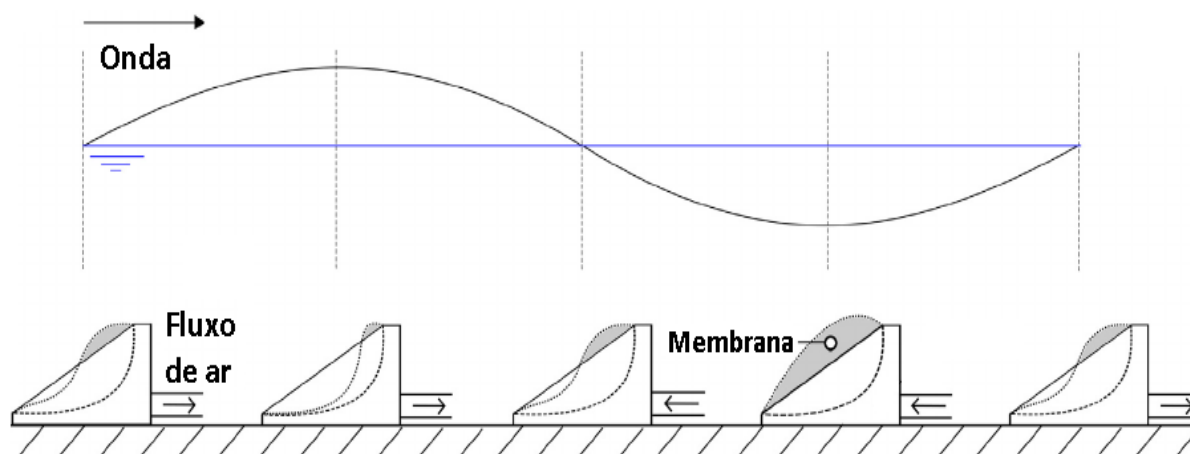


Figura 45 – Princípio de funcionamento de uma membrana flexível. Adaptado de Orphin *et al.* (2017).

Um dispositivo, que concilia as tecnologias de coluna de água oscilante e de dispositivo por galgamento, é apresentado na Figura 46. A câmara da CAO é modificada colocando uma parede vertical dentro desta, e quando o nível da superfície livre da água é superior ao coroamento da parede, a água galga para um reservatório adjacente, onde é temporariamente armazenada. Quando a água dentro deste reservatório chega a um certo nível, é utilizada para acionar uma turbina hidráulica e assim gerar energia elétrica. Este dispositivo adequa-se bem à integração em quebramares verticais, podendo ser construído num caixotão.

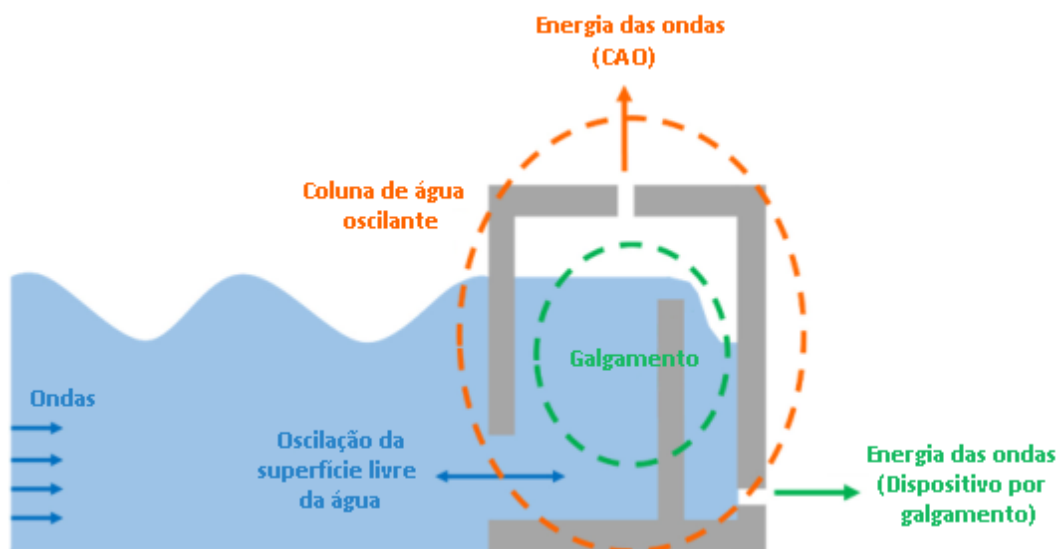


Figura 46 – Dispositivo de aproveitamento da energia das ondas híbrido – CAO e dispositivo por galgamento (SE@PORTS, 2018).

Outro dispositivo que concilia as mesmas tecnologias, de CAO e galgamento, é apresentado na Figura 47. Um dispositivo de galgamento, semelhante ao SSG apresentado na secção 2.3.3.2, é integrado em frente à coluna de água oscilante. A água que galga a estrutura e entra para os reservatórios é turbinada e devolvida ao mar através duma conduta. De forma a prevenir a entrada de água pela conduta, a tampa basculante apenas abre numa direção.

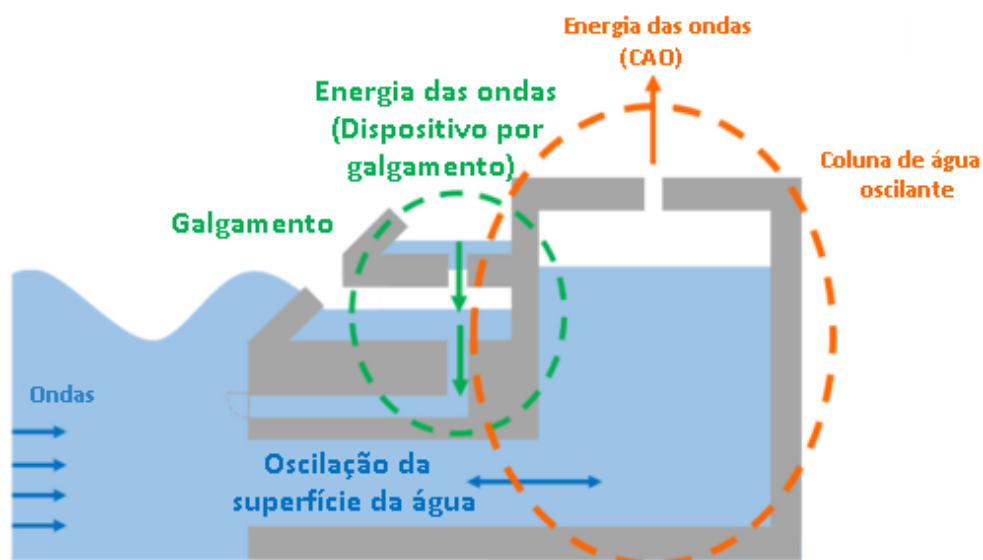


Figura 47 – Dispositivo de aproveitamento da energia das ondas híbrido – CAO e dispositivo por galgamento (SE@PORTS, 2018).

O dispositivo que concilia as tecnologias de membrana flexível e de dispositivo por galgamento é apresentado na Figura 48. Este integra as membranas flexíveis nas rampas do dispositivo de galgamento.

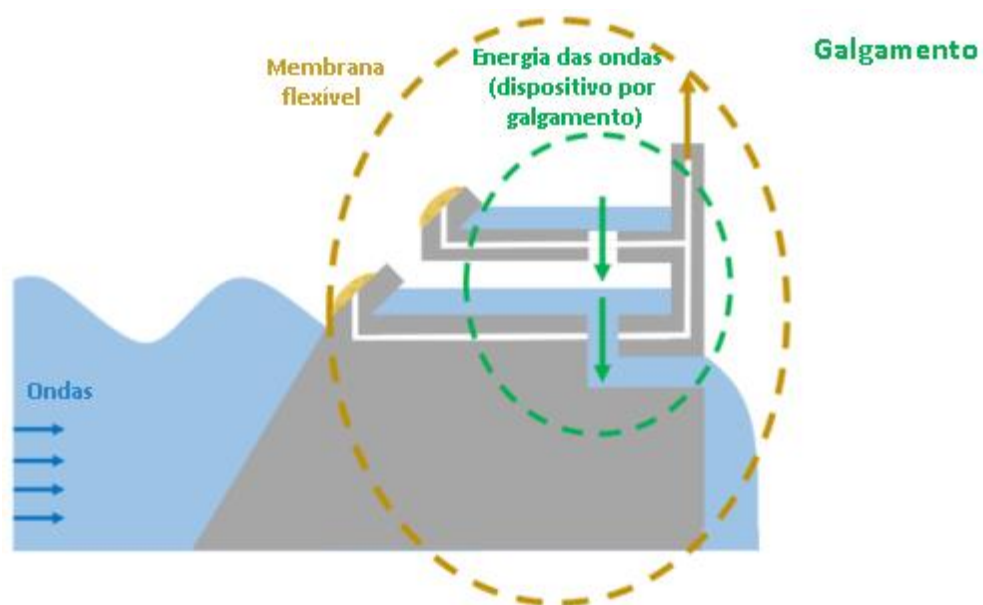


Figura 48 – Dispositivo de aproveitamento da energia das ondas híbrido – Dispositivo por galgamento e membrana flexível (SE@PORTS, 2018).

Finalmente, um dispositivo que concilia as tecnologias de membrana flexível e CAO é apresentado na Figura 49. Este consiste numa coluna de água oscilante na qual se integraram membranas flexíveis na parede virada a barlar.

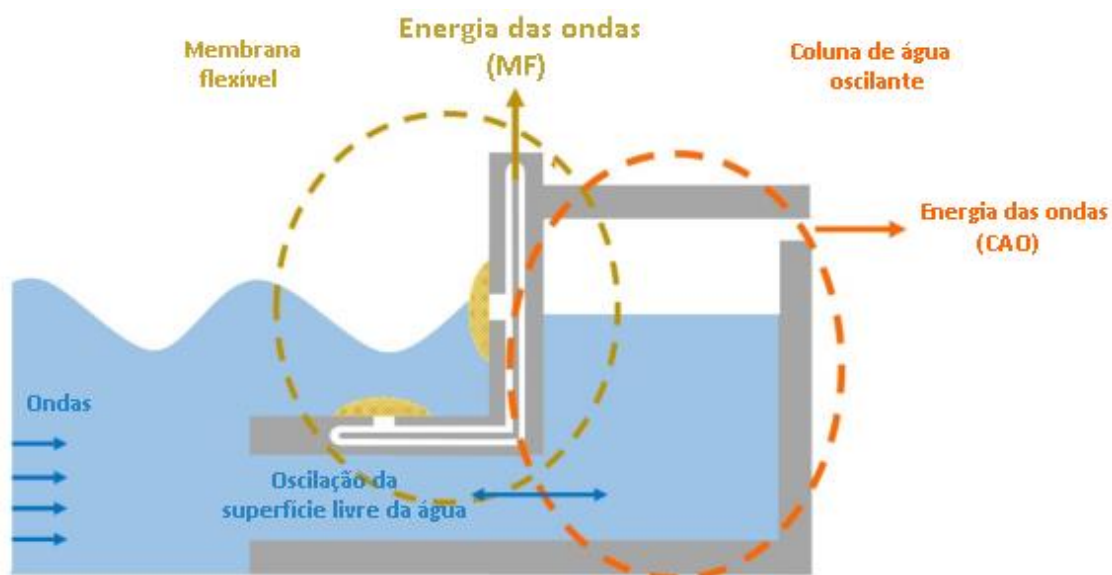


Figura 49 – Dispositivo de aproveitamento da energia das ondas híbrido – CAO e membrana flexível (SE@PORTS, 2018).

# 3

## CASO DE ESTUDO

### 3.1. OBRA DE PROLONGAMENTO DO QUEBRAMAR NORTE DO PORTO DE LEIXÕES

O porto de Leixões encontra-se localizado na foz do rio Leça, que separa as freguesias de Matosinhos e Leça da Palmeira, no Norte de Portugal. É um dos maiores portos do país, com um grande tráfego diário de navios de grandes dimensões, tendo em 2017 passado pelo porto cerca de 2 700 navios e movimentado cerca de 634 000 TEU, uma duplicação do tráfego de contentores desde 2003 (APDL, 2018). Com um *hinterland* constituído por várias indústrias e comércio, boas acessibilidades marítimas, rodoviárias e ferroviárias, e equipamentos modernos, é um dos portos mais competitivos do país. Desde a sua construção, nos finais do século XIX, que o porto tem vindo a ser sucessivamente ampliado e melhorado, de forma a adaptar-se ao crescimento de tráfego e a providenciar as condições de segurança necessárias para o segundo maior porto artificial do país. A Figura 50 mostra uma vista aérea do porto, tirada de oeste para este.



Figura 50 – Vista aérea do porto de Leixões (Correio da Manhã, 2018).

Nesse sentido, a APDL promoveu diversos estudos para analisar soluções que permitam responder às novas exigências originadas pelo crescimento económico e à sua exposição a condições de agitação marítima severas. Estas visam criar condições de segurança para a atividade económica e assegurar a capacidade do porto de receber navios de maiores dimensões. Os estudos foram realizados com o objetivo de permitir ao porto receber navios com 300 m de comprimento, 40 m de boca e 13.5 m de calado, ou seja, de cerca de 5 000 TEU. Para isso, foi necessário aumentar as dimensões (largura e cota do rasto) do canal de acesso e da bacia de rotação e prolongar o molhe principal, de forma a melhorar as condições de tranquilidade na entrada do porto (Fortes *et al.*, 2017).

Os estudos realizados visaram a otimização da geometria do novo troço do quebramar exterior, avaliar os impactes deste nas condições de agitação da praia de Matosinhos e na dinâmica sedimentar na vizinhança do porto. A solução para o prolongamento do quebramar exterior consistiu num quebramar de taludes com o manto resistente da cabeça constituído por blocos cúbicos Antifer de 80 t. O prolongamento terá 300 m de comprimento segundo um alinhamento de 20° para oeste em relação ao quebramar existente.

### **3.2. PRÉ-DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA HÍBRIDO A ESTUDAR**

Dentro do contexto das alterações climáticas, e com o objetivo de procurar soluções energéticas mais sustentáveis, o projeto *SE@PORTS* procura estudar a viabilidade da aplicação dum dispositivo de aproveitamento da energia das ondas híbrido no prolongamento do quebramar exterior do porto de Leixões.

O dispositivo de aproveitamento de energia das ondas híbrido em estudo pretende utilizar duas tecnologias na mesma estrutura. As tecnologias escolhidas foram as de galgamento e de coluna de água oscilante, sendo que um dispositivo híbrido que utilize estas duas tecnologias combinadas na mesma estrutura é inédito, não existindo referências para a sua construção. Não obstante, a junção destes dois conceitos evidencia-se relativamente simples: junta-se a um dispositivo tipo SSG uma coluna de água oscilante que atravesse os vários reservatórios, estando a saída de ar na parte superior da estrutura. Toda a componente mecânica e eléctrica associada ao funcionamento da CAO encontra-se sobre o último reservatório do SSG.

É ainda importante ter em conta que esta estrutura não se encontra isolada, mas sim introduzida numa secção dum quebramar de taludes. Assim, torna-se necessário ter em consideração a geometria do próprio quebramar aquando do dimensionamento do modelo, por forma a que as duas estruturas se interliguem harmoniosamente.

A Figura 51 mostra uma vista em planta da solução projetada para o prolongamento do quebramar Norte do porto de Leixões. Apresenta também a secção onde se pretende integrar o dispositivo híbrido de aproveitamento da energia das ondas, sensivelmente a meio do prolongamento, na batimétrica -15.85 m. O dispositivo em estudo tem uma largura de 20 m, e está do lado de barlar da estrutura.



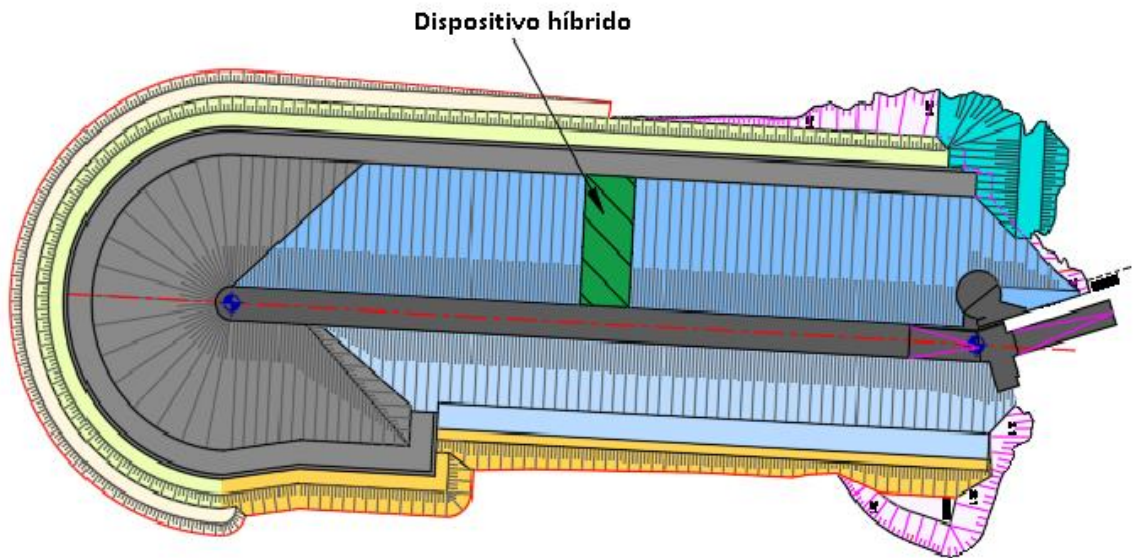


Figura 51 – Vista em planta da solução projetada para o prolongamento do quebramar Norte do porto de Leixões com a secção onde vai ser integrado o dispositivo indicada.

De forma a limitar o impacto visual do dispositivo, é fundamental que a cota de coroamento deste seja a mesma que a do quebramar, que é de 14.75 m. A estrutura final foi obtida conjugando o dimensionamento típico dum SSG, que é um caixotão em betão semelhante aos utilizados normalmente na construção de quebra-mares do tipo vertical, em que do lado de barlar se inserem os reservatórios com as paredes inclinadas, por forma a aumentar o espraio. A coluna de água oscilante atravessa os reservatórios, e tem uma área de 5x5 m<sup>2</sup>. Foram analisados os esquemas dos dispositivos SSG projetados para Sines e Swakopmund, apresentados no Capítulo 2, para a definição das características do dispositivo. Não se pretende que o dispositivo tenha mais do que 20 m de largura, e optou-se por usar esse valor limite de forma a maximizar o volume de água de galgamento. A altura do dispositivo é de cerca de 30.65 m, imposta pela sua cota de coroamento e pela batimetria da zona.

O esquema proposto é apresentado na Figura 52.

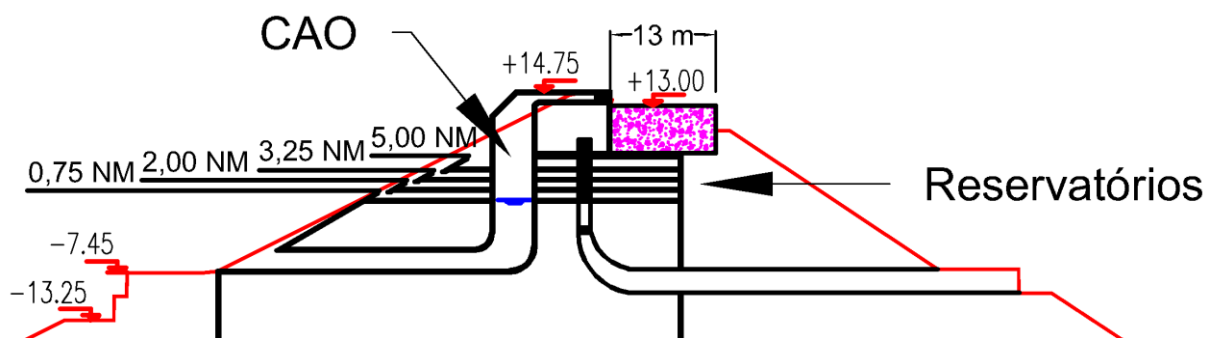


Figura 52 – Esquema do pré-dimensionamento do dispositivo (Geometria A).

Os resultados das simulações numéricas feitas pelo INEGI mostraram que o período de ressonância da CAO era mais elevado do que o pretendido para a configuração utilizada. Os períodos mais frequentes no local em estudo encontram-se entre os 7 s e os 9 s, enquanto que o período de ressonância observado foi de cerca de 12 s. É desejável que a CAO entre em ressonância o mais frequentemente possível, pois isso leva a uma produção energética superior. Com o objetivo de reduzir este período, considerou-se diminuir o comprimento da entrada da coluna de água. No entanto, para isso, é necessário cortar a rampa frontal do dispositivo de galgamento, o que tem um impacto negativo no caudal de galgamento e, conseqüentemente, na eficiência do dispositivo. Assim, optou-se por considerar três geometrias que permitissem avaliar o efeito do corte da rampa quer na componente de CAO, quer na componente de galgamento. As geometrias escolhidas são apresentadas na Figura 52 (Geometria A), na Figura 53 (Geometria B) e na Figura 54 (Geometria C).

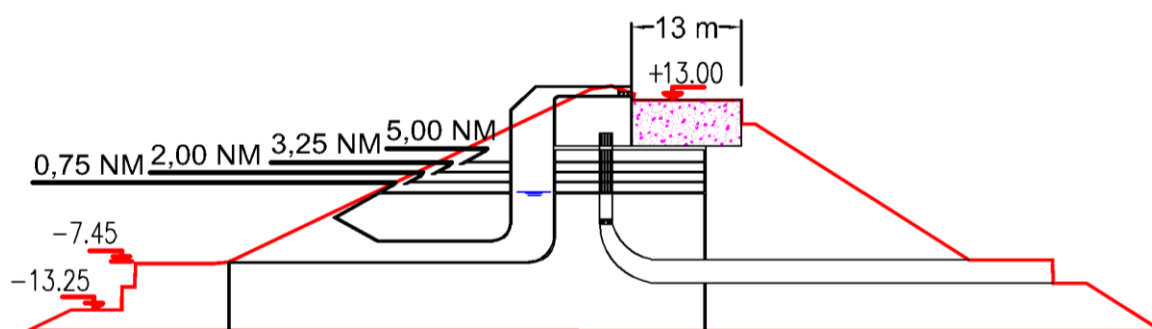


Figura 53 – Geometria B do sistema híbrido de aproveitamento da energia das ondas.

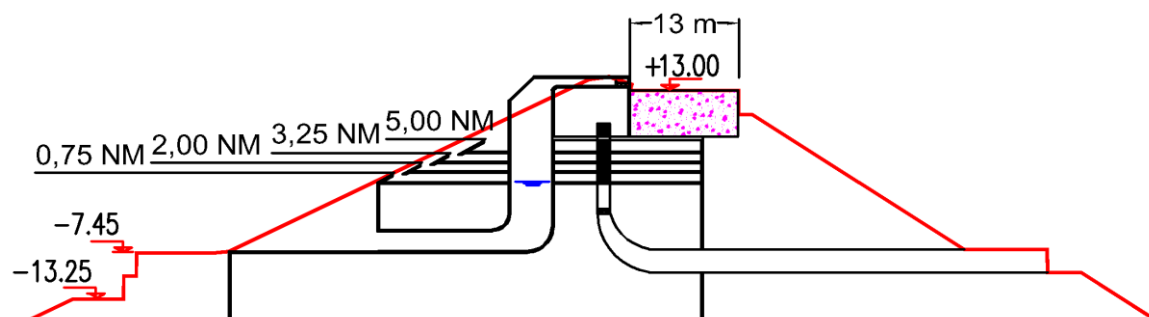


Figura 54 – Geometria C do sistema híbrido de aproveitamento da energia das ondas.

### 3.3. OTIMIZAÇÃO DO DISPOSITIVO POR GALGAMENTO

#### 3.3.1. INTRODUÇÃO

O conversor de energia das ondas que funciona por galgamento a ser estudado baseia-se no *Seawave Slot-Cone Generator*, cujo modo de funcionamento foi já descrito na secção 2.3.3.2. Já foram realizados diversos estudos sobre este dispositivo, nomeadamente por Kofoed (2005), Margheritini (2009), Vicinanza (2012) e Oliveira *et al.* (2016). Neste capítulo pretende-se aprofundar esse estudo para o caso específico de Leixões.

O processo de otimização do sistema de galgamento que poderá ser integrado na extensão do quebramar norte do porto de Leixões compreenderá as seguintes etapas:

Caracterização do regime de agitação marítima e dos níveis de água no local em estudo;

- Determinação do número de reservatórios a utilizar;
- Determinação de cotas de cristas de reservatório otimizadas;
- Pré-avaliação do tamanho e das características das turbinas a serem utilizadas;
- Avaliação da eficiência hidráulica e dos reservatórios para a configuração escolhida;
- Estimativa da energia produzida anualmente.

### 3.3.2. CARACTERIZAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA E DOS NÍVEIS DE ÁGUA

Inserido no projeto de prolongamento do quebramar norte do porto de Leixões, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) elaborou um estudo dos regimes de agitação marítima na zona adjacente ao porto de Leixões (LNEC, 2017). Para isso, foram primeiro caracterizados os regimes de agitação marítima ao largo, sendo estes depois transferidos para a zona do futuro prolongamento do quebramar.

Idealmente, para avaliar as características de agitação marítima locais, os dados seriam obtidos através duma boia ondógrafo o mais próximo possível do local. No caso de Leixões, existe uma boia ondógrafo Datawell que permite recolher dados que, após tratamento, levam à estimativa dos seguintes parâmetros:

- Altura de onda significativa –  $H_s$  (m): Média do terço mais elevado das alturas de onda que foram registadas durante o período de observação;
- Altura de onda máxima –  $H_{máx}$  (m): Máxima altura de onda registada durante o período de observação;
- Período de onda médio –  $T_z$  (s): Média dos períodos observados no registo. Representa o período típico das ondas registadas durante o período de observação;
- Período de onda máximo –  $T_{máx}$  (s): Máximo período de onda registado durante o período de observação;
- Período de onda de pico –  $T_p$  (s): Período correspondente de frequência com o máximo valor de densidade espectral.

Esta boia tem recolhido dados desde 1993, e está situada na batimétrica -84 m (ZHL), a cerca de 28 km do porto de Leixões. Para o estudo em questão, a Associação dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo (APDL) forneceu ao LNEC os dados referentes a um período de aproximadamente 10 anos (2004-2013), dos quais constam a altura de onda significativa ( $H_s$ ), o período de onda médio ( $T_z$ ) e a direção de onda média ( $DIR$ ).

Devido à exiguidade dos dados provenientes da boia ondógrafo, o LNEC baseou também a obtenção do regime de agitação marítima em estimativas obtidas pelo modelo de *hindcast* WAM (WAMDI Group, 1988) do Centro Europeu de Previsão Meteorológica a Médio Prazo (ECMWF) para um período de aproximadamente 38 anos. Neste caso, o ponto escolhido foi o mais próximo que havia do local pretendido e situa-se a sul da boia ondógrafo, sensivelmente em frente ao porto de Leixões. Este ponto situa-se a cerca de 23 km da zona de implantação da extensão do quebramar.

A transferência dos regimes de agitação marítima do largo para o porto de Leixões foi efetuada utilizando o modelo SWAN (Booij *et al.*, 2006), desde os pontos ao largo previamente referidos até à zona de implantação da extensão do quebramar, aproximadamente na batimétrica dos -21.1 m (ZHL). Este modelo numérico é de domínio público e está em constante desenvolvimento pela *Delft University of Technology*, permitindo fazer a geração, propagação e dissipação da agitação marítima. Baseia-se na equação de conservação da ação de onda e propaga a agitação marítima desde o largo até à costa considerando os fenómenos da refração e do empolamento devido à variação da batimetria e à presença de correntes, o crescimento de onda por ação dos ventos, a rebentação por influência do fundo e por

excesso de declividade (*whitecapping*), a dissipação de energia devido ao atrito de fundo, reflexão por correntes opostas e transmissão através de obstáculos (LNEC, 2017). A Figura 55 mostra as localizações da boia de Leixões, do ponto de cálculo do modelo de reconstituição WAM e do ponto local.

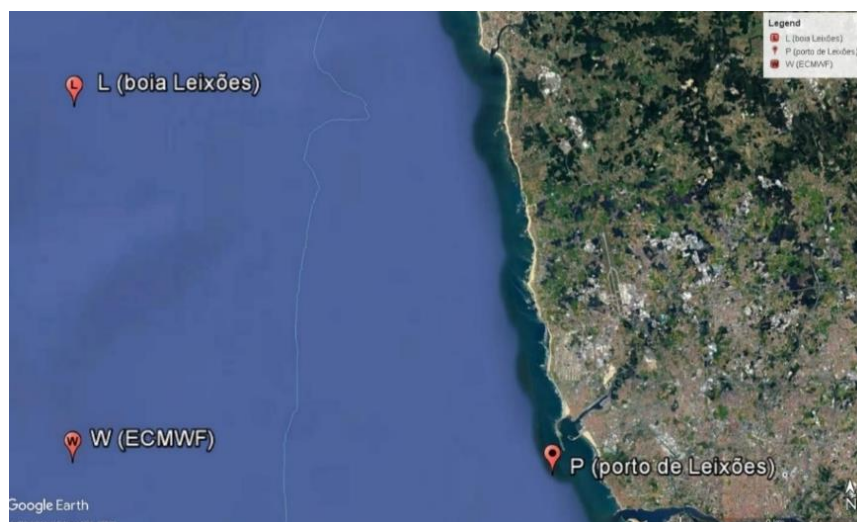


Figura 55 – Localizações relativas do ponto da boia de Leixões (ponto L), do ponto de cálculo do modelo de reconstituição WAM (ponto W), ambos ao largo de Leixões, e do ponto local, P – Google Earth© 2017 (LNEC, 2017).

O modelo SWAN gera diversos resultados, de entre os quais se destacam a altura de onda significativa, os períodos de pico e médio, as direções de pico e média e a dispersão direcional. No estudo realizado foram obtidos valores de 6 em 6 horas para cada ponto. Para esta dissertação, apenas os valores para o ponto em frente ao quebramar norte do porto de Leixões têm interesse prático.

Na Tabela 4 apresentam-se estatísticas descritivas das séries de altura de onda significativa ( $H_s$ ), período médio ( $T_z$ ) e direção de onda média ( $DIR$ ) da boia (ponto L) e estimados pelo ECMWF (ponto W).

Tabela 4 – Estatísticas descritivas das séries de altura de onda significativa ( $H_s$ ), período médio ( $T_z$ ), e direção de onda média ( $DIR$ ) da boia (ponto L) e estimados pelo ECMWF (ponto W) (LNEC, 2017).

	$H_s(W)$	$T_z(W)$	$DIR(W)$	$H_s(L)$	$T_z(L)$	$DIR(L)$
<b>Parâmetros</b>	(m)	(s)	(°)	(m)	(s)	(°)
Média	2.05	9.1	291	1.92	7.1	303
Mínimo	0.40	4.4	0	0.28	3.1	91
Máximo	9.82	16.7	360	8.82	14.6	359
Número de registos	55032	55032	55032	12150	12150	12150

Verifica-se que há coerência entre os dados provenientes da boia e os dados provenientes do ECMWF, sendo os valores de altura de onda significativa, período médio e direção média relativamente semelhantes. Não obstante, as gamas de período médio estimado pelo ECMWF apresentam um

diferencial de cerca de 2 s em relação aos valores obtidos pela boia ondógrafo, sendo os primeiros superiores aos segundos. Esta diferença pode dever-se ao diferente modo de obtenção de dados, sendo que os do ECMWF são obtidos por *hindcast*, logo estimados, enquanto que os valores da boia são valores medidos, que estão, contudo, sujeitos a erro humano ou a imprecisão dos equipamentos. Na Figura 56 e na Figura 57 apresenta-se a distribuição conjunta de  $H_s$  e  $T_z$  para os dois pontos ao largo.

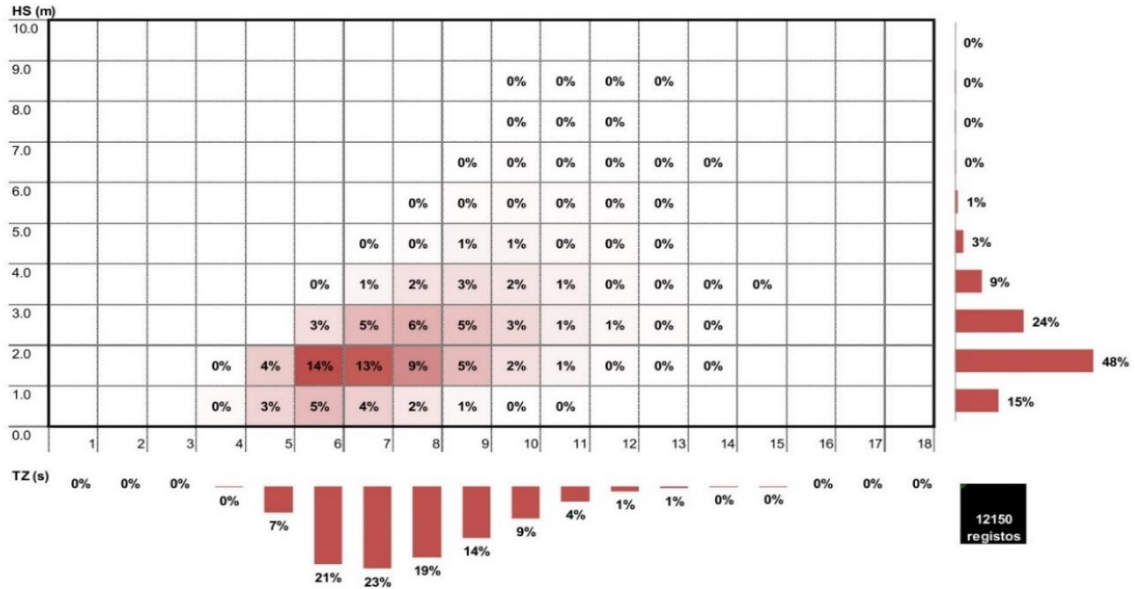


Figura 56 – Distribuição conjunta de  $H_s$  e  $T_z$  no ponto L. Dados da boia de Leixões (LNEC, 2017).

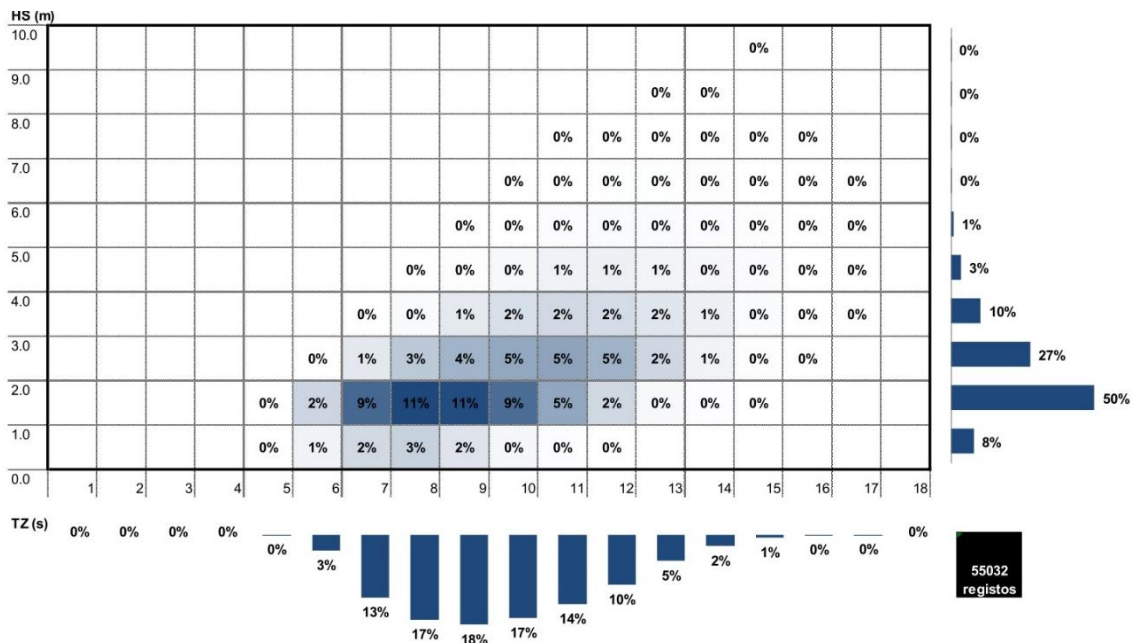


Figura 57 – Distribuição conjunta de  $H_s$  e  $T_z$  no ponto L. Dados do ECMWF (LNEC, 2017).

Após a aplicação do modelo SWAN, obtiveram-se os dados da agitação marítima no ponto P, situado na zona frontal ao local onde será construída a extensão do quebramar Norte. A Tabela 5 apresenta algumas estatísticas descritivas do regime de agitação marítima em função da origem dos valores, a Figura 58 e a Figura 59 a distribuição conjunta de  $H_s$  e  $T_z$ , também em função da origem dos valores.

Tabela 5 – Estatísticas descritivas das séries de altura de onda significativa ( $H_s$ ), período médio ( $T_z$ ), e direção de onda média ( $DIR$ ) no ponto P, referentes aos dados da boia (ponto L) e aos dados estimados por ECMWF (ponto W) (LNEC, 2017).

Parâmetros	$H_s(W)$	$T_z(W)$	$DIR(W)$	$H_s(L)$	$T_z(L)$	$DIR(L)$
	m	s	°	m	s	°
Média	1.63	8.7	295	1.60	7.0	298
Mínimo	0.00	3.9	182	0.00	3.2	182
Máximo	8.98	17.3	342	7.41	15.3	337
Número de registos	54959	54959	54959	12146	12146	12146

Observa-se uma pequena redução da altura de onda significativa do largo para o local em estudo. Isto deve-se à refração e à difração das ondas devido à mudança da batimetria dos fundos. Note-se, também, que os períodos de onda têm uma maior gama de variação junto à costa em relação ao largo. Continua a verificar-se uma diferença de cerca de 2 s entre os períodos obtidos a partir do ECMWF e a partir dos dados da boia ao largo de Leixões.

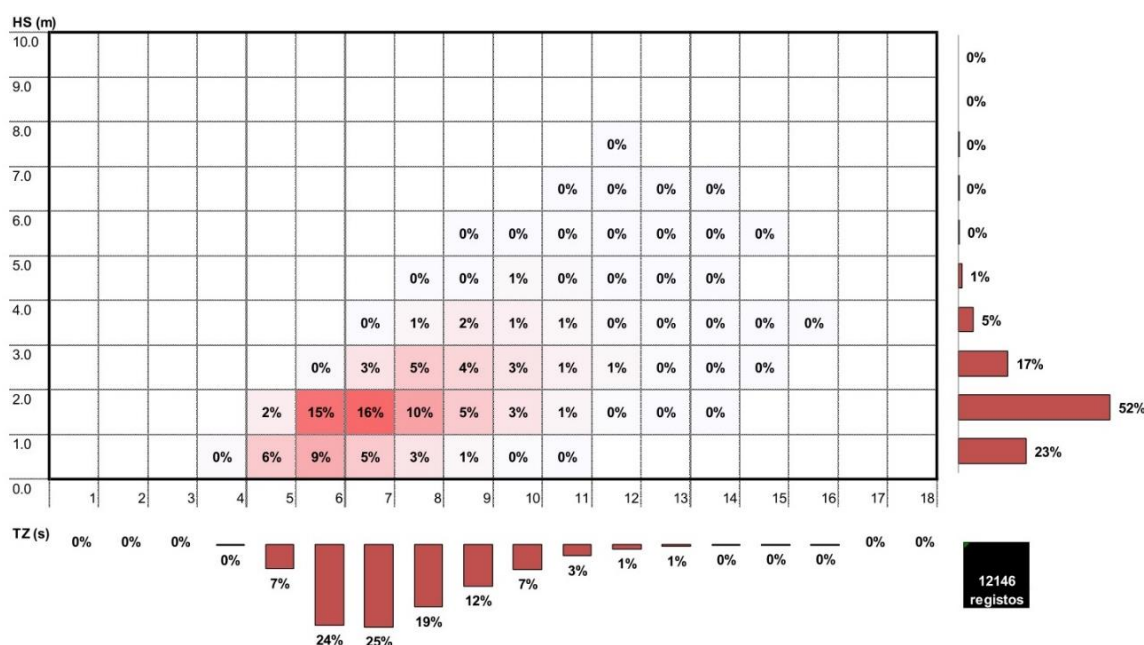


Figura 58 – Distribuição conjunta de  $H_s$  e  $T_z$  no ponto P. Dados da boia de Leixões (LNEC, 2017).

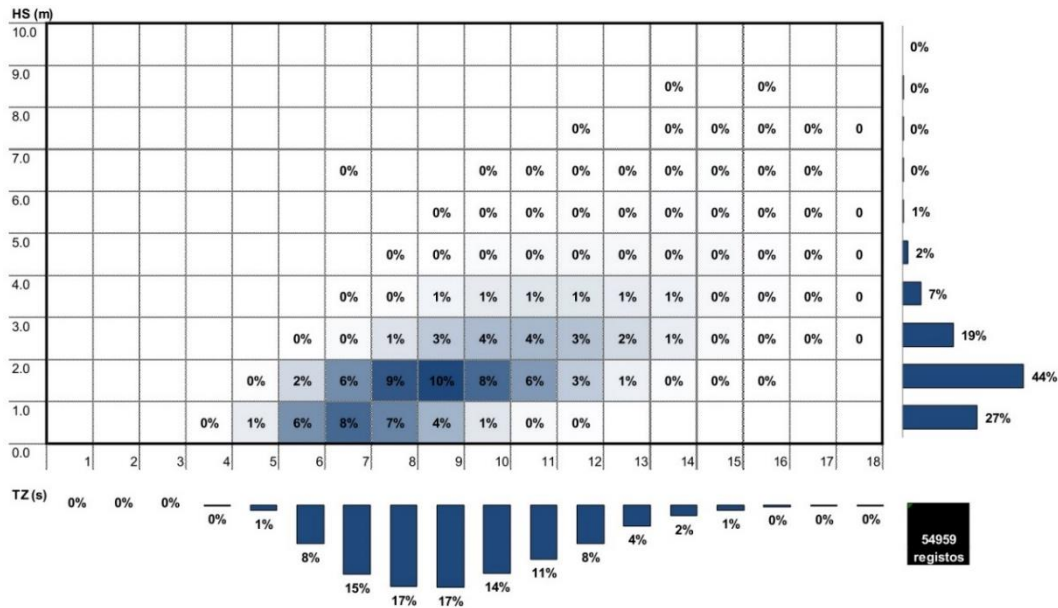


Figura 59 – Distribuição conjunta de Hs e Tz no ponto P. Dados do ECMWF (LNEC, 2017).

Tendo em conta as duas fontes de dados, optou-se por fazer uma média entre os valores de agitação marítima obtidos para o local de implantação da extensão do quebramar através do ECMWF e da boia. Assim, chegou-se à seguinte distribuição da Figura 60.

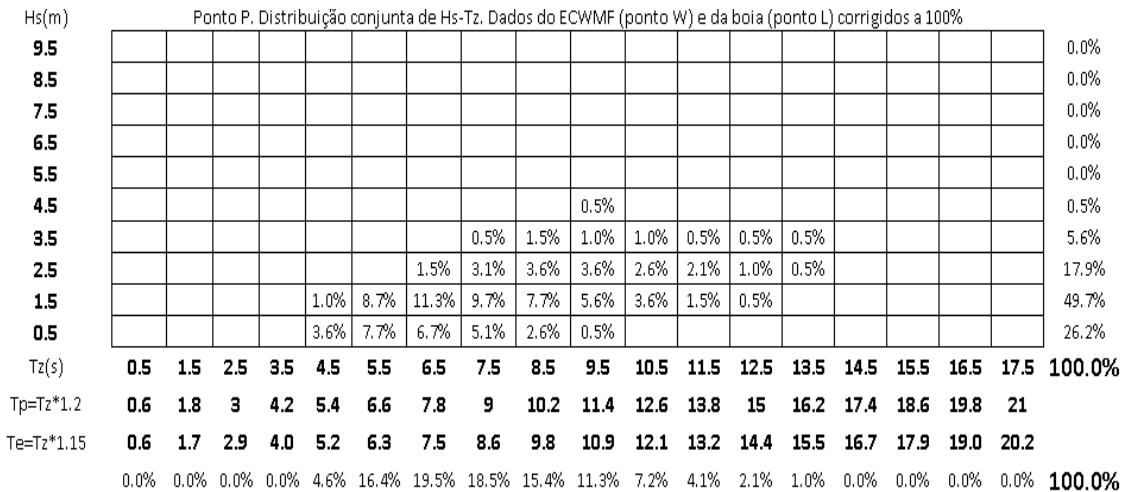


Figura 60 – Distribuição conjunta de Hs e Tz no ponto P. Média dos dados da boia e do ECMWF.

Como se considera um espectro de JONSWAP com um fator de forma do pico igual a  $\gamma = 3.3$  em que se observa a relação,

$$1.12T_e = 1.29T_z = T_p \tag{9}$$

temos,

$$T_e = \frac{1.29}{1.12} T_z = 1.15 T_z \quad (10)$$

A energia disponível pode ser calculada pela expressão (4). Multiplicando a energia disponível para um estado do mar pela probabilidade de ocorrência deste, obtém-se a energia média disponível para o local. Elaborou-se assim uma matriz onde se pode ver a energia disponível em função do estado do mar, permitindo verificar quais os estados do mar que permitem obter mais energia durante o ano. O resultado é apresentado na Figura 61, sendo que a energia média total anual é de 135.9 MWh/m/ano, o que corresponde a uma potência média anual de 15.5 kW/m/ano.

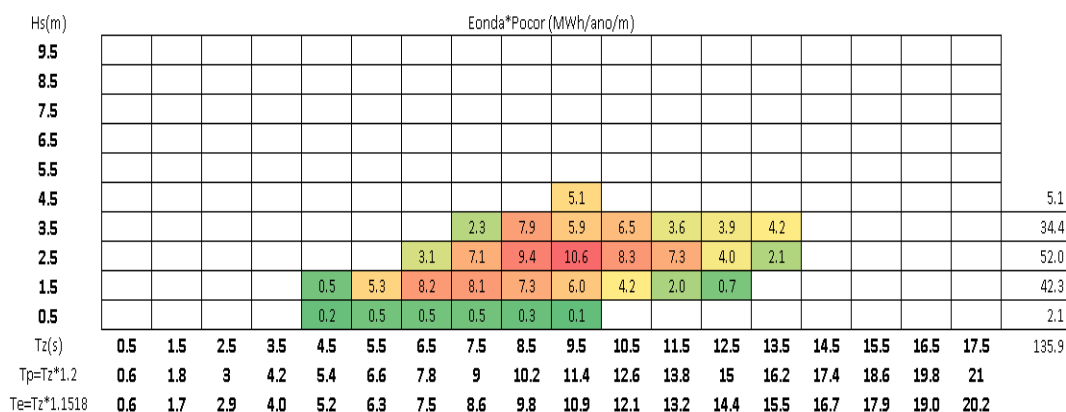


Figura 61 – Energia média disponível para cada estado do mar em função da sua probabilidade de ocorrência.

Repare-se que os estados do mar com alturas de onda significativas de 2.5 m e períodos médios entre 8 e 10 s são os que contêm mais energia. No entanto, há uma gama relativamente extensa de estados do mar com energia considerável, particularmente para alturas de onda significativas a partir de 1.5 m. A pouca energia contida nos estados do mar com alturas de onda significativas pequenas, nomeadamente inferiores a 1 m, deve-se ao facto da energia variar com o quadrado da altura de onda. Consequentemente, apesar da probabilidade de ocorrência bastante elevada (26.2 %) de ondas desta altura, a energia que contêm é consideravelmente pequena. Inversamente, os estados do mar com alturas de onda maiores, nomeadamente 4.5 m, contêm pouca energia anualmente devido à sua fraca probabilidade de ocorrência.

De seguida procedeu-se à caracterização da maré no porto de Leixões. Para tal, utilizaram-se dados cedidos pelo porto de Leixões que correspondem aos níveis da superfície livre da água medidos em relação ao ZHL. Os valores disponibilizados referem-se a um período de cerca de cinco anos, entre 20 de janeiro de 2005 e 20 de novembro de 2009, com uma falha nos dados entre 22 de março de 2005 e 14 de abril de 2005. Uma análise dos dados permitiu obter as estatísticas apresentadas na Tabela 6, referidas ao ZHL (1.674 m abaixo do nível médio).

Tabela 6 – Estatísticas descritivas da maré no porto de Leixões para os períodos indicados.

Valor mínimo:	0.10 m
Valor máximo:	4.23 m
Valor médio:	2.16 m
Número total de valores:	399 628



De forma a fazer uma representação simplificada das marés no local em estudo, optou-se por calcular a frequência de ocorrência de intervalos de maré espaçados de 0.5 m. Assim, chegou-se à distribuição apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 – Frequência de ocorrência de marés no porto de Leixões.

Intervalo	Valor médio	Número de ocorrências	Frequência (%)
]0 m ; 0.5 m]	0.25 m	1987	0.50
]0.5 m ; 1.0 m]	0.75 m	26 154	6.55
]1.0 m ; 1.5 m]	1.25 m	70 926	17.75
]1.5 m ; 2.0 m]	1.75 m	79 562	19.91
]2.0 m ; 2.5 m]	2.25 m	69 242	17.33
]2.5 m ; 3.0 m]	2.75 m	83 213	20.82
]3.0 m ; 3.5 m]	3.25 m	54 782	13.71
]3.5 m ; 4.0 m]	3.75 m	13 455	3.37
]4.0 m ; 4.5 m]	4.25 m	307	0.08
		<b>399 628</b>	<b>100.0</b>

Considerar-se-á o valor médio do intervalo associado à frequência da ocorrência de marés nesse intervalo para simular o efeito das marés. Como não existem dados que relacionem os estados de agitação marítima com as marés é, conseqüentemente, necessário considerar que os estados do mar se distribuem pelas marés conforme a sua probabilidade de ocorrência.

### 3.3.3. OTIMIZAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS – NÚMERO E COTAS DE ENTRADA

#### 3.3.3.1. Sem consideração da maré

Com base na agitação marítima incidente no local do futuro quebramar, procurou-se otimizar as cotas das cristas dos reservatórios e determinar o número de reservatórios a utilizar. Este processo já foi seguido por outros autores para diferentes localizações. Por exemplo, Margheritini *et al.* (2012) estudaram a geometria dum WEC baseado no SSG com dois e três reservatórios para ser implantado no porto de Hanstholm, e, para o efeito, utilizaram dados da agitação marítima local. Para otimizar as cotas das cristas dos reservatórios seguiram um processo iterativo de forma a maximizar a eficiência hidráulica dada por,

$$\eta_{hid} = \frac{P_{crista}}{P_{onda}} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{res}} \rho q_{ov,j} R_{c,j}}{\frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e} \quad (11)$$

em que  $R_{c,j}$  representa a cota da crista do reservatório  $j$  em relação ao nível da água,  $\rho$  a massa volúmica da água do mar,  $g$  a aceleração da gravidade,  $H_s$  a altura de onda significativa,  $T_e$  o período energético das ondas incidentes e  $q_{ov,j}$  o caudal médio de galgamento no reservatório  $j$  calculado com a equação desenvolvida por Kofoed (2002a).

No presente trabalho estudou-se a utilização de três, quatro ou cinco reservatórios, uma vez que a variação do nível médio da água do mar é mais elevada que em Hanstholm.

De forma a facilitar o processo de cálculo iterativo, optou-se por elaborar uma folha de cálculo com o *software* Microsoft Excel®, com o objetivo de calcular quais as cotas das cristas dos reservatórios que resultavam no maior rendimento hidráulico possível. A folha em questão é apresentada no Anexo A1 para que o leitor compreenda melhor o processo. Inicialmente pretendeu-se comparar as eficiências hidráulicas para três, quatro ou cinco reservatórios, com cotas de cristas otimizadas. Para isso, começou por se otimizar as cristas para o nível de maré fixo no nível médio da água do mar. Utilizou-se a ferramenta *Solver* do Excel para calcular os valores otimizados das cotas das cristas, começando pelo método de resolução *Generalized Reduced Gradient (GRG) Não-Linear*, e de seguida, com os valores obtidos por este método como ponto de partida, utilizou-se o método Evolucionário que é mais robusto, de forma a confirmar o resultado. De seguida utilizou-se o *software* WOPSim para simular o funcionamento do dispositivo para as cotas anteriormente obtidas.

Os estados de agitação marítima utilizados foram calculados agrupando as probabilidades em sete blocos, apresentados na Figura 62.

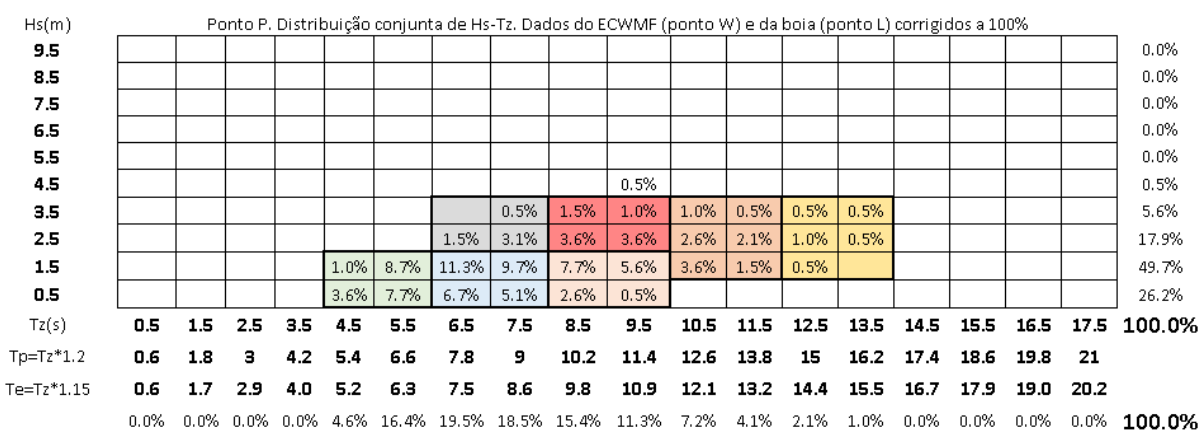


Figura 62 – Agrupamento dos estados de mar por blocos.

Uma vez que a soma das probabilidades de ocorrência perfazia 99.49 %, para a utilização no WOPSim, essas probabilidades foram ajustadas até que a soma fosse 100 %, pois o programa apenas funciona para um somatório de probabilidades igual a 1.

Os estados considerados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Estados de mar considerados.

	Prob (%)	Hs (m)	Tz (s)	Tp (s)	Te (s)
<b>SS1</b>	21.03	1.08	5.28	6.3	6.1
<b>SS2</b>	32.82	1.24	6.95	8.3	8.0
<b>SS3</b>	16.41	1.37	8.88	10.7	10.2
<b>SS4</b>	5.13	2.62	7.20	8.6	8.3
<b>SS5</b>	9.74	2.80	8.97	10.8	10.3
<b>SS6</b>	11.28	2.29	10.86	13.0	12.5
<b>SS7</b>	3.08	2.75	12.83	15.4	14.8

Os valores de  $H_s$  e  $T_z$  que caracterizam cada bloco foram calculados através de,

$$H_{s,SS} = \sqrt{\frac{\sum_{SS,bin=1}^n (H_{s,SS,bin}^2 \times Prob_{SS,bin})}{\sum_{SS,bin=1}^n Prob_{SS,bin}}} \quad (12)$$

e

$$T_{z,SS} = \frac{\sum_{SS,bin=1}^n (T_{z,SS,bin} \times Prob_{SS,bin})}{\sum_{SS,bin=1}^n Prob_{SS,bin}} \quad (13)$$

O Anexo B mostra um exemplo dos resultados apresentados pelo programa após cada simulação.

Os valores considerados inicialmente para a geometria dos reservatórios foram arbitrados tendo em conta a geometria do quebramar em que se pretende que o dispositivo seja inserido. Como a largura e o comprimento dos reservatórios não influenciam a eficiência hidráulica do dispositivo, nesta fase do estudo não foi necessário estudar estes parâmetros. O valor da rampa do dispositivo considerado foi de 27°, o mesmo que o da inclinação do quebramar projetado.

Após a otimização das cotas das cristas baseada na eficiência hidráulica e na utilização do programa WOPSim, obtiveram-se as seguintes cotas para as cristas dos reservatórios, referidas ao nível médio da água do mar, e os respetivos rendimentos, apresentadas na Tabela 9. Apresenta-se o rendimento calculado pela equação (11) e pelo WOPSim.

Tabela 9 – Cotas das cristas dos reservatórios e eficiência hidráulica associada.

Nº reservatórios	Cotas das cristas (NMM)	$\eta_{hid}$	$\eta_{hid}$ WOPSim
3	$R_{c,1}=0.39m$	30.7%	33.5%
	$R_{c,2}=1.31m$		
	$R_{c,3}=3.21m$		
4	$R_{c,1}=0.25m$	35.6%	38.8%
	$R_{c,2}=0.87m$		
	$R_{c,3}=1.82m$		
	$R_{c,4}=3.70m$		
5	$R_{c,1}=0.17m$	39.0%	42.5%
	$R_{c,2}=0.64m$		
	$R_{c,3}=1.28m$		
	$R_{c,4}=2.24m$		
	$R_{c,5}=4.09m$		

Pelos resultados obtidos constata-se que há uma melhoria da eficiência hidráulica ao passar de três para quatro reservatórios, e de quatro para cinco. Não obstante, a melhoria é mais pequena de cada vez que se aumenta o número de reservatórios, sendo que a eficiência hidráulica sobe de 33.5 % para 38.8 % (aumento de 5.3 %) e de 38.8 % para 42.5 % (aumento de 3.7 %), respetivamente, ao passar de três para quatro e de quatro para cinco reservatórios. Assim, observa-se um ganho em eficiência ao aumentar o número de reservatórios. No entanto, o aumento do número de reservatórios implica custos adicionais de construção, equipamento e manutenção.

No entanto, questões práticas associadas à exploração do WEC tornam necessária a consideração duma altura mínima para cada reservatório, ou seja, distância vertical mínima entre as cristas da rampa de

entrada nos reservatórios. Essa altura mínima permite uma limpeza mais fácil dos reservatórios, pois as condições a que está sujeito um WEC *onshore* tornam-no muito suscetível à acumulação de sedimentos, detritos e outros objetos dentro dos reservatórios, que têm de ser removidos para o seu correto funcionamento. Permite ainda um intervalo para altura de funcionamento das turbinas razoável. Esta consideração é corroborada por Margheritini *et al.* (2012), que consideram uma distância mínima igual a 1.3 m. Optou-se por considerar que a diferença entre cada reservatório deveria ser de 1.25 m. Outra restrição considerada por Margheritini *et al.* (2012) foi uma altura mínima de 1 m para a crista do primeiro reservatório de modo a permitir à turbina um intervalo de funcionamento também suficientemente grande. Adotou-se a mesma imposição. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 10 e na Tabela 11. A Tabela 10 apresenta valores considerando apenas a imposição de distância mínima entre reservatórios, enquanto que a Tabela 11 apresenta as duas imposições.

A Figura 63 apresenta a eficiência hidráulica do dispositivo em função do número de reservatórios e para as diferentes restrições consideradas na análise.

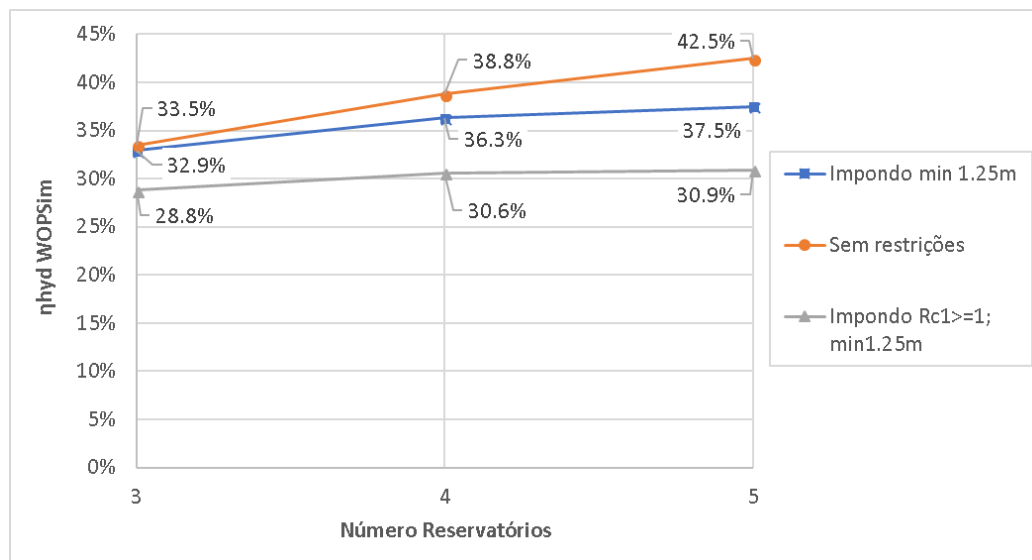


Figura 63 – Eficiência hidráulica obtida através do WOPSim em função do número de reservatórios.

Os resultados da Figura 63 mostram uma nítida diminuição da eficiência hidráulica quando são consideradas as restrições que resultam de questões práticas. No entanto, as restrições impostas são consideradas imprescindíveis para o bom funcionamento a longo prazo do dispositivo e, conseqüentemente, não poderão ser descartadas. O aumento do número de reservatórios leva, em qualquer dos casos, a um aumento da eficiência hidráulica. Este aumento é menos significativo quando as imposições são consideradas. Repare-se ainda que as cotas das cristas dos reservatórios são determinadas pelas condições impostas, exceto para o último reservatório. Com efeito, o primeiro reservatório tem a crista sempre à cota 1.00 m (NMM) quando se impõe este valor como mínimo, sendo que a diferença de cotas entre reservatórios é sempre de 1.25 m, exceto do penúltimo para o último reservatório.

Concluiu-se deste estudo que o aumento do número de reservatórios se traduz num aumento da eficiência hidráulica, sendo que esta é mais significativa de três para quatro do que de quatro para cinco reservatórios. É ainda evidente que há certas imposições práticas, consideradas indispensáveis, que comprometem consideravelmente a eficiência do dispositivo.

Tabela 10 – Cotas das cristas dos reservatórios otimizadas impondo uma distância mínima igual a 1.25 m entre cotas de cristas dos reservatórios.

<b>Nº reservatórios</b>	<b>Cotas das cristas (NMM)</b>	<b><math>\eta_{hid}</math></b>	<b><math>\eta_{hid}</math> WOPSim</b>
3	$R_{c,1}=0.41m$	30.2%	32.9%
	$R_{c,2}=1.66m$		
	$R_{c,3}=3.55m$		
4	$R_{c,1}=0.33m$	33.2%	36.3%
	$R_{c,2}=1.58m$		
	$R_{c,3}=2.83m$		
	$R_{c,4}=4.64m$		
5	$R_{c,1}=0.31m$	34.4%	37.5%
	$R_{c,2}=1.56m$		
	$R_{c,3}=2.81m$		
	$R_{c,4}=4.06m$		
	$R_{c,5}=5.77m$		

Tabela 11 – Cotas das cristas dos reservatórios otimizadas impondo uma distância mínima igual a 1.25 m entre cotas de cristas dos reservatórios e uma cota mínima de 1 m para o primeiro reservatório.

<b>Nº reservatórios</b>	<b>Cotas das cristas (NMM)</b>	<b><math>\eta_{hid}</math></b>	<b><math>\eta_{hid}</math> WOPSim</b>
3	$R_{c,1}=1.00m$	26.4%	28.8%
	$R_{c,2}=2.25m$		
	$R_{c,3}=4.11m$		
4	$R_{c,1}=1.00m$	28.1%	30.6%
	$R_{c,2}=2.25m$		
	$R_{c,3}=3.50m$		
	$R_{c,4}=5.26m$		
5	$R_{c,1}=1.00m$	28.8%	30.9%
	$R_{c,2}=2.25m$		
	$R_{c,3}=3.50m$		
	$R_{c,4}=4.75m$		
	$R_{c,5}=6.42m$		

### 3.3.3.2. Com inclusão da maré

A otimização do número e das cotas de entrada dos reservatórios foi também feita tendo em conta as marés. Foi mais uma vez idealizada uma folha de cálculo em Excel (Anexo A2) para otimizar a altura das cristas dos reservatórios, desta vez tendo em conta as marés e a sua probabilidade de ocorrência. Todos os resultados obtidos foram calculados considerando uma média ponderada dos resultados para cada maré com a probabilidade de ocorrência dessa maré. Algumas das simulações no WOPSim foram realizadas desprezando os níveis de maré mais extremos, ] 0 ; 0.25 m ] e ] 4 ; 4.5 m ], devido à sua baixa probabilidade de ocorrência (0.50 % e 0.08 % respetivamente), e impacto na solução, simplificando assim o trabalho. Como o peso nos valores finais destas marés é desprezável, não foi feita distinção

entre as simulações feitas considerando-as ou não. Optou-se ainda por baixar a imposição de altura mínima do primeiro reservatório de 1 m para 0.75 m, pois isto permite aumentar a eficiência hidráulica e, sendo a amplitude máxima de maré no local de cerca de 4 m, o primeiro reservatório terá com frequência quedas superiores a 0.75 m.

Os resultados obtidos neste trabalho de otimização são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Cotas das cristas dos reservatórios otimizadas impondo uma distância mínima igual a 1.25 m entre cotas de cristas dos reservatórios e uma cota mínima de 0.75 m para o primeiro reservatório.

Nº reservatórios	Cotas das cristas (NMM)	$\eta_{hid}$
3	R <sub>c,1</sub> =0.75m R <sub>c,2</sub> =2.08m R <sub>c,3</sub> =4.17m	23.2%
4	R <sub>c,1</sub> =0.75m R <sub>c,2</sub> =2.00m R <sub>c,3</sub> =3.25m R <sub>c,4</sub> =5.09m	28.5%
5	R <sub>c,1</sub> =0.75m R <sub>c,2</sub> =2.00m R <sub>c,3</sub> =3.25m R <sub>c,4</sub> =4.50m R <sub>c,5</sub> =6.25m	29.9%

Mais uma vez verifica-se que existe uma tendência para as cotas dos reservatórios serem controladas pelas restrições que resultam de questões operacionais. Observa-se ainda que a presença de marés faz diminuir a eficiência hidráulica do dispositivo. Esta diminuição era contudo expectável, tal como foi demonstrado por Vicinanza *et al.* (2012), trabalho no qual consta o gráfico da Figura 64 que mostra a diminuição relativa da eficiência hidráulica para um local com e sem maré.

Vicinanza *et al.* (2012) referem que pode ser conseguido um ganho de 3 % na eficiência hidráulica quando se otimizam as alturas das cristas dos reservatórios tendo em conta a maré, comparativamente a uma otimização feita apenas em relação às condições de agitação marítima e ao nível médio da água do mar.

A existência duma amplitude de maré de 3.2 m resulta numa perda de eficiência hidráulica de cerca de 21 % em média (Margheritini *et al.*, 2009a). No caso de Leixões, a amplitude de maré é de cerca de 3.5 m, sendo consequentemente a eficiência do dispositivo penalizada em relação a outros locais com uma amplitude de maré mais pequena ou mesmo inexistente.

Conclui-se assim o estudo inicial que pretende analisar a influência do número de reservatórios e da variação da maré no desempenho do conversor de energia das ondas, e otimizar as cotas das cristas dos reservatórios, de forma a maximizar a eficiência hidráulica.

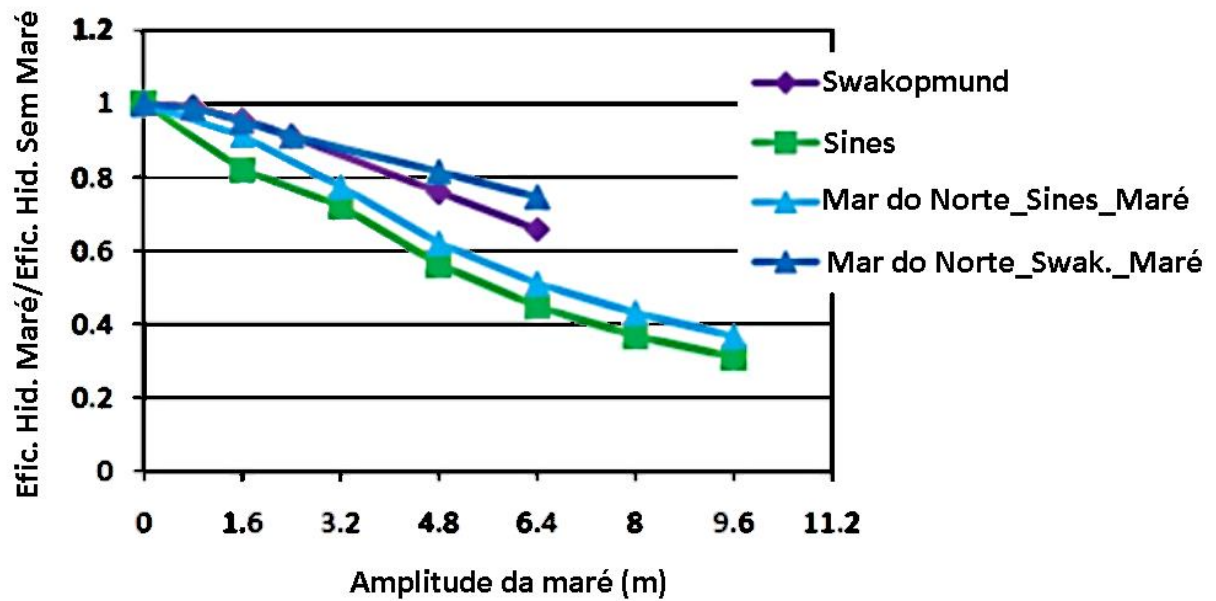


Figura 64 – Eficiência hidráulica em função da amplitude de maré (Vicinanza *et al.*, 2012).

### 3.3.4. TURBINAS

Um componente essencial dos dispositivos que funcionam por galgamento são as turbinas, que permitirão transformar a energia potencial da água recolhida pelos reservatórios em energia elétrica. As turbinas hidráulicas já existem há muito tempo e são principalmente utilizadas em aproveitamentos hidroelétricos, havendo vários tipos de turbinas que se adaptam a diferentes condições de funcionamento. A Figura 65 mostra de forma simplificada a que condições se adequam os três principais tipos de turbina, Pelton, Francis e Kaplan.

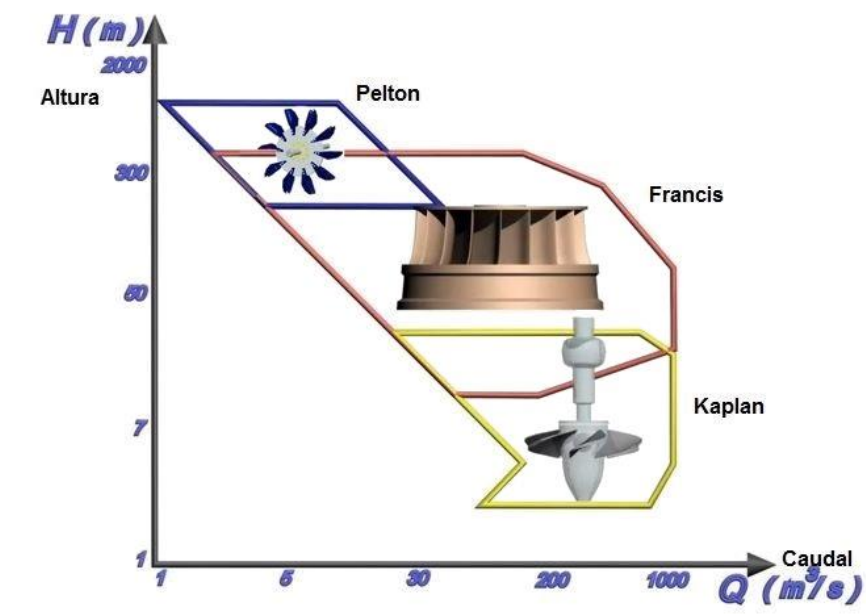


Figura 65 – Tipos de turbina a utilizar em função da queda e do caudal disponíveis (Gonçalves, 2016).

Estas turbinas não se adequam ao funcionamento do SSG, que funciona com baixas quedas e caudais reduzidos. À data desta dissertação não existem informações de que a turbina MST, apresentada no Capítulo 2, tenha sido desenvolvida. Como as turbinas hidráulicas existentes não se adequam bem às quedas e caudais do SSG, nem à rápida variação da queda devido à água que entra nos reservatórios aquando do galgamento por parte da onda, optou-se por idealizar turbinas para cada um dos reservatórios com base nas curvas características de turbinas Kaplan de baixa queda propostas por Margheritini *et al.* (2012). No entanto, foi necessário aplicar a semelhança hidráulica para compatibilizar as curvas de Margheritini, pensadas para um SSG de três reservatórios instalado em Hanstholm, Dinamarca, com as quedas que estarão disponíveis no dispositivo em estudo. Este processo serve apenas o propósito de obter turbinas realistas e semelhantes àquelas que possam eventualmente ser utilizadas no dispositivo, de forma a que seja possível estimar a produção energética do WEC e proceder à otimização do rendimento dos reservatórios. É, contudo, necessário ter presente que não se teve como objetivo um dimensionamento ou conceção de turbinas.

As relações de semelhança de turbomáquinas hidráulicas deduzem-se tendo presente que:

- As forças devidas à viscosidade são pequenas comparativamente às forças de inércia e de turbulência, não sendo, portanto, essencial respeitar-se o critério de semelhança de Reynolds;
- Turbomáquinas geometricamente semelhantes funcionam em condições de semelhança se tiverem o mesmo rendimento;
- Existe um movimento com características cíclicas, a rotação da máquina, associado ao escoamento do fluido, o que permite utilizar o critério de semelhança de Strouhal.

O número de Strouhal é dado por,

$$St = \frac{lf}{v} \quad (14)$$

em que  $l$  representa um comprimento característico,  $f$  uma frequência característica e  $v$  uma velocidade característica. Nas condições anteriores tem-se,

$$St = \frac{DN}{U} \quad (15)$$

em que  $D$  representa o diâmetro da roda,  $N$  a velocidade de rotação da máquina e  $U$  a velocidade periférica da roda.

Existe ainda proporcionalidade entre a queda e a altura cinética, expressa em termos de velocidade periférica, podendo assim escrever-se,

$$H_u \sim \frac{U^2}{2g} \quad (16)$$

em que  $H_u$  representa a queda útil e  $g$  a aceleração da gravidade.

Pela equação da continuidade tem-se ainda que,

$$Q = US \quad (17)$$

em que  $Q$  representa o caudal e  $S$  a secção de escoamento.



Aplicando as relações descritas a duas turbinas geometricamente semelhantes, obtêm-se as seguintes relações entre variáveis,

$$St_1 = St_2 \Leftrightarrow \frac{D_1 N_1}{U_1} = \frac{D_2 N_2}{U_2} \Leftrightarrow \frac{N_1}{N_2} = \frac{D_2 U_1}{D_1 U_2} \quad (18)$$

$$H \sim \frac{U^2}{2g} \Rightarrow \frac{H_1}{H_2} = \frac{U_1^2}{U_2^2} \quad (19)$$

$$Q = US \Rightarrow \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{U_1 S_1}{U_2 S_2} \quad (20)$$

Combinando as equações (18) e (19) obtém-se,

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{D_2}{D_1} \left( \frac{H_1}{H_2} \right)^{1/2} \quad (21)$$

A combinação das equações (19) e (20) resulta em,

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left( \frac{H_1}{H_2} \right)^{1/2} \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^2 \quad (22)$$

Finalmente, combinando as equações (21) e (22) temos,

$$\frac{N_1}{N_2} = \left( \frac{Q_2}{Q_1} \right)^{1/2} \left( \frac{H_1}{H_2} \right)^{3/4} \quad (23)$$

A equação (22) pode ser reescrita da seguinte forma,

$$Q_2 = \frac{Q_1}{\left( \frac{H_1}{H_2} \right)^{1/2} \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^2} \quad (24)$$

Tendo por base as equações acima deduzidas é possível prever, em primeira aproximação, o comportamento de turbinas em condições de funcionamento diferentes, ou com diferentes diâmetros.

No presente estudo pretende-se adaptar as turbinas propostas por Margheritini *et al.* (2012) ao dispositivo em estudo para o porto de Leixões. Não estando ainda a turbina MST num estado de desenvolvimento que permita a definição de curvas características, utilizar-se-á uma turbina por reservatório. Estas serão dimensionadas através da semelhança hidráulica através do seguinte método:

- Definição das quedas para as quais a turbina de cada reservatório deve funcionar;
- Cálculo do caudal da nova turbina através da equação (24) para cada queda;
- Escolha dum diâmetro da roda da turbina de forma a que os caudais se adequem às condições em estudo.

Este processo foi feito de forma sistemática com a utilização duma folha de cálculo em Microsoft Excel®, tendo por base as curvas características das turbinas utilizadas por Margheritini *et al.* (2012) para o SSG com três reservatórios, que são apresentadas na Figura 66, na Figura 67 e na Figura 68.

De seguida, impondo-se as quedas pretendidas conforme a geometria do SSG (geometrias para três, quatro e cinco reservatórios previamente otimizadas), calculou-se o caudal para cada queda através da equação (24). A turbina de cada reservatório foi dimensionada para uma queda adequada às alturas dos reservatórios, de forma análoga à de Margheritini *et al.* (2012). Deste ponto em diante as turbinas serão referenciadas como “Turbina 1”, “Turbina 2” e “Turbina 3” para as turbinas dos reservatórios 1, 2 e 3 do trabalho de Margheritini; as turbinas a utilizar no presente estudo serão as turbinas “3T1”, “3T2” e “3T3” para a configuração com três reservatórios e para os reservatórios 1, 2 e 3, respetivamente; “4T1”, “4T2”, “4T3” e “4T4” para a configuração com quatro reservatórios; e as turbinas para a configuração com cinco reservatórios serão referenciadas de forma análoga. Optou-se por utilizar as comparações apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Comparação entre as designações de turbinas usadas nesta dissertação e por Margheritini *et al.* (2012).

Caso de estudo	Margheritini <i>et al.</i> (2012)
3T1	Turbina 1
3T2	Turbina 2
3T3	Turbina 3
4T1	Turbina 1
4T2	Turbina 2
4T3	Turbina 3
4T4	Turbina 3
5T1	Turbina 1
5T2	Turbina 2
5T3	Turbina 3
5T4	Turbina 3
5T5	Turbina 3

Estando as quedas impostas, variar o diâmetro da roda na equação (24) permite variar o caudal de turbinamento, idealizando assim uma turbina que se adequa às condições em estudo.

Considerou-se que seria suficiente utilizar turbinas que conseguissem turbinar o caudal médio que entra nos reservatórios para uma queda bruta definida tendo como referência o nível médio da água do mar. Assim, simulou-se no WOPSim este caso, com as cotas das cristas dos reservatórios obtidas na otimização da eficiência hidráulica, e obtiveram-se a partir dos resultados os caudais para os quais as turbinas deveriam funcionar. Este processo foi seguido para dispositivos com três, quatro e cinco reservatórios, e obtiveram-se assim doze turbinas diferentes. Os diâmetros das rodas tiveram de ser ligeiramente aumentados de forma a conseguirem turbinar os caudais pretendidos. As curvas características das turbinas idealizadas são apresentadas no Anexo C.

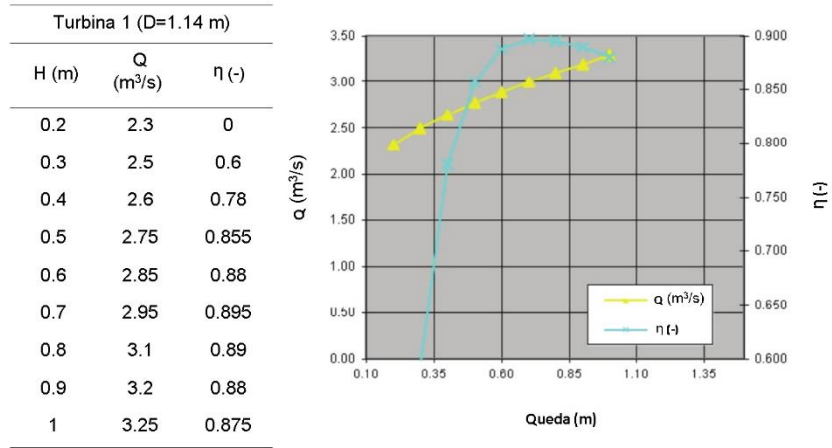


Figura 66 – Curva característica da turbina do nível mais baixo numa estrutura SSG de três níveis (Margheritini *et al.*, 2012).

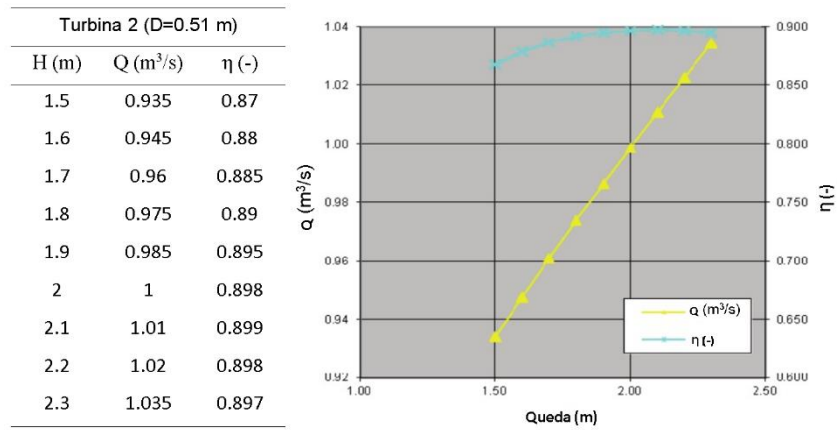


Figura 67 – Curva característica da turbina do nível médio numa estrutura SSG de três níveis (Margheritini *et al.*, 2012).

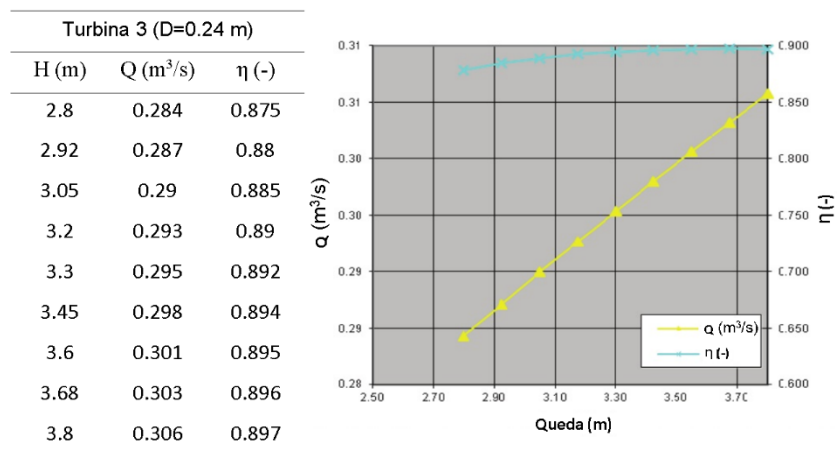


Figura 68 – Curva característica da turbina do nível mais elevado numa estrutura SSG de três níveis (Margheritini *et al.*, 2012).

As curvas características obtidas para cada uma das turbinas foram depois inseridas no programa WOPSim. A análise foi realizada para os sete níveis de água do mar anteriormente definidos e para os três dispositivos (três, quatro e cinco reservatórios), tendo sido obtidos os resultados expostos na Tabela 15 e na Figura 69. As dimensões do dispositivo são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Dimensões do dispositivo.

Largura do dispositivo:	20 m
Largura do primeiro reservatório:	20 m
Largura do segundo reservatório:	18 m
Largura do terceiro reservatório:	16 m
Largura do quarto reservatório:	14 m
Largura do quinto reservatório:	12 m

Tabela 15 – Resultados das simulações em WOPSim.

Nº reservatórios	Cotas das cristas (NMM)	$\eta_{hid}$ (%)	$\eta_{res}$ (%)	Energia produzida (MWh/ano)	Energia das ondas (MWh/ano)	$\eta_{global}$ (%)
3	$R_{c,1}=0.75m$	23.2	9.0	184	2 379	7.8
	$R_{c,2}=2.08m$					
	$R_{c,3}=4.17m$					
4	$R_{c,1}=0.75m$	28.5	10.1	208	2 379	8.7
	$R_{c,2}=2.00m$					
	$R_{c,3}=3.25m$					
	$R_{c,4}=5.09m$					
5	$R_{c,1}=0.75m$	29.9	8.7	178	2 379	7.5
	$R_{c,2}=2.00m$					
	$R_{c,3}=3.25m$					
	$R_{c,4}=4.50m$					
	$R_{c,5}=6.25m$					

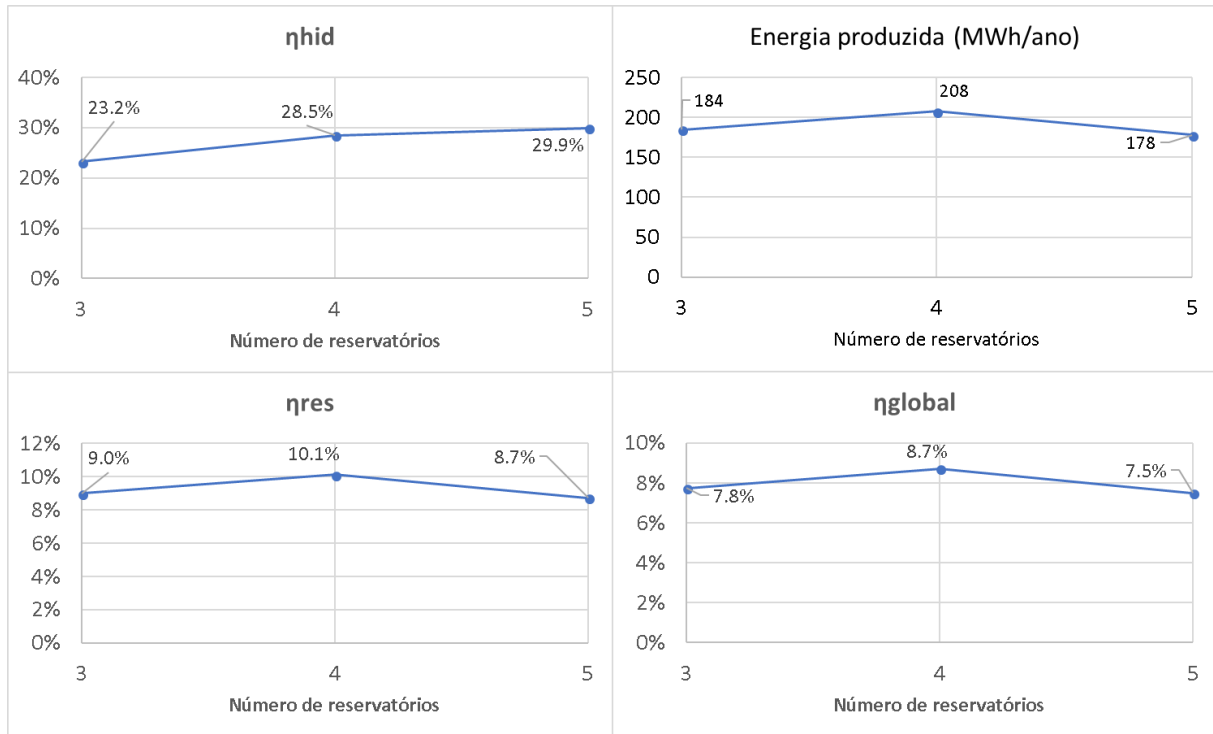


Figura 69 – Resultados das simulações com o WOPSim.

A distância horizontal entre reservatórios deve ser  $H_s < HD < 2H_s$  (Margheritini e Kofoed, 2010) de forma a ser suficientemente grande para que a água entre no reservatório, sem contudo constituir um impedimento a que a água chegue aos reservatórios superiores; daí a escolha de 2 m de distância entre estes, refletida na diferença de 2 m nos comprimentos dos reservatórios. A eficiência do reservatório é definida como,

$$\eta_{res} = \frac{P_{res}}{P_{onda}} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{res}} (Q_{in,j} - Q_{over,j}) \bar{h}_j \rho g}{\frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e} \quad (25)$$

em que  $Q_{in,j}$  representa o caudal que entra no reservatório  $j$ ,  $Q_{over,j}$  representa o caudal que transborda do reservatório  $j$  e  $\bar{h}_j$  é a queda média disponível. A energia produzida é automaticamente calculada pelo WOPSim através da expressão,

$$P = \sum_{j=1}^{N_{res}} \rho g h_j q_{turb,j}(h_j) \eta_j(h_j) \quad (26)$$

em que  $q_{turb,j}$  representa o caudal médio turbinado pela turbina associada ao reservatório  $j$ ,  $\eta_j$  o rendimento da turbina associada ao reservatório  $j$  e  $h_j$  a queda disponível no reservatório  $j$ .

O valor da energia das ondas disponível calculado pelo WOPSim, de 2 379 MWh/ano, corresponde a 119.0 MWh/m/ano e a uma potência de cerca de 13.6 KW/m. Estes valores ficam um pouco abaixo daqueles calculados anteriormente devido à forma como é calculado o valor do período energético  $T_e$ .

O WOPSim considera  $T_e = T_p/1.15$  e nos cálculos anteriores considerou-se a relação entre períodos dada pelo espectro de JONSWAP com um fator de forma do pico igual a 3.3,

$$1.12T_e = 1.29T_z = T_p \quad (27)$$

pois este espectro será mais tarde utilizado nos ensaios em modelo físico. Não obstante, a diferença não é muito significativa e continuará a ser usado o valor calculado pelo WOPSim.

Observa-se que a eficiência hidráulica aumenta com o número de reservatórios, como tinha sido já constatado. Não obstante, e ao contrário daquilo que seria expectável, existe um pico de rendimento de reservatório,  $\eta_{res}$ , de energia produzida e, consequentemente, de eficiência global, para o dispositivo com quatro reservatórios. Esta diferença pode ser explicada pelas turbinas utilizadas, que podem não se adequar às quedas disponíveis.

Conclui-se que a maximização da eficiência hidráulica pode não conduzir à máxima energia produzida pois esta depende das turbinas utilizadas. Deverá, portanto, ser feito um estudo mais aprofundado das turbinas para obter uma maior produção energética.

Tendo em conta os resultados apresentados, decidiu-se utilizar neste trabalho um dispositivo constituído por quatro reservatórios, com as cristas às seguintes cotas, relativamente ao nível médio da água do mar:  $R_{c,1} = 0.75 \text{ m}$ ,  $R_{c,2} = 2.00 \text{ m}$ ,  $R_{c,3} = 3.25 \text{ m}$  e  $R_{c,4} = 5.00 \text{ m}$ . Fica assim concluída a otimização das cotas das cristas dos reservatórios.

A eficiência global para um dispositivo SSG situa-se, normalmente, entre 10 % e 26 % (Margheritini *et al.*, 2009b). Ora os valores obtidos nas simulações encontram-se abaixo do limite mínimo deste intervalo. Proceder-se-á agora a uma tentativa de aumentar a eficiência global do dispositivo através da minimização do caudal de extravasamento, aumentando o volume de encaixe dos reservatórios, procurando otimizar as turbinas e melhorando a estratégia de turbinamento.

### 3.3.5. COMPRIMENTO DOS RESERVATÓRIOS

O comprimento máximo dos reservatórios está limitado pelas dimensões da estrutura projetada para o prolongamento do quebramar Norte do Porto de Leixões. É preciso ainda subtrair à área disponível aquela ocupada pela coluna de água oscilante, que atravessa os reservatórios e é igual a 25 m<sup>2</sup>. Assim, considerando que os reservatórios se estendem desde o dispositivo até ao talude interior do quebramar, os comprimentos máximos que podem ser obtidos são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Comprimentos máximos dos reservatórios.

Reservatório	Comprimento (m)
1	56.10
2	50.55
3	45.30
4	40.10

Utilizando os valores dos comprimentos apresentados na Tabela 16 foi possível aumentar a eficiência global para 10.3 %. Este aumento, embora ligeiro, permite passar a produção energética de 207 506 kWh/ano para 245 277 kWh/ano, o que corresponde a um aumento de 18 %. No entanto, é naturalmente desejável aumentar a eficiência global para valores consideravelmente maiores.

### 3.3.6. ESTRATÉGIA DE TURBINAMENTO

Otimizar-se-á de seguida a estratégia de turbinamento. O controlo de arranque e paragem da turbina é feito em função do espaço livre (cf. Figura 41). Inicialmente, utilizou-se para os dois reservatórios inferiores 0.1 m e 0.9 m como valores de arranque e paragem da turbina, respetivamente. Para os dois reservatórios superiores utilizou-se 0.2 m e 1.2 m. No entanto, por uma questão de simplificação, depois consideraram-se sempre os mesmos valores para os quatro reservatórios. Seguiu-se um processo iterativo de otimização, em que se variou um dos valores mantendo-se o outro constante, de forma a determinar uma estratégia de turbinamento mais eficaz. Os resultados são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Resultados da otimização da estratégia de turbinamento.

Condições	Estratégia		$\eta_{res}$ (%)	Energia produzida (MWh/ano)	Energia das ondas (MWh/ano)	$\eta_{global}$ (%)
<b>Base</b>	<b>Ligar:</b>	0.1/0.2 m	12.1	245.3	2 379	10.3
	<b>Desligar:</b>	0.9/1 m				
	<b>Espaço Livre:</b>	0.9/1.2 m				
<b>G1</b>	<b>Ligar:</b>	0.10 m	12.8	261.0	2 379	11.0
	<b>Desligar:</b>	0.50 m				
	<b>Espaço Livre:</b>	0.50 m				
<b>G2</b>	<b>Ligar:</b>	0.10 m	12.9	264.2	2 379	11.1
	<b>Desligar:</b>	0.20 m				
	<b>Espaço Livre:</b>	0.20 m				
<b>G3</b>	<b>Ligar:</b>	0.00 m	11.8	241.6	2 379	10.2
	<b>Desligar:</b>	0.10 m				
	<b>Espaço Livre:</b>	0.10 m				
<b>G4</b>	<b>Ligar:</b>	0.00 m	12.6	258.3	2 379	10.9
	<b>Desligar:</b>	0.20 m				
	<b>Espaço Livre:</b>	0.20 m				
<b>G5</b>	<b>Ligar:</b>	0.10 m	12.9	265.2	2 379	11.1
	<b>Desligar:</b>	0.30 m				
	<b>Espaço Livre:</b>	0.30 m				
<b>G6</b>	<b>Ligar:</b>	0.10 m	12.9	263.8	2 379	11.1
	<b>Desligar:</b>	0.40 m				
	<b>Espaço Livre:</b>	0.40 m				

A estratégia G5 é a que conduz a uma maior eficiência global, de 11.2 %, com o arranque das turbinas a 0.10 m e a paragem a 0.30 m.

No entanto, uma eficiência global de 11.2 % fica muito aquém daquela que seria expectável tendo em conta os resultados obtidos por outros investigadores. Vicinanza *et al.* (2012) sugerem valores para a eficiência global (*wave-to-wire efficiency*) entre 25 % e 35 %, consideravelmente maiores do que os valores obtidos. Considerou-se que esta baixa eficiência poderia dever-se ao pequeno intervalo de queda para o qual as turbinas foram definidas, sendo que com uma amplitude de maré de cerca de 4 m, as turbinas não estariam a produzir energia durante longos períodos de tempo, pois o WOPSim não extrapola a curva característica para fora da gama de valores que são utilizados na sua definição.

Idealizaram-se novas turbinas estendendo o intervalo de queda de cada uma de forma a cobrir todas as condições possíveis de funcionamento destas. Aumentou-se também o diâmetro da roda da turbina de forma a que um maior caudal possa ser turbinado evitando o rápido enchimento do reservatório e conseqüente extravasamento, cobrindo assim o máximo caudal que entra nos reservatórios. Um novo conjunto de quatro turbinas foi definido pelas respectivas curvas características e diâmetros, sendo estas apresentadas na Tabela 18. Observa-se praticamente uma duplicação da eficiência global, que passou de 11.2 % para 20.6 %. Estes valores já se encontram no limite superior do intervalo proposto por Margheritini *et al.* (2009b), e demonstram que a geometria utilizada é eficiente e adequada às condições locais de instalação.

Tabela 18 – Curvas características das turbinas.

T1 D=1.85m			T2 D=1.45m		
H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	η (%)	H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	η (%)
0.20	6.057	1	0.30	3.380	87
0.30	6.584	60	0.55	4.479	88
0.40	6.847	78	0.80	5.323	88.5
0.50	7.242	85.5	1.05	6.019	89
0.60	7.505	88	1.30	6.586	89.5
0.70	7.769	89.5	1.55	7.116	89.8
0.80	8.164	89	1.80	7.559	89.9
0.90	8.427	88	2.05	7.959	89.8
1.00	8.559	87.5	2.30	8.366	89.7
T3 D=1.00m			T4 D=0.50m		
H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	η (%)	H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	η (%)
1.60	3.727	87.5	3.30	1.338	87.5
1.85	3.966	88	3.55	1.373	88
2.10	4.178	88.5	3.80	1.405	88.5
2.35	4.359	89	4.05	1.431	89
2.60	4.546	89.2	4.30	1.462	89.2
2.85	4.702	89.4	4.55	1.485	89.4
3.10	4.849	89.5	4.80	1.509	89.5
3.35	5.019	89.6	5.05	1.541	89.6
3.60	5.171	89.7	5.30	1.569	89.7

Outra opção que se tomou foi a de utilizar uma inclinação de 30° para as rampas do dispositivo, em detrimento dos 27° do talude do quebramar, com uma inclinação de 2H:1V. Tal alteração fica a dever-se à necessidade de reduzir o período ressonante da componente de CAO do dispositivo, encurtando o comprimento da entrada da coluna. Não se considerou necessário utilizar a mesma inclinação que o quebramar e, por outro lado, Kofoed (2002a) e Borgarino *et al.* (2007) afirmam que 30° é o ângulo ótimo.

Os resultados obtidos das simulações em WOPSim são apresentados na Tabela 19.



Tabela 19 – Resultados obtidos das simulações em WOPSim.

$\eta_{res}$ (%)	Energia produzida (MWh/ano)	Energia das ondas (MWh/ano)	$\eta_{global}$ (%)
23.5	489.1	2 379	20.6

Constatou-se, portanto, que o aumento da capacidade de turbinamento das turbinas pela consideração de maiores intervalos de queda permite um grande aumento da energia produzida pelo dispositivo. Importa referir que não foram ainda desenvolvidas turbinas específicas para utilização neste tipo de dispositivo. Neste trabalho idealizaram-se turbinas com ainda maior capacidade, com diâmetros teóricos de 3 m, 2.5 m, 2 m e 1.5 m, tendo a simulação em WOPSim mostrado que a eficiência global cresce, mais uma vez, atingindo o valor de 23.1 %.

Pode-se finalmente concluir que a capacidade das turbinas em turbinar o volume do reservatório sem que haja transbordamentos em excesso permite alcançar eficiências elevadas. No entanto, pode não ser técnica ou economicamente viável a utilização destas turbinas. Seria necessário aprofundar o estudo deste tipo de turbinas hidráulicas que se encontram ainda pouco estudadas (Knapp *et al.*, 2000).

Finalmente, foi necessário otimizar a estratégia de turbinamento em função da altura de onda significativa incidente. Esta metodologia exige que a altura de onda seja medida nalgum ponto em frente ao dispositivo, e é, portanto, necessário utilizar uma boia ondógrafo. Assim, a altura de água dentro dos reservatórios adapta-se ao volume de galgamento estimado, que é função da altura de onda. Quando a altura de onda incidente for maior, as turbinas funcionam até um nível de água dentro do reservatório baixo, de forma a que seja possível encaixar o volume de galgamento. Analogamente, quando a altura da onda incidente for menor, as turbinas funcionam em níveis de água dentro dos reservatórios mais altos, de forma a aproveitar melhor a queda disponível, visto que o volume de água a entrar no reservatório será menor, e logo haverá menor probabilidade de extravasamento.

No WOPSim pode-se regular os parâmetros que controlam o arranque e a paragem das turbinas através da função apresentada na secção sobre a otimização do dispositivo sem considerar a variação do nível médio da água do mar. Simplificadamente, o algoritmo permite definir os limites extremos de arranque e paragem das turbinas, e dentro destes limites, o nível varia consoante uma função linear dependente de  $H_S$ . É preciso definir a inclinação e o coeficiente linear da reta para cada reservatório. A otimização da estratégia é um problema extremamente complexo e com inúmeras variáveis interdependentes (para cada turbina existem oito parâmetros a definir), pois o extravasamento de água dos reservatórios superiores implica um caudal extra que entra nos inferiores. Assim, este problema envolve a otimização de  $8 \times 4 = 32$  parâmetros. Por uma questão de simplicidade, optou-se por igualar os oito parâmetros para as quatro turbinas. Efetuou-se um processo iterativo de otimização, em que se variou cada um dos parâmetros, mantendo todos os outros constantes, até se obter um valor máximo de energia produzida. O resultado final obtido foi de 496 084 kWh/ano produzidos, um aumento de cerca de 7 000 kWh/ano em relação à produção inicial, em que o arranque e paragem das turbinas era apenas função do nível de água dentro do reservatório. A eficiência global passou de 20.6 % para 20.9 %. A estratégia escolhida foi a seguinte:

- Limite inferior para ligar a turbina: 0.1 m;
- Limite superior para ligar a turbina: 0.3 m;
- Inclinação da função  $H_S$  para ligar a turbina: 0.06;
- Coeficiente linear da função  $H_S$  para ligar a turbina: 0.1 m;
- Limite inferior para desligar a turbina: 0.3 m;

- Limite superior para desligar a turbina: 0.6 m;
- Inclinação da função  $H_S$  para desligar a turbina: 0.11;
- Coeficiente linear da função  $H_S$  para desligar a turbina: 0.1 m.

Os valores de produção energética obtidos são encorajadores, tendo sido alcançadas eficiências altas. Não obstante, há um fator intrínseco à operação das turbinas que foi desprezado, as perdas no arranque e na paragem. Estas dependem das turbinas consideradas, e podem ser definidas no simulador WOPSim através de tempos de arranque e paragem. As turbinas não produzem energia durante o arranque. Um estudo feito para Liseleje (Borgarino e Kofoed, 2007) considerou tempos de arranque e paragem de 2 s, de forma a considerar as perdas, dados inspirados na experiência na conceção do protótipo do SSG em Kvitsøy. Na ausência de valores específicos para as turbinas em causa, simulou-se mais uma vez a produção energética considerando estes mesmos valores para as quatro turbinas, mantendo todos os outros parâmetros iguais. As perdas originadas levaram a uma diminuição da produção de cerca de 9 %, passando esta para 452 567 kWh/ano, correspondente a uma eficiência global de 19.0 %. Esta diminuição é muito menor do que aquela experimentada por Borgarino e Kofoed (2007), em que a eficiência baixou de 20.4 % para 8.7 %. Esta diferença substancial pode ser explicada pelo facto de no estudo para Liseleje apenas ter sido considerado um reservatório, comparativamente a este estudo em que são utilizados quatro. A *Multi Stage Turbine* permitiria diminuir ainda mais as perdas, visto utilizar apenas um eixo e uma turbina para todos os reservatórios. A turbina poderia manter-se em funcionamento havendo queda disponível em apenas um dos reservatórios, e possibilitaria assim diminuir os ciclos de arranque e paragem, fator preponderante na longevidade das turbinas e nas perdas.

Após diversos processos de otimização, foram obtidas uma geometria e uma estratégia que permitiram maximizar a eficiência e a energia produzida pelo dispositivo de galgamento em estudo. Foi ainda feita uma estimativa da energia produzida num ano médio para o local em questão. Estes resultados permitem uma avaliação do potencial energético da implantação dum dispositivo de aproveitamento de energia das ondas na extensão do quebramar Norte do porto de Leixões. Tendo por base os valores obtidos, é possível concluir que o local permite uma boa produção energética. Após a otimização, a produção foi de cerca de 24.8 MWh/ano/m. Comparativamente, a produção esperada para um dispositivo SSG em Hanstholm, Dinamarca, foi de 8.0 MWh/ano/m (Margheritini *et al.*, 2012) e em Liseleje, Dinamarca, foi de cerca de 0.8 MWh/ano/m (Borgarino e Kofoed, 2007).

# 4

## ESTUDO EXPERIMENTAL

### 4.1. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Os ensaios em modelo físico do dispositivo estudado foram realizados no Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (SHRHA) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Estas instalações experimentais possuem um tanque de ondas equipado com um sistema de geração de agitação marítima. Na zona central do tanque existe um fosso para permitir maiores profundidades de água, e na zona oposta à do sistema de geração está instalada uma praia de dissipação da energia das ondas. A sala de controlo permite operar o sistema de geração de ondas e efetuar a aquisição e o tratamento dos resultados das medições.

As dimensões principais do tanque de ondas são  $28 \times 12 \times 1.2 \text{ m}^3$ . As janelas existentes nas paredes laterais do tanque permitem observar diretamente o escoamento e a interação da agitação marítima com o modelo físico construído. A colocação de divisórias verticais paralelamente às paredes laterais do tanque permite efetuar estudos 2D. A praia dissipadora ocupa todo o lado oposto ao sistema de geração de ondas e tem cerca de 8 m de desenvolvimento e uma inclinação de 5 %. Esta foi construída de modo a dissipar a energia da agitação e permitir obter reflexões desprezáveis, normalmente inferiores a 10 % (SHRHA, 2018). A Figura 70 apresenta um esquema do tanque de ondas e a Figura 71 uma fotografia geral das instalações experimentais.



Figura 70 – Esquema do tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP (SHRHA, 2018).



Figura 71 – Tanque de ondas do laboratório de hidráulica da FEUP (SHRHA, 2018).

O sistema de geração de agitação marítima é do tipo multielemento, que conta com um sistema ativo de absorção da reflexão. Este sistema foi concebido pela empresa britânica *HR Wallingford, UK*, e é capaz de gerar ondas regulares e ondas irregulares de crista longa (2D) ou curta (3D). É composto pela máquina de geração propriamente dita, que são as 16 pás e respetivos motores elétricos, e se encontram dentro do tanque de ondas, e pela unidade de controlo que se encontra na sala de comando, juntamente com os computadores onde está instalado o *software* de geração. O *software* de recolha de dados permite efetuar análises espectrais, estatísticas e de reflexão, e ainda a exportação dos dados adquiridos para que possam ser analisados e tratados posteriormente. As pás batedoras estão separadas em dois módulos de oito pás cada, sendo revestidas a fibra de vidro e com movimento independente. Isto permite-lhes funcionar como batedor do tipo “serpente” e assim gerar ondas provenientes de uma gama de rumos. Cada pá tem 75 cm de largura, perfazendo assim os 12 m, i.e., toda a largura do tanque de ondas. Por trás das pás existe um material plástico reticulado esponjoso cuja função é absorver o movimento da água atrás dos batedores (Taveira-Pinto *et al.*, 2007). A Figura 72 mostra as pás do sistema e o mecanismo que as movimentam.



Figura 72 – Sistemas de geração de agitação marítima do Laboratório de Hidráulica da FEUP (Taveira-Pinto *et al.*, 2007).

Os objetivos dos testes em modelo físico são os seguintes:

- Análise do comportamento estrutural da solução escolhida para o prolongamento do quebramar exterior do porto de Leixões com e sem o dispositivo de aproveitamento da energia das ondas;
- Comparação dos caudais de galgamento da estrutura com e sem o dispositivo híbrido de aproveitamento da energia das ondas;
- Avaliação do desempenho hidráulico da componente de galgamento do dispositivo híbrido de aproveitamento da energia das ondas;
- Avaliação do desempenho da componente de coluna de água oscilante do dispositivo híbrido de aproveitamento da energia das ondas;
- Comparação do desempenho das diferentes configurações do dispositivo (A, B e C);
- Comparação do desempenho das diferentes configurações de PTO da componente de coluna de água oscilante do dispositivo de aproveitamento da energia das ondas.

## **4.2. EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO**

### **4.2.1. SONDAS HIDRODINÂMICAS**

A elevação da superfície livre da água no tanque de ondas é medida através de sondas de níveis hidrodinâmicas. As sondas disponíveis são do tipo resistivo, e as suas hastes podem apresentar dois tamanhos: 600 mm e 300 mm, permitindo as maiores uma mais vasta amplitude de medição. As sondas de haste longa têm um espaçamento entre níveis de 20 mm, enquanto que as de haste curta têm um espaçamento entre níveis de 10 mm. A Figura 73 apresenta os dois tipos de sonda.



Figura 73 – Sonda de níveis hidrodinâmicos pequena (superior) e grande (inferior).

As sondas medem a corrente elétrica que passa entre as suas duas varetas de aço inoxidável paralelas, que se encontram sempre submersas em relação à superfície livre da água. Para isso é necessário assegurar que, para nenhuma altura de onda a ser gerada, as sondas ficam emersas ou completamente submersas (os polos não podem nunca ficar submersos). A corrente elétrica que passa entre as varetas é proporcional à profundidade de submersão das sondas. A corrente é, por sua vez, convertida numa voltagem que é depois lida pelo sistema de aquisição sendo possível determinar a altura da superfície livre da água, que é considerada proporcional à referida voltagem.

No entanto, antes de utilizar as sondas é necessário efetuar a calibração das mesmas. A calibração consiste em definir a posição “zero”, que corresponde ao nível médio da água, o nível “positivo”, correspondente à passagem dum crista de onda, e o nível “negativo”, correspondente à passagem da cava dum onda. A amplitude destes níveis tem de ser escolhida em função do tamanho previsto das ondas a serem geradas, dando ainda uma folga para acautelar situações imprevistas. O processo de calibração é simples, começando por se colocar o sensor na posição média, correspondente ao zero, ajustar o sinal de voltagem a 0 V, e dar a indicação ao *software* de que esta é a posição do nível médio da água; em seguida, baixa-se o sensor até à posição escolhida como positiva, indicando ao sistema o valor dessa deslocação em unidades geométricas; finalmente, utiliza-se a mesma metodologia para definir a posição escolhida como negativa. Fica assim definida uma reta de calibração, que é assumida como linear, e que relaciona o sinal em *volts* lido pela sonda com o nível da água. Este procedimento é repetido todos os dias antes de se iniciarem os testes, pois com o tempo as sondas vão ficando descalibradas. A Figura 74 apresenta a unidade de condicionamento do sinal das sondas.



Figura 74 – Unidade de condicionamento do sinal das sondas.

#### 4.2.2. SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CAUDAIS

Com os ensaios em modelo físico pretende-se estudar o efeito da aplicação dum dispositivo de aproveitamento da energia das ondas num quebramar de taludes. Será, por isso, construído um modelo do quebramar sem o dispositivo, e outro com o dispositivo. Para cada um dos modelos será medido o caudal que galga o coroamento da estrutura, comparando-se os dois. Será também avaliado o desempenho do dispositivo SSG através da medição dos caudais de galgamento que entram nos reservatórios deste.

Os caudais de galgamento associados a cada um dos reservatórios do dispositivo SSG foram previamente estimados numericamente com o *software* WOPSim. Constatou-se que para o volume de armazenamento disponível, esses caudais enchem os reservatórios do dispositivo rapidamente. Por outro lado, estava ainda previsto medir o caudal de galgamento do quebramar para estados do mar extremos. Havendo ensaios com ondas irregulares que se estendem durante longos períodos de tempo, torna-se necessário escoar e medir a água que entra nos reservatórios da componente SSG do dispositivo, e ainda captar e medir o caudal de galgamento do quebramar.

Para a medição do caudal de galgamento sobre o coroamento do quebramar, foi utilizada uma calha metálica de 20,4 cm de largura colocada sobre a superestrutura, estando esta a vaziar para um reservatório paralelepípedo com um volume de cerca de 100 L, aqui designado por reservatório principal, que se encontra posicionado na parte de trás da estrutura. Este reservatório está dividido em dois compartimentos, que estão ligados por orifícios de pequena dimensão na parte inferior da separação, de forma a minimizar as oscilações do nível de água no reservatório de trás, e permitindo assim uma leitura com menos oscilações do nível de água. Foi ainda acrescentado um rolo de rede nessa separação de forma a aumentar o efeito estabilizador. No compartimento de trás foi instalada uma sonda hidrodinâmica de haste longa, tal como as descritas no subcapítulo anterior, para medir o volume de galgamento que passa pela estrutura. A Figura 75 apresenta o sistema utilizado.

Como se esperam volumes de galgamento superiores a 100 L, foi necessário escoar o caudal do reservatório principal para outro reservatório, aqui designado de reservatório auxiliar, durante a duração dos testes. Para isso utilizaram-se duas bombas Resun® S-2000, cujo caudal máximo é de 2 000 L/h (cerca de 0.56 L/s), e a altura manométrica máxima de 2 m. A curva característica da bomba, fornecida pelo fabricante, é apresentada na Figura 76.



Figura 75 – Sistema de captação do caudal de galgamento da estrutura.

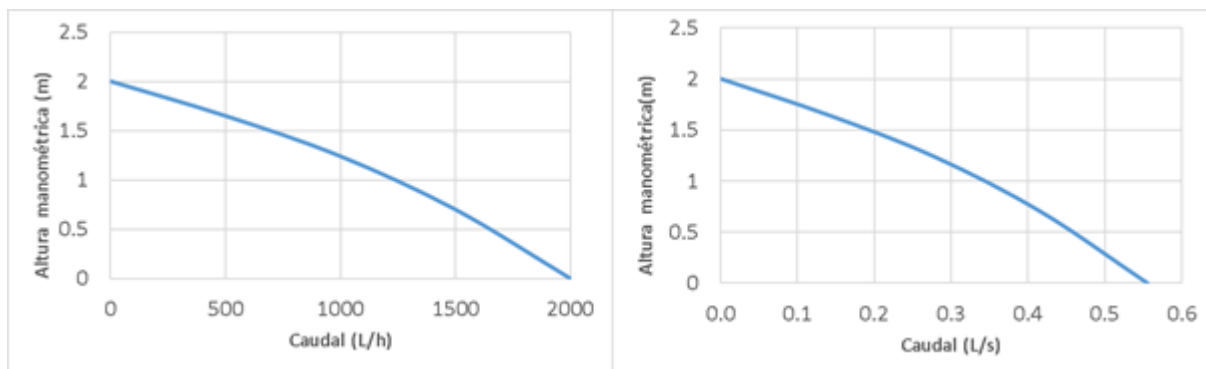


Figura 76 – Curva característica da bomba fornecida pelo fabricante em L/h (esquerda) e em L/s (direita).

De forma a determinar os caudais efetivamente elevados pela bomba foram feitos testes em que se variou a altura de elevação e se mediu o caudal elevado. Obteve-se desta forma a curva característica real da bomba, Figura 77.

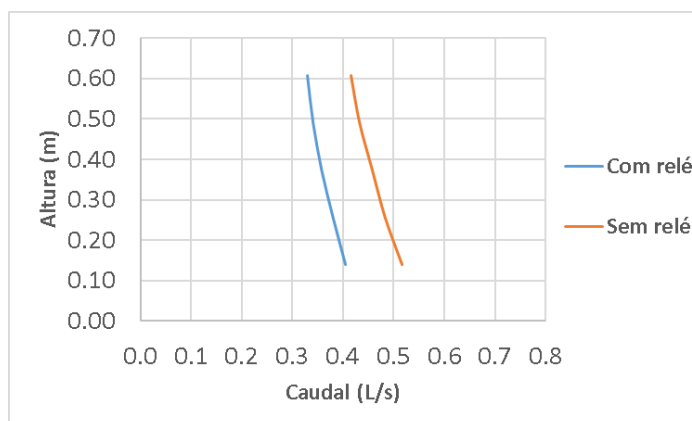


Figura 77 – Curva característica real da bomba.

É de notar que a introdução do relé na operação da bomba traduz-se numa redução considerável dos caudais elevados. Ainda assim, com duas bombas a funcionar em paralelo e em simultâneo, o caudal é suficientemente elevado para assegurar um rápido escoamento do caudal do reservatório principal para o auxiliar.

As duas bombas são ativadas quando o nível de água no reservatório principal atinge um certo nível superior, e mantêm-se a funcionar até que sejam desativadas quando o nível de água atinge um certo nível inferior. Estes limites de arranque e paragem das bombas são definidos através dum sistema de relé de nível. Este sistema é simples: posiciona-se dentro do reservatório um polo à altura onde se pretende que as bombas arranquem e outro à altura onde se pretende que as bombas parem; quando a água atinge o polo colocado mais acima, as bombas ligam e começam a bombear; quando o nível de água baixa até ao polo colocado mais abaixo, as bombas desligam. O conceito de funcionamento é a passagem de corrente quando os polos se encontram submersos, que dá a indicação para as bombas começarem ou pararem. A Figura 78 mostra o reservatório auxiliar e um esquema explicativo do funcionamento do relé.



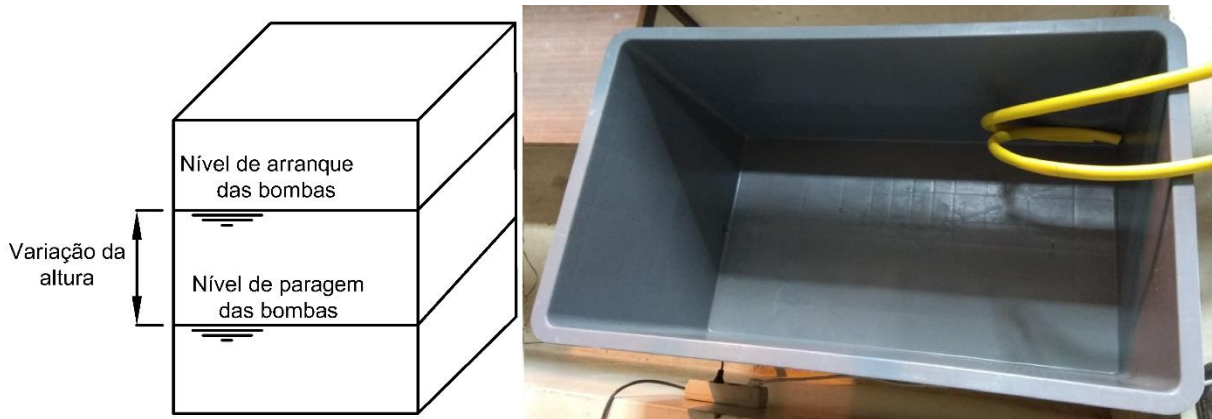


Figura 78 – Esquema explicativo do funcionamento das bombas (esquerda) e reservatório auxiliar de recolha do volume de galgamento (direita).

Para determinar o volume de água que galgou a estrutura do quebramar, é necessário calcular dois volumes: o volume que ficou no reservatório principal e o que foi descarregado para o reservatório auxiliar.

Para determinar o primeiro volume, é apenas necessário verificar qual foi a variação da altura do nível de água no reservatório entre o início e o final do ensaio, através do registo da sonda que se encontra dentro deste. A Figura 79 apresenta um exemplo do registo dum sonda de níveis hidrodinâmicos colocada num reservatório.

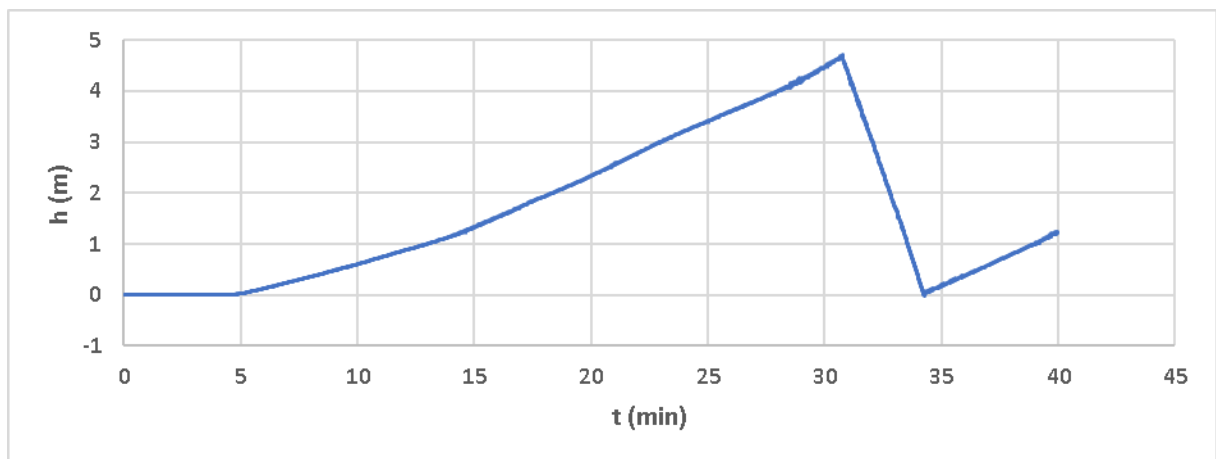


Figura 79 – Exemplo do registo dum sonda de níveis hidrodinâmicos colocada num reservatório.

Sabendo essa variação, multiplica-se pela área do reservatório e obtém-se a variação de volume de água.

O segundo volume é calculado em função do caudal médio elevado pela bomba e do tempo de funcionamento desta. O caudal médio elevado pela bomba é determinado pela curva da Figura 77. O tempo de funcionamento da bomba é obtido através dos resultados da medição do nível da superfície livre da água dentro do reservatório. O intervalo de tempo em que a superfície livre da água dentro do reservatório desce é o tempo em que a bomba está em funcionamento. Multiplicando o caudal pelo tempo de funcionamento das bombas, tem-se o volume bombeado para o reservatório auxiliar. De forma

a que haja o menor erro possível no cálculo deste volume, instalaram-se bombas que permitem um caudal de bombeamento mais elevado. É assim assegurado que quer o volume de água que entra no reservatório não supera a capacidade de armazenamento existente, fazendo-o transbordar, quer os momentos em que as bombas funcionam podem ser facilmente delimitados aquando da análise dos resultados. Como medida suplementar de controlo do segundo volume, optou-se ainda por calcular a variação de volume no reservatório auxiliar seguindo o mesmo processo utilizado para o reservatório principal. Sendo o reservatório auxiliar também paralelepípedo, e estando o reservatório vazio no início do ensaio, mede-se a altura de água neste no final do ensaio. Multiplicando a altura final pela área do reservatório obtém-se o volume.

A soma dos dois volumes é igual ao volume de água que galga os 20,4 cm de largura do coroamento da estrutura para a duração do ensaio, podendo extrapolar-se a partir deste valor o caudal de galgamento por metro de desenvolvimento do quebramar.

Para o dispositivo SSG, optou-se por ligar cada um dos quatro reservatórios por uma conduta flexível a outros quatro reservatórios auxiliares. Existe ainda um reservatório na parte superior do WEC, que servirá para medir o volume de água que galga o WEC sem entrar em nenhum dos reservatórios associados à geração de energia, que foi também ligado ao respetivo reservatório auxiliar. Todo o caudal que entra nos reservatórios do SSG passa diretamente para os seus correspondentes auxiliares. Esta opção deve-se ao pequeno volume de armazenamento existente no WEC, que torna impossível o armazenamento de toda a água nos reservatórios, ou sequer a medição do nível de água dentro destes. Esta limitação faz com que seja inexequível empregar uma estratégia de turbinamento ou calcular a energia produzida pelo SSG, visto que esta depende da altura de água dentro do reservatório e do caudal que é turbinado. É, no entanto, possível calcular a energia potencial hidráulica à entrada do reservatório, que é função do caudal de galgamento e da altura das cristas dos reservatórios em relação ao nível da água, ambas as variáveis são conhecidas no final dos ensaios. Estes reservatórios estão também equipados com uma bomba Resun® S-2000, igual à descrita previamente, e que também será controlada por um sistema de relé de nível. A Figura 80 mostra um esquema da disposição dos reservatórios auxiliares no canal do tanque de ondas e a Figura 81 a ligação entre os reservatórios do SSG e os seus respetivos reservatórios auxiliares.

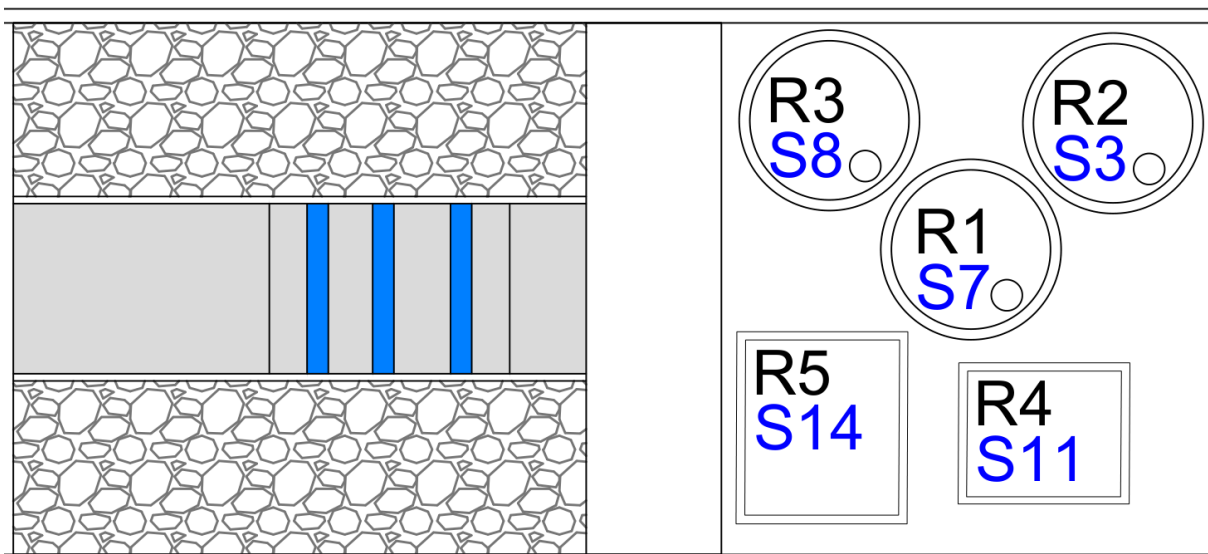


Figura 80 – Esquema da disposição dos reservatórios auxiliares no canal criado no tanque de ondas.



Figura 81 – Saída das condutas flexíveis dos reservatórios do SSG (esquerda) e ligação aos reservatórios auxiliares (direita).

#### 4.2.3. MEDIÇÃO DA PRESSÃO

Para a componente de coluna de água oscilante do dispositivo híbrido tem interesse medir o caudal de ar que passa pela turbina, pois esta converte a energia pneumática gerada pela elevação e abaixamento da superfície livre da água dentro dessa coluna, originados pelas ondas, em energia elétrica. Para isso, foi instalado no modelo físico um sensor de pressão que permite medir em tempo real a pressão na zona onde se encontra o modelo de PTO da coluna de água oscilante. Será ainda utilizada uma sonda de nível para medir a variação do nível da superfície livre da água dentro da coluna.

#### 4.2.4. PERFILADOR 2D

A variação da batimetria dos fundos na zona frontal à estrutura foi medida com recurso a um perfilador 2D, que efetua uma leitura da cota dos fundos em pontos espaçados numa distância especificada pelo utilizador. O perfilador é colocado numa calha que se encontra fixa sobre o canal, na zona onde se pretende obter um perfil dos fundos. Este é constituído por duas componentes: um módulo móvel onde se encontra o motor elétrico e o equipamento eletrónico e que avança horizontalmente sobre a calha; e uma vareta vertical que é movida por uma roda dentada existente no módulo móvel e que tem um sensor na ponta inferior que deteta quando toca no fundo. O perfilador é inicialmente colocado na posição onde se pretende que comece o perfil, a vareta é baixada até tocar no fundo, e dá-se a indicação ao *software* de que esse ponto é o ponto inicial. Quando é dada a indicação para medir o perfil, o módulo móvel avança sobre a calha, e em cada ponto é medida a deslocação horizontal e vertical da vareta em relação ao ponto inicial. Os valores da distância vertical e horizontal em relação ao ponto inicial são guardados num ficheiro, que pode ser posteriormente tratado de forma a ser traçado o perfil medido. A Figura 82 apresenta a calha disposta ao longo do canal com o perfilador apoiado nesta e os componentes do perfilador e a Figura 83 o perfil inicial dos fundos, medido pelo perfilador.

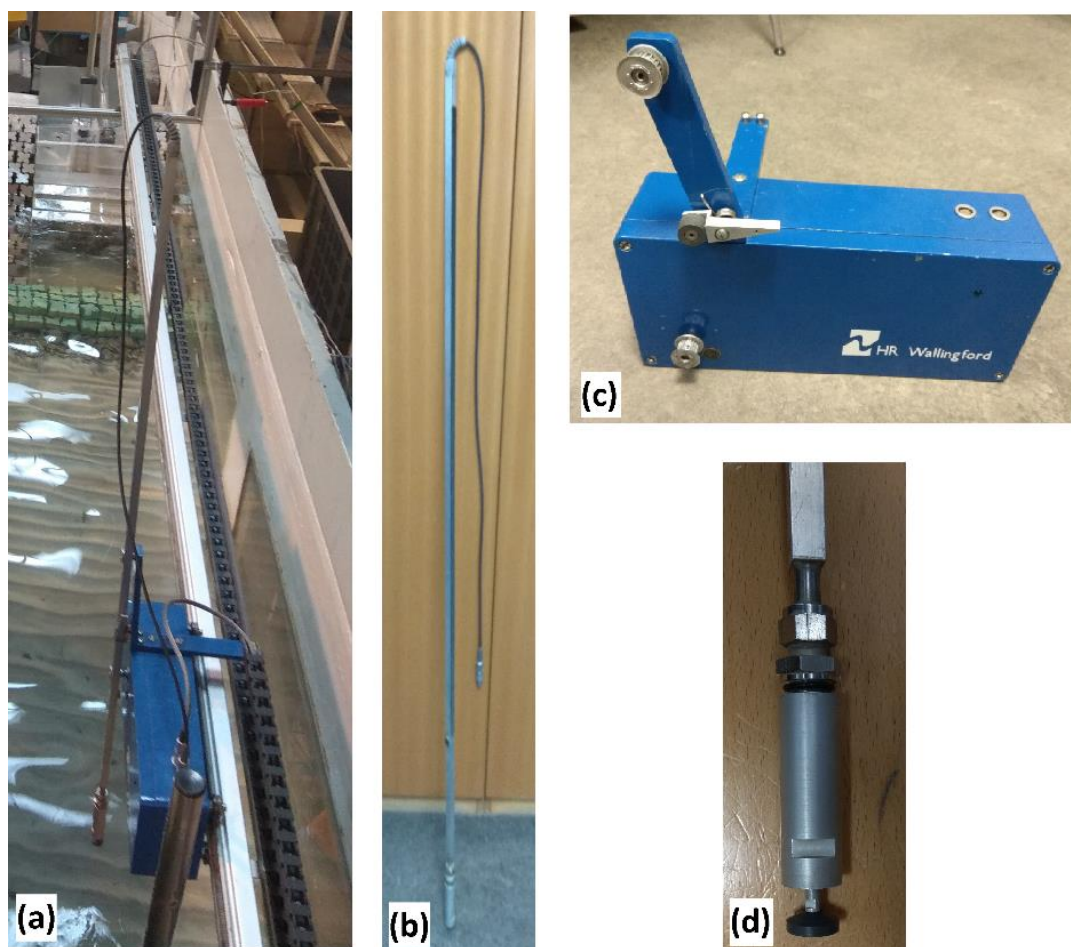


Figura 82 – Perfilador apoiado na calha sobre o canal (a), vareta (b), módulo móvel (c) e sensor (d).

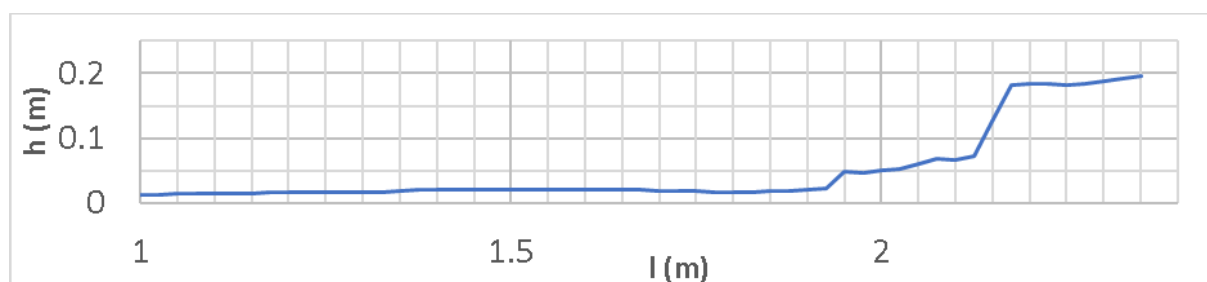


Figura 83 – Perfil inicial dos fundos.

#### 4.2.5. REGISTO EM VÍDEO DOS TESTES

Os ensaios foram também gravados em vídeo por duas câmaras: uma captura os ensaios pela janela de visualização, e outra captura-os vistos de cima. Isto permite, numa fase posterior, verificar aspetos que possam suscitar dúvidas em relação ao comportamento de algum elemento dos ensaios ao longo dos testes. Para cada ensaio foram gerados dois ficheiros de vídeo com um tamanho máximo de 4 GB cada, que foram armazenados num computador na sala de comandos, a partir do qual foram controladas as duas câmaras. A Figura 84 apresenta um esquema da disposição das câmaras em relação ao modelo físico.

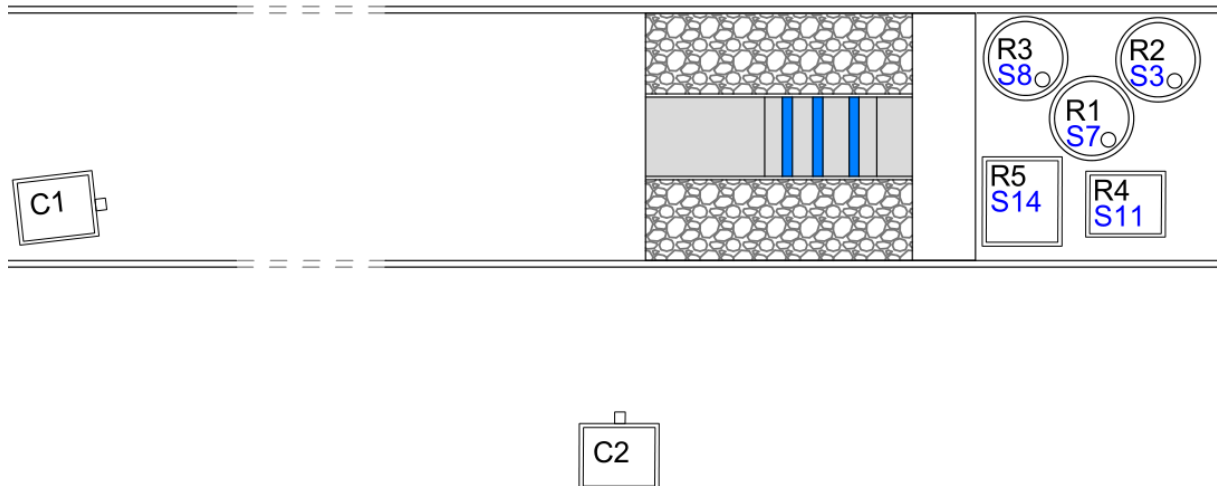


Figura 84 – Esquema da disposição das câmaras (C1 e C2) em relação ao modelo físico.

### 4.3. MODELO FÍSICO

O modelo físico do dispositivo de aproveitamento da energia das ondas desenvolvido para a secção corrente da estrutura projetada para o prolongamento do quebramar norte do porto de Leixões foi produzido pelo INEGI, tendo por base a geometria da componente de galgamento obtida através do processo de otimização descrito na secção 3.3, e da componente de coluna de água oscilante otimizada com recurso a modelos de CFD aplicados pelo INEGI. A escala geométrica escolhida foi 1:50.

A largura total do modelo é de 40,8 cm (acrescentaram-se 4 mm de cada lado devido à espessura das paredes, para se obter 40 cm (20 m em protótipo) úteis disponíveis. A altura total do dispositivo é de 61,3 cm, levando a que a cota de coroamento do dispositivo seja a mesma que a do quebramar de taludes previsto para o prolongamento do quebramar norte do porto de Leixões. Os quatro reservatórios têm como comprimento 78,3 cm, 72,2 cm, 65,5 cm e 58,8 cm, respetivamente para o primeiro, segundo, terceiro e quarto reservatório. A parte superior do dispositivo serve como reservatório para captação do volume de galgamento da estrutura. O comprimento total do dispositivo é de 113,8 cm, opção devida à conceção do *setup* experimental, que será descrito à frente. Estas são as dimensões mais importantes do dispositivo e que têm maior influência no seu desempenho energético. O dispositivo utilizado nos testes experimentais, desenhado com o *software* SolidWorks®, é apresentado na Figura 85. O modelo apresentado corresponde à configuração B, apresentada na secção 3.2.

O Anexo D apresenta outras perspetivas do modelo desenhado com o *software* SolidWorks®.

Para a materialização do modelo, foram utilizadas placas de acrílico, que foram coladas de forma a obter uma estrutura estanque. Essa estanquidade foi testada e assegurada no final da construção. As condutas flexíveis que ligam os reservatórios do dispositivo aos reservatórios auxiliares saem por baixo dos reservatórios, na parte traseira. Foram ainda feitas duas peças por impressão 3D que permitem modificar rapidamente a geometria da entrada da CAO, com o objetivo de estudar a melhor de três soluções. A comparação entre os resultados obtidos para as três geometrias pretende avaliar qual a geometria que apresenta uma eficiência conjunta melhor. O modelo construído é apresentado na Figura 86.

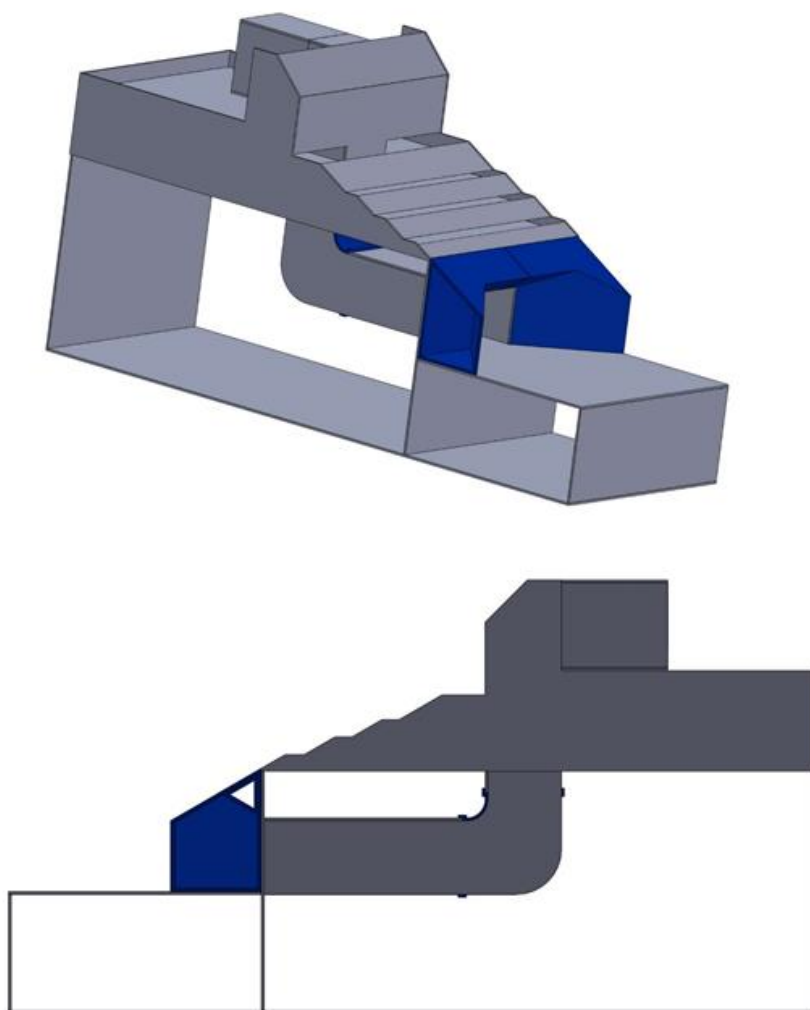


Figura 85 – Dispositivo híbrido de conversão da energia das ondas realizado em SolidWorks® (INEGI, 2018).



Figura 86 – Dispositivo de conversão da energia das ondas: configuração B.

A turbina utilizada na componente de coluna de água oscilante do dispositivo híbrido é uma turbina de impulso biradial. Para esta turbina, o caudal é aproximadamente proporcional à raiz quadrada da pressão (Falcão *et al.*, 2013b). Como não é possível utilizar uma turbina no modelo físico, devido à escala utilizada, e por não ser respeitada a semelhança de Reynolds, mas sim a de Froude, foi utilizado um diafragma numa câmara fotográfica para simular o PTO. Este tem aproximadamente a mesma relação entre a pressão e o caudal, e a variação do diâmetro de abertura permite variar a constante de proporcionalidade, simulando assim várias configurações da turbina. É ainda possível controlar a abertura através dum sistema de arduino ligado a um computador próximo do dispositivo. Esta ferramenta permite que a abertura do diafragma seja regulada em tempo real e de forma instantânea, sem necessidade de parar os testes. Assim, podem ser testadas diversas configurações de PTO da coluna de água oscilante sem ser necessário interromper o teste para efetuar qualquer mudança, traduzindo-se numa economia de tempo.

Devido à escala utilizada no estudo em modelo físico, 1:50, a compressibilidade do ar não fica corretamente reproduzida. Esta compressibilidade é importante no funcionamento da coluna de água oscilante, e sem a verificação dessa semelhança os resultados obtidos estariam afetados de efeitos de escala quando fossem transpostos para as dimensões de protótipo. Consequentemente, e de forma a obter-se uma melhor representação da compressibilidade do ar, foi ligado um reservatório auxiliar à coluna de água oscilante através dum conduta rígida. Este reservatório encontra-se parcialmente cheio com água, considerada incompressível, para que se obtenha o volume necessário de ar à compensação da compressibilidade, que varia conforme o nível da superfície livre da água. A quantidade de água pode ser facilmente ajustada, de forma a que também o volume de ar o seja, pois, o volume de ar na câmara da CAO varia com o nível do mar e, consequentemente, varia também o volume de ar necessário à compensação da compressibilidade. O método utilizado é descrito em Falcão e Henriques (2014). A Figura 87 apresenta o diafragma utilizado na sua posição e a ligação da coluna de água ao reservatório auxiliar para simular a compressibilidade do ar, e a Figura 88 mostra o reservatório utilizado.

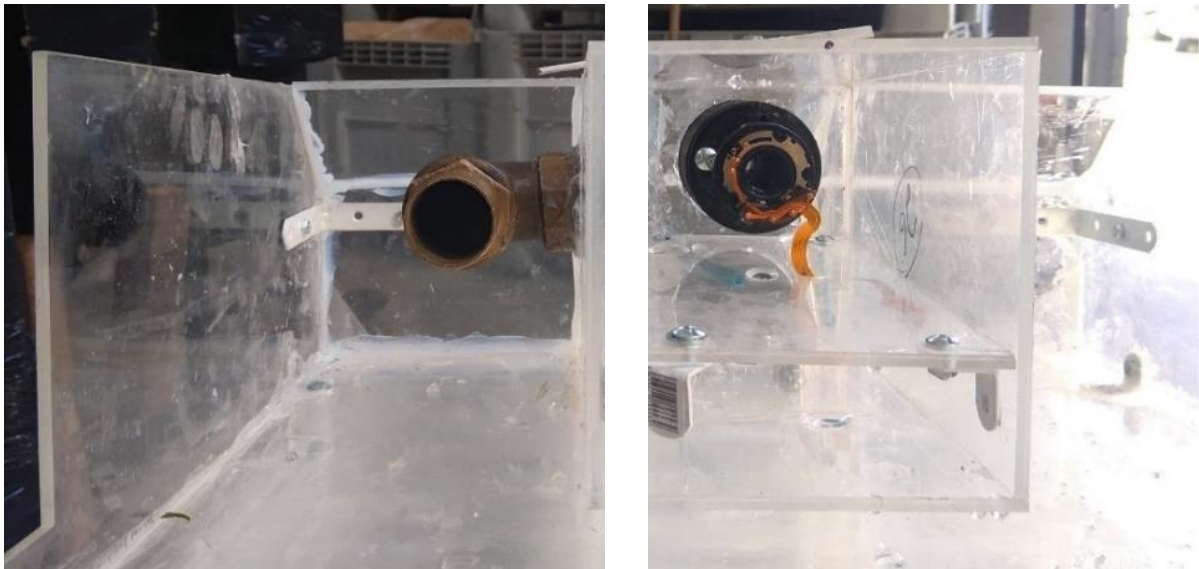


Figura 87 – Ligação da coluna de água oscilante ao reservatório de ar auxiliar para compensar a compressibilidade do ar (esquerda) e diafragma utilizado como simulador do PTO (direita).



Figura 88 – Reservatório auxiliar para simular a compressibilidade do ar.

#### 4.4. TESTES EXPERIMENTAIS

##### 4.4.1. PLANO DE TESTES

Os testes a realizar foram agrupados em quatro séries. No final de cada ensaio foi tirada uma fotografia superior ao quebramar, de forma a poder-se analisar a posição dos blocos do manto resistente e assim avaliar os danos ocorridos entre testes. No final de cada série de ensaios foi medido um perfil do fundo na zona frontal à estrutura de forma a avaliar a ocorrência de infraescavações. Inicialmente, foi tirada uma fotografia à estrutura e um perfil dos fundos antes de serem realizados os ensaios, servindo estes de referência. Nos ensaios da Série 1 e da Série 3 não foram medidos caudais de galgamento nos reservatórios do SSG, pois, para essas condições, o dispositivo entra em modo de sobrevivência.

Na primeira série de testes, a Série 1, foram medidos os volumes de galgamento do quebramar sem o dispositivo, avaliados os danos causados no manto e verificada a existência de infraescavações na zona da risberma para condições de agitação marítima extremas. A Tabela 20 apresenta a matriz de ensaios teórica da Série 1. Os três últimos ensaios pretendem simular uma tempestade de longa duração, de cerca de 14 horas no protótipo neste caso.

Tabela 20 – Programa teórico de ensaios da Série 1, dimensões em protótipo.

<b>H<sub>s</sub> (m)</b>	<b>T<sub>P</sub> (s)</b>	<b>Nível da água</b>	<b>N. Ondas</b>
6	13	BM	1024
8	16	BM	1024
9.5	18	BM	1024
6	13	PM	1024
8	16	PM	1024
11	16	PM	1024
11	16	PM	1024
11	16	PM	1024



A segunda série, a Série 2, tem como objetivo estudar o dispositivo híbrido para condições normais de agitação e a escolha duma solução de entre as três geometrias estudadas (cf. Figura 52, Figura 53 e Figura 54). Devido ao grande número de testes, estes foram separados em três tabelas. A Tabela 21 apresenta a matriz de ensaios teórica dos testes em que, para cada geometria, se variou o período entre 6 e 14 s, mantendo sempre a mesma altura de onda,  $H = 1$  m, de forma a observar-se o efeito do período. A Tabela 22 apresenta a matriz de ensaios teórica dos testes em que, para cada geometria, se variou a altura de onda  $H$  entre 2, 3 e 4 m, usando o período de ressonância associado a cada geometria, de forma a observar o efeito deste período para cada altura de onda. Finalmente, a Tabela 23 apresenta a matriz de ensaios teórica dos testes em que, para cada geometria, se variou o período de onda entre 9 e 12 s e a altura de onda  $H$  entre 2 m e 3 m, de forma a observar o comportamento do dispositivo para várias alturas de onda, com diferentes períodos. Nestes ensaios excluíram-se aqueles que já tinham sido realizados anteriormente, quando foi estudado o período de ressonância.

Tabela 21 – Programa teórico de ensaios da Série 2, dimensões em protótipo (1).

H (m)	T (s)	Geometria	Nível da água	N. Ondas
1	6	A, B, C	NM	400
1	7	A, B, C	NM	400
1	8	A, B, C	NM	400
1	9	A, B, C	NM	400
1	10	A, B, C	NM	400
1	11	A, B, C	NM	400
1	12	A, B, C	NM	400
1	13	A, B, C	NM	400
1	14	A, B, C	NM	400

Tabela 22 – Programa teórico de ensaios da Série 2, dimensões em protótipo (2).

H (m)	T (s)	Geometria	Nível da água	N. Ondas
2	$T_R$ (12 s)	A, B	NM	400
3	$T_R$ (12 s)	A, B	NM	400
4	$T_R$ (12 s)	A, B	NM	400
2	$T_R$ (11 s)	C	NM	400
3	$T_R$ (11 s)	C	NM	400
4	$T_R$ (11 s)	C	NM	400

Tabela 23 – Programa teórico de ensaios da Série 2, dimensões em protótipo (3).

H (m)	T (s)	Geometria	Nível da água	N. Ondas
2	9	A, B, C	NM	200
2	10	A, B, C	NM	200
2	11	A, B	NM	200
2	12	C	NM	200
3	9	A, B, C	NM	200
3	10	A, B, C	NM	200
3	11	A, B	NM	200
3	12	C	NM	200

A terceira série de testes, a Série 2W, tem como objetivo estudar a eficiência do dispositivo para os estados de mar que ocorrem no local - Leixões. A Tabela 24 apresenta a matriz de ensaios teórica da Série 2W.

Tabela 24 – Programa teórico de ensaios da Série 2W, dimensões em protótipo.

<b>H<sub>s</sub> (m)</b>	<b>T<sub>P</sub> (s)</b>	<b>Geometria</b>	<b>Nível da água</b>	<b>N. Ondas</b>
1.5	8	Melhor	BM	512
2.5	10	Melhor	BM	512
3.5	11	Melhor	BM	512
4.5	13	Melhor	BM	512
1.5	7	Melhor	NM	512
1.5	8	Melhor	NM	512
1.5	9	Melhor	NM	512
1.5	10	Melhor	NM	512
1.5	11	Melhor	NM	512
1.5	12	Melhor	NM	512
2.5	8	Melhor	NM	512
2.5	9	Melhor	NM	512
2.5	10	Melhor	NM	512
2.5	11	Melhor	NM	512
2.5	12	Melhor	NM	512
3.5	11	Melhor	NM	512
3.5	12	Melhor	NM	512
4.5	13	Melhor	NM	512
1.5	8	Melhor	PM	512
2.5	10	Melhor	PM	512
3.5	11	Melhor	PM	512
4.5	13	Melhor	PM	512

Por fim, a quarta série de testes, a Série 3, tem como objetivo determinar os volumes de galgamento do quebramar com o dispositivo de aproveitamento da energia das ondas integrado, bem como avaliar os danos causados no manto resistente e verificar a existência de infraescavações na zona da risberma para condições de agitação marítima extremas. A Tabela 25 apresenta a matriz de ensaios teórica da Série 3.

Tabela 25 – Programa teórico de ensaios da Série 3, dimensões em protótipo.

<b>H<sub>s</sub> (m)</b>	<b>T<sub>P</sub> (s)</b>	<b>Geometria</b>	<b>Nível da água</b>	<b>N. Ondas</b>
6	13	Melhor	BM	1024
8	16	Melhor	BM	1024
9.5	18	Melhor	BM	1024
6	13	Melhor	PM	1024
8	16	Melhor	PM	1024
11	16	Melhor	PM	1024

Nos ensaios da Série 1 foram considerados dois níveis da água do mar, correspondentes à baixa-mar e à preia-mar. Estes correspondem aos níveis 0.31 m e 3.25 m em relação ao zero hidrográfico local, respetivamente para a baixa-mar e para a preia-mar de águas vivas, que correspondem aos níveis 0.31 m e 3.25 m em relação ao zero hidrográfico local, no protótipo. No modelo físico correspondem a

profundidades de água de 46.1 cm e 52.0 cm na zona frontal ao sistema de geração de ondas. Os testes foram realizados com ondas irregulares, utilizando um espectro de JONSWAP com um fator de forma do pico igual a  $\gamma = 3.3$ . A altura de onda máxima utilizada foi imposta pela capacidade do equipamento de geração de agitação marítima.

Na Série 2 foram realizados ensaios reproduzindo as mesmas condições para as três geometrias. Foram considerados os níveis de baixa-mar, nível médio e preia-mar. O nível médio corresponde à cota 1.65 m em relação ao zero hidrográfico local. No modelo, a profundidade de água é de 48.8 cm na zona frontal ao sistema de geração de ondas. Foram utilizadas ondas regulares para ser possível avaliar o comportamento do dispositivo para condições específicas. Embora estes ensaios não produzam resultados realistas, estes são extremamente úteis para observar qual a influência, por exemplo, do período ou da altura de onda na eficiência do dispositivo híbrido. Os resultados permitirão ainda validar o modelo numérico de CFD a usar na otimização do sistema híbrido.

Na Série 2W foi utilizada a melhor geometria, selecionada com base nos ensaios anteriores. Foram utilizadas ondas irregulares, definidas da mesma forma que na Série 1, e os níveis de baixa-mar, nível médio e preia-mar.

Na Série 3 foram utilizadas ondas irregulares, definidas da mesma forma que na Série 1, e os níveis de baixa-mar e preia-mar.

#### 4.4.2. SETUP EXPERIMENTAL

O *setup* experimental foi construído no tanque de ondas utilizando divisórias de forma a materializar um canal com 80 cm de largura, no qual foi colocado o modelo físico. As divisórias foram mantidas na sua posição com cilindros de betão de peso elevado, de forma a prevenir que estas se movimentem durante os testes por efeito da agitação marítima gerada. A largura do canal foi escolhida com base na largura das pás do sistema de geração de agitação marítima, de forma a utilizar-se apenas uma pá, dimensão considerada adequada para o estudo. O canal onde foram realizados os ensaios encontra-se encostado a uma das paredes laterais do tanque com janela de visualização, permitindo assim a observação do comportamento da estrutura ao longo dos ensaios e facilitando a utilização dos equipamentos.

A Figura 89 mostra a secção lateral da solução projetada pela Consulmar para o quebramar na secção onde se pretende aplicar o dispositivo.

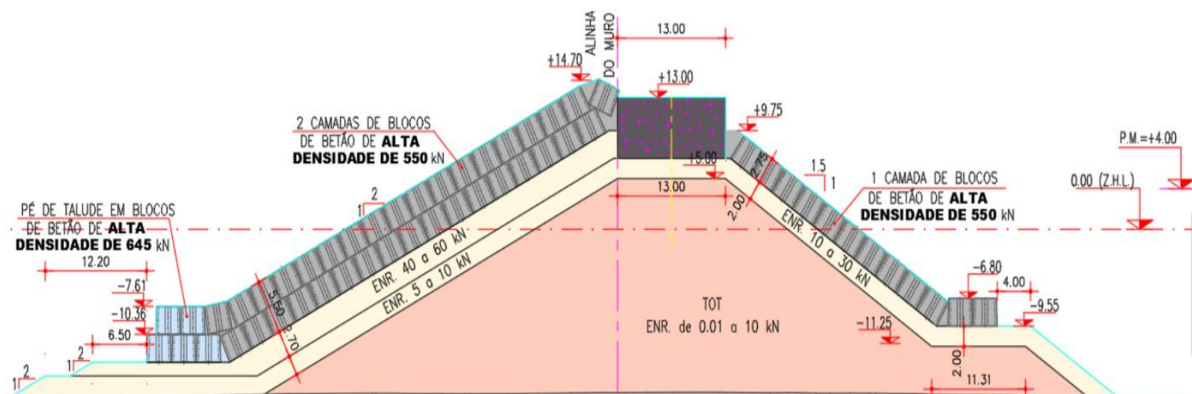


Figura 89 – Solução escolhida para o prolongamento do quebramar na secção onde se considera aplicar o dispositivo de aproveitamento da energia das ondas (Fortes *et al.*, 2017).

A solução escolhida para o quebramar foi reproduzida à escala. Para isso, utilizou-se brita com as dimensões equivalentes em escala de modelo. Foram assim materializados as duas subcamadas e o núcleo do quebramar. Os blocos cúbicos Antifer foram emprestados pelo LNEC. Em valores de protótipo, os blocos têm 2.75 m de altura, e os da risberma pesam 645 kN enquanto que os restantes pesam 550 kN. A superestrutura foi construída em betão, sendo constituída por um único elemento paralelepípedo, com 80 cm de largura, 11.6 cm de altura e 26 cm de comprimento.

Foi colocada areia no canal de forma a representar a batimetria na zona frontal ao quebramar. Os fundos, móveis, têm uma inclinação de cerca de  $0.63^\circ$ , na zona onde o quebramar e o dispositivo foram colocados. A espessura da camada de areia na zona de colocação da risberma é de cerca de 13.8 cm, de forma a ser possível avaliar possíveis assentamentos locais e infraescavações. Apenas será reproduzida uma parte do quebramar, correspondente ao lado de barlar, pois não tem interesse estudar a parte de sotamar, sendo o modelo sustentado por uma parede de blocos de betão. Fica assim simplificado o modelo físico e reduzida a quantidade de material necessária. A Figura 90 apresenta o esquema do modelo, visto da janela de visualização, sem o dispositivo, e a Figura 91 com o dispositivo. Quando o dispositivo é utilizado, o resto da largura do canal mantém-se preenchido pelo quebramar. Um esquema em planta do modelo físico é apresentado na Figura 92.

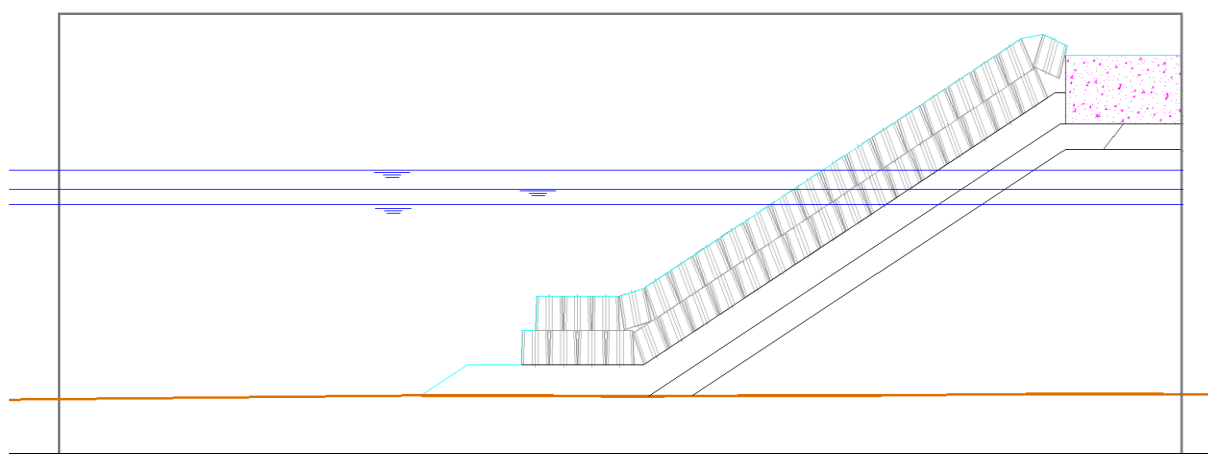


Figura 90 – Esquema do modelo visto da janela de visualização (sem dispositivo).

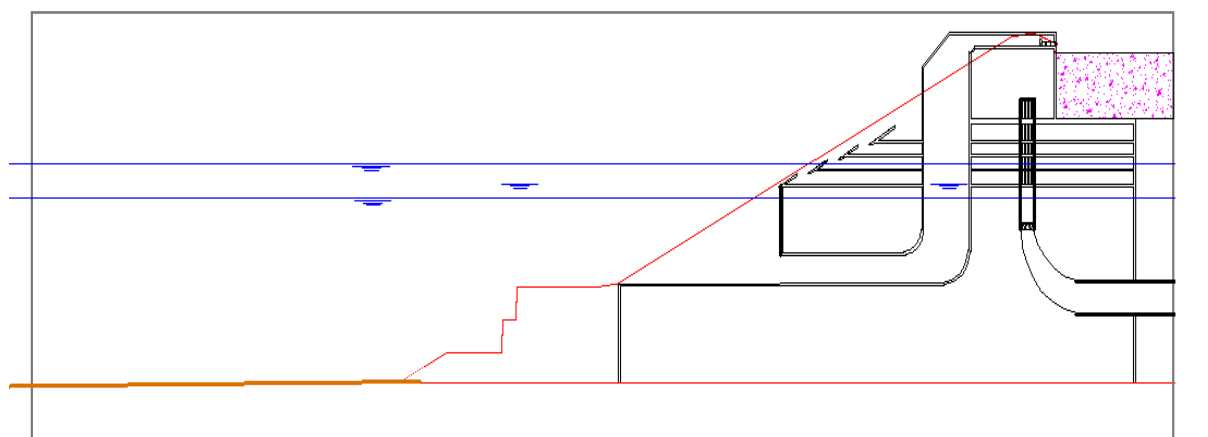


Figura 91 – Esquema do modelo visto da janela de visualização (com dispositivo, Geometria C).

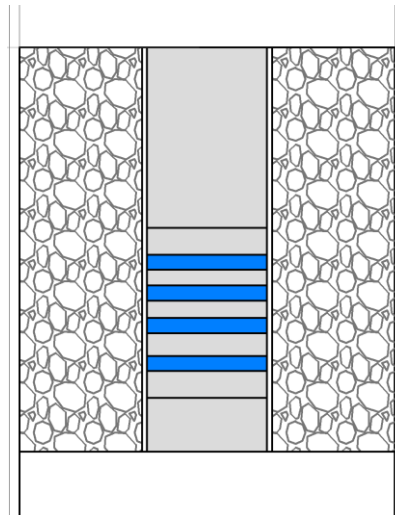


Figura 92 – Esquema em planta do quebramar com o dispositivo integrado.

Para os testes da Série 1, o quebramar foi construído ocupando toda a largura do canal, sobrepondo as camadas até chegar ao manto resistente. A disposição dos blocos adotada foi a mesma utilizada pelo LNEC (Fortes *et al.*, 2017), com as filas desfasadas de meio comprimento de bloco, excetuando a risberma em que estas são colocadas de forma alinhada. Foram ainda utilizadas pequenas placas de 2 mm de espessura para assegurar o mesmo espaçamento entre blocos. Para a captação e recolha do volume de água que galga a estrutura foi colada uma calha sobre a superestrutura que conduz a água para um reservatório colocado na parte de trás do modelo. A Figura 93 mostra a disposição do modelo para os ensaios da Série 1.



Figura 93 – Disposição do modelo físico para os ensaios da Série 1. Vista de cima (esquerda) e lateral (direita).

Para os restantes testes, a estrutura do quebramar foi removida, o dispositivo de aproveitamento da energia das ondas foi colocado no sítio, sensivelmente a meio do canal, e preenchido com lastro (brita)

de forma a prevenir qualquer deslocamento deste. Na zona lateral ao modelo do dispositivo foi reproduzida a geometria do quebramar, construído da mesma forma e com os mesmos materiais que foram usados para a Série 1. O resultado final é apresentado na Figura 94.

Foram colocadas quatro sondas próximas da pá do sistema de geração, e uma sonda próxima da estrutura, para medir as alturas de ondas geradas. Esta disposição permite determinar, a partir das séries temporais de elevação da superfície livre registadas, a distância entre as quatro sondas iniciais e do nível da água, a altura de onda significativa incidente e refletida para cada ensaio, e o coeficiente de reflexão associado. Como a agitação marítima gerada nem sempre corresponde exatamente àquela pretendida, esta análise permite conhecer a altura de onda efetivamente gerada. A sonda colocada em frente à estrutura permite avaliar a evolução da altura de onda ao longo do canal e conhecer as características das ondas perto da estrutura.



Figura 94 – Disposição do modelo físico para os ensaios da Série 2, 2W e 3 (esquerda) e ligação aos cinco reservatórios auxiliares (direita).

#### 4.4.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Após a construção do modelo e a preparação de todo o *setup* experimental, deu-se início ao procedimento experimental. Antes dos ensaios propriamente ditos, é realizada a calibração dos fatores de ganho para todas as condições de agitação a testar. Esta calibração é feita por meio dum processo iterativo em que se procura encontrar o fator de ganho, parâmetro introduzido no sistema de geração, que aproxima o mais possível as características da agitação gerada das pretendidas, para cada ensaio. O processo consiste em gerar todas as condições de agitação marítima previstas, para todos os níveis de água, e registar e analisar as características da agitação. O fator de ganho é ajustado até que estas correspondam às pretendidas. A Tabela 26 apresenta os fatores de ganho utilizados para as diferentes condições.

Tabela 26 – Fatores de ganho utilizados.

<b>H (m)</b>	<b>T (s)</b>	<b>Nível da água</b>	<b>Fator de ganho</b>
1.5	8	BM	1.03
2.5	10	BM	0.99
3.5	11	BM	1.05
4.5	13	BM	1.04
6	13	BM	1.09
8	16	BM	1.20
9.5	18	BM	1.20
1	6	NM	0.96
1	7	NM	1.16
1	8	NM	1.13
1	9	NM	1.11
1	10	NM	1.15
1	11	NM	1.09
1	12	NM	1.04
1	13	NM	1.10
1	14	NM	1.05
1.5	7	NM	1.07
1.5	8	NM	1.04
1.5	9	NM	1.08
1.5	10	NM	1.10
1.5	11	NM	1.03
1.5	12	NM	1.06
2	9	NM	1.12
2	10	NM	1.15
2	11	NM	1.07
2	12	NM	1.05
2.5	8	NM	1.05
2.5	9	NM	1.08
2.5	10	NM	1.09
2.5	11	NM	1.03
2.5	12	NM	1.06
3	9	NM	1.13
3	10	NM	1.16
3	11	NM	1.07
3	12	NM	1.14
3.5	11	NM	1.04
3.5	12	NM	1.08
4	11	NM	1.07
4	12	NM	1.07
4.5	13	NM	1.07
1.5	8	PM	1.06
2.5	10	PM	1.08
3.5	11	PM	1.05
4.5	13	PM	1.05
6	13	PM	1.11
8	16	PM	1.21
11	16	PM	1.18

O processo para cada ensaio, incluindo os de calibração dos fatores de ganho, é o seguinte:

- Inicialmente, verifica-se se o nível de água dentro do tanque de ondas é o pretendido, pois pode haver variações devido à evaporação, fugas ou entrada de água indesejada no tanque;
- Verificado o nível da água, a primeira tarefa a realizar é a calibração das sondas de nível, que deve ser efetuada todos os dias antes de iniciar os testes, e sempre que o nível de água varia. A calibração deve ser feita com o nível de água perfeitamente estabilizado;
- Antes dos ensaios em que é medido o caudal de galgamento do dispositivo SSG, as bombas do sistema de medição de caudal devem ser ligadas manualmente de forma a assegurar que os reservatórios auxiliares iniciam e finalizam os ensaios com a mesma altura de água no seu interior, permitindo assim uma leitura mais precisa dos caudais de galgamento;
- De seguida, segue-se a sequência de iniciação do sistema de geração de ondas e da absorção ativa das reflexões;
- Finalizadas as calibrações e os procedimentos iniciais, dá-se início ao ensaio, começando a geração de agitação, a aquisição de dados e as filmagens;
- No final de cada ensaio, e antes de realizar o seguinte, espera-se que a superfície livre da água volte ao estado de repouso total, evitando assim que a geração de ondas do ensaio seguinte seja comprometida por reflexões ou perturbações indesejadas. Tira-se também uma fotografia e, caso seja o último ensaio duma série, um perfil dos fundos na zona frontal à estrutura.

#### **4.5. RESULTADOS**

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios em modelo físico realizados. A análise está dividida em três partes.

Em correspondência com as séries de ensaios anteriormente descritas, é estudado o desempenho estrutural do quebramar sem o dispositivo de aproveitamento da energia das ondas e do quebramar com o dispositivo integrado. É analisada a estabilidade do manto resistente de cada estrutura, comparando depois os resultados das duas soluções, de forma a avaliar se a aplicação do dispositivo de aproveitamento da energia das ondas introduz modificações no comportamento estrutural do quebramar.

De seguida, será analisado o galgamento das duas estruturas. Mais uma vez, serão analisadas as estruturas independentemente e no final comparar-se-ão os resultados das duas, permitindo avaliar se a aplicação do dispositivo de aproveitamento da energia das ondas introduz modificações no caudal de galgamento do quebramar.

Após ser avaliado o desempenho estrutural e os caudais de galgamento das estruturas, passar-se-á ao estudo do desempenho do dispositivo de aproveitamento da energia das ondas. Inicialmente, será estudada a influência do período e da altura de onda para as três geometrias em estudo, selecionando-se a geometria com o melhor desempenho. De seguida, será estudado o desempenho da componente de galgamento do dispositivo para diversos estados do mar representativos das condições de agitação marítima no local, utilizando apenas a melhor geometria selecionada durante os ensaios anteriores. Será também feita uma estimativa da energia produzida, tendo em conta as eficiências das diferentes etapas de conversão de energia e a probabilidade de ocorrência dos diferentes estados do mar.

Os resultados obtidos pelo sistema da aquisição de dados são a elevação da superfície livre da água ao longo dos ensaios. Estes dados são tratados de forma a serem obtidas as alturas de onda incidente e refletida, o coeficiente de reflexão e os caudais de galgamento da estrutura, ou seja, aqueles que entram para dentro dos reservatórios do dispositivo SSG. A Figura 95 mostra, como exemplo, uma série



temporal da elevação da superfície livre da água registada por uma sonda colocada no canal, para obtenção da altura de onda, durante 5 minutos, e de uma sonda de registo do nível de água num reservatório, durante 30 minutos. Em ambos os casos os valores apresentados são valores de protótipo, para um ensaio com ondas regulares.

Serão também analisadas fotografias que mostram o manto resistente da estrutura no início e no final de cada ensaio e os perfis de fundo na zona frontal à estrutura.

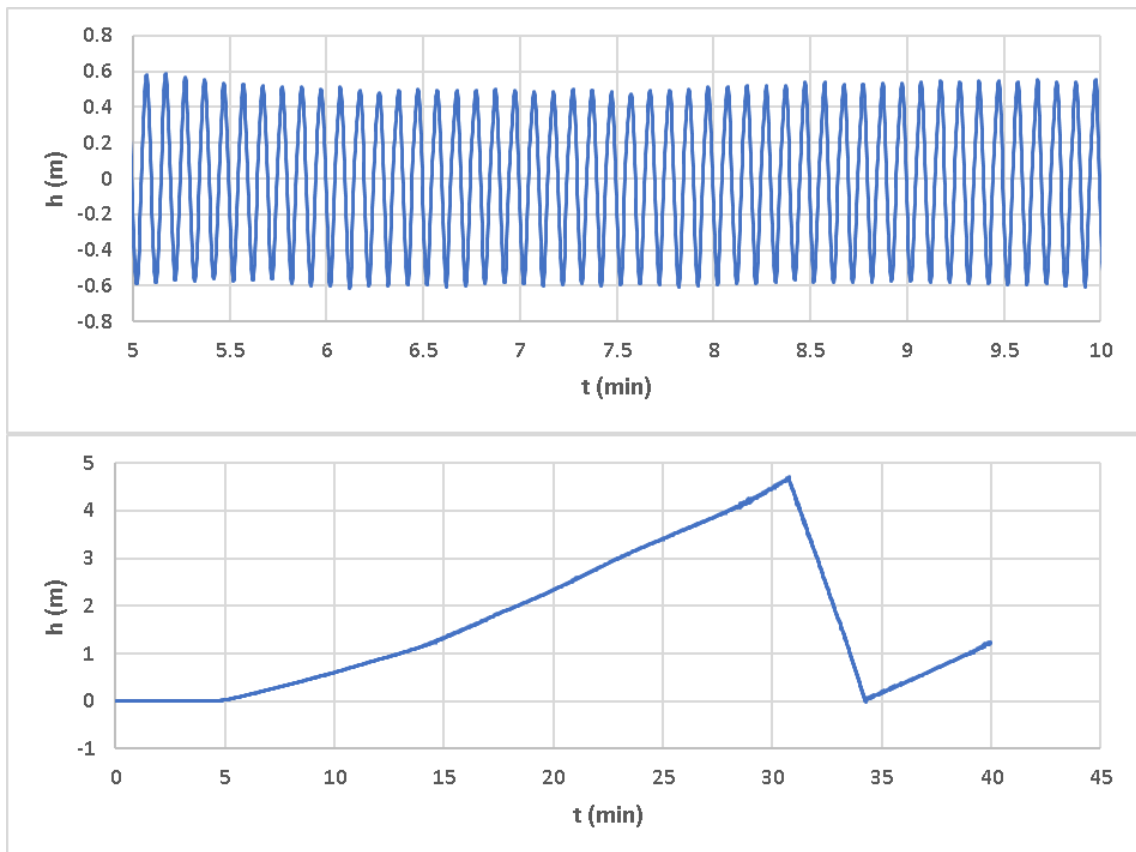


Figura 95 – Exemplo das séries temporais registadas por duas sondas em valores de protótipo. Sonda de registo de altura de onda (superior) e sonda de reservatório (inferior).

#### 4.5.1. DESEMPENHO ESTRUTURAL

##### 4.5.1.1. Série 1

A primeira série de testes realizada, a Série 1, pretende estudar o comportamento do quebramar sem o dispositivo de aproveitamento da energia das ondas. Esta série pretende representar a solução tradicional, neste caso um quebramar de taludes, com o manto resistente constituído por uma camada dupla de blocos cúbicos Antifer. A estabilidade será avaliada pelo número de blocos do manto resistente que se deslocaram da sua posição inicial, e será verificada a existência de infraescavações através dos perfis do fundo, em conjunto com a observação direta.

Antes da realização de qualquer ensaio, foram capturadas duas fotografias do quebramar de taludes imediatamente após a sua construção, ou seja, numa situação inicial de referência. Depois da realização de cada ensaio foi também tirada uma fotografia. O levantamento do perfil dos fundos na zona frontal

ao quebramar foi realizado no início e no fim da Série 1. Deste ponto em diante, a análise do comportamento do quebramar será feita do ponto de vista de barlamar, ou seja, do ponto de vista de um observador que se encontre em alto mar a olhar para a costa.

As alturas de onda efetivamente geradas pelo sistema de geração não correspondem exatamente às alturas teóricas apresentadas na Tabela 20, pelo que a Tabela 27 apresenta a altura de onda significativa incidente efetivamente gerada pelo sistema, calculada após o tratamento dos dados de forma a não ser considerada a onda refletida, e a altura de onda significativa medida na sonda posicionada em frente ao quebramar. No entanto, durante a análise serão referidos os valores teóricos, por simplicidade.

Tabela 27 – Altura de onda significativa gerada real e perto do quebramar na Série 1.

<b>H<sub>s</sub> teórico (m)</b>	<b>H<sub>s</sub> real (m)</b>	<b>H<sub>s</sub> próxima do quebramar (m)</b>	<b>T<sub>P</sub> (s)</b>	<b>Nível da água</b>
6	6.1	6.8	13	BM
8	7.6	9.0	16	BM
9.5	9.1	8.9	18	BM
6	5.9	6.8	13	PM
8	7.8	9.4	16	PM
11	9.5	10.6	16	PM

A Figura 96 apresenta fotografias da evolução do manto resistente e da risberma do quebramar ao longo da Série 1, tendo as duas primeiras sido tiradas antes de qualquer ensaio. As restantes correspondem, por ordem sequencial, visualizando de cima para baixo e da direita para a esquerda, aos ensaios da Série 1 apresentados na Tabela 20. As duas últimas fotografias correspondem às duas repetições do último ensaio, para  $H_s = 11$  m e  $T_p = 16$  s, com o nível de preia-mar.

A Figura 96 mostra que houve danos consideráveis, nomeadamente na risberma do quebramar. Observou-se, durante estes ensaios, que com o nível de água correspondente à baixa-mar, os blocos eram mais facilmente deslocados, resultando em vários blocos da risberma saindo da sua posição inicial. Isto deve-se sobretudo à menor profundidade de água, da qual resulta uma ação da onda mais significativa sobre esses blocos. Por outro lado, é necessário ter em atenção o facto de o quebramar ainda não ter sido submetido a ensaios. No entanto, os blocos parecem alcançar uma posição de equilíbrio, em que, após alguns serem deslocados da sua posição inicial, toda a estrutura se mantém estável e com deslocamentos dos blocos muito pequenos. Sem embargo, antes de se observar esta estabilização, é visível que o segundo ensaio (4ª fotografia) provoca um escorregamento dos blocos ao longo do manto, no lado esquerdo do quebramar. No entanto, este não se torna mais pronunciado ao longo dos restantes ensaios, sugerindo que atingiu uma configuração estável. Nos ensaios com o nível correspondente à preia-mar, apenas aqueles com a maior altura de onda significativa,  $H_s = 11$  m, provocaram deslocamentos de blocos adicionais, sem serem, no entanto, muito pronunciados. Os dois últimos ensaios não originam deslocamentos adicionais significativos.

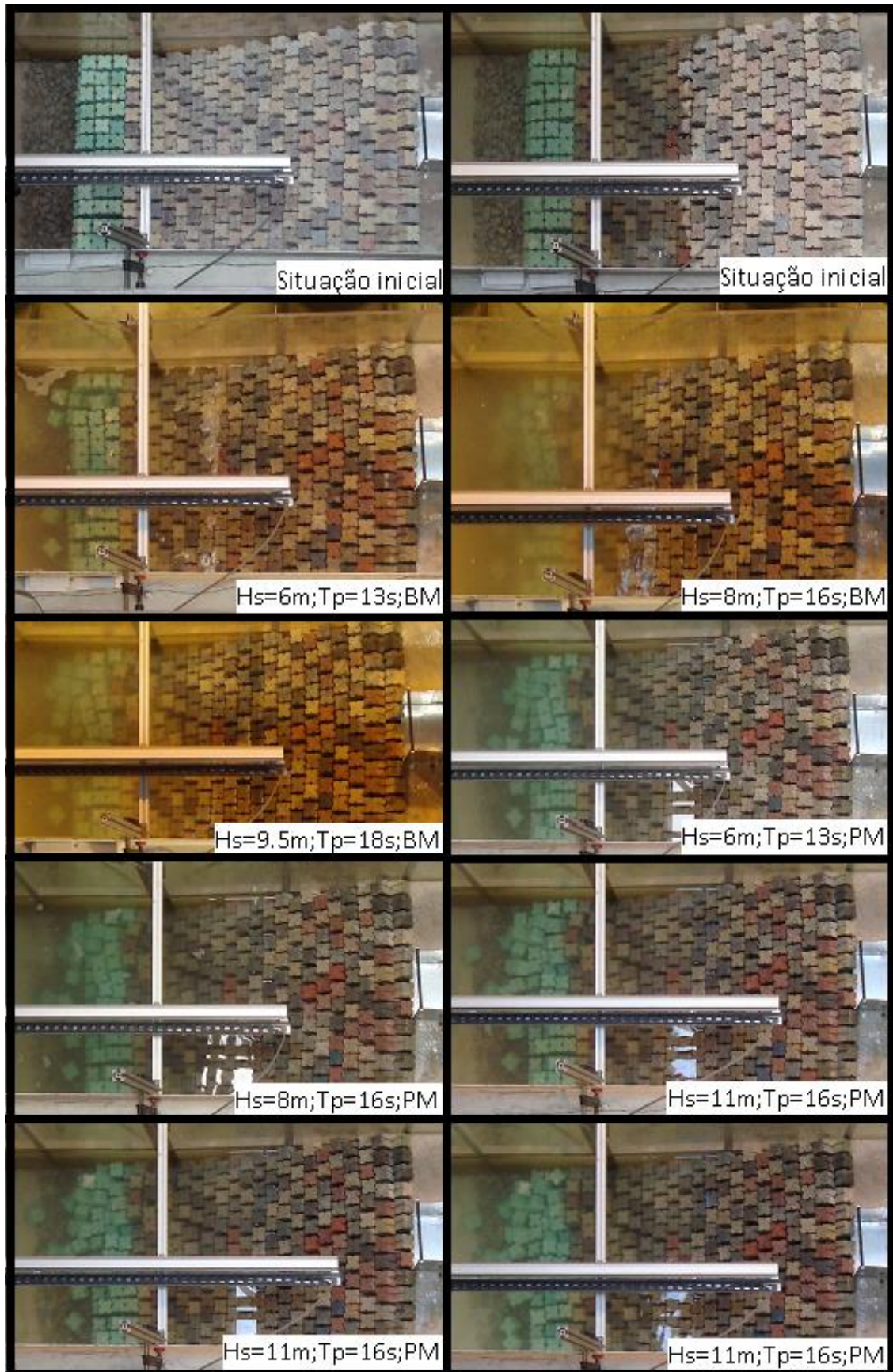


Figura 96 – Fotografias da evolução do manto resistente e da risberma do quebramar ao longo da Série 1.

Em suma, os blocos do manto resistente sofreram alguns deslocamentos ao longo dos ensaios da Série 1, sem que estes tenham afetado de forma muito significativa a estabilidade do quebramar.

No final dos três ensaios com o nível de baixa-mar observou-se o seguinte:

- Cerca de 25 blocos da risberma foram deslocados, alguns significativamente (sensivelmente mais do que uma dimensão característica do bloco);
- Houve um escorregamento do manto resistente do lado esquerdo do quebramar, mas pouco acentuado, não tendo afetado a estabilidade da estrutura. Este pode, no entanto, dever-se ao efeito de parede;
- O manto resistente parece alcançar uma posição de equilíbrio após o deslocamento de alguns blocos.

No final dos cinco ensaios com o nível de preia-mar observa-se o seguinte:

- Os ensaios com alturas de onda significativas de 6 e 8 m não provocaram deslocamentos adicionais visíveis nos blocos;
- Houve alguns deslocamentos dos blocos da risberma após os ensaios com a altura de onda significativa de 11 m, não sendo estes muito significativos e não resultando numa continuação do escorregamento observado anteriormente;
- Os dois últimos ensaios, que pretendem simular uma tempestade de maior duração, não causaram danos adicionais significativos.

A Figura 97 mostra o perfil inicial dos fundos na zona frontal ao quebramar, feito antes da realização de quaisquer testes, e no final da Série 1 de testes. Para comparação com os resultados da Série 3, o perfil apresentado corresponde ao final do sexto ensaio. Observam-se três zonas distintas, da esquerda para a direita:

- Fundos em areia na zona frontal à estrutura;
- Prisma de fundação constituído por blocos de enrocamento;
- Risberma constituída por blocos cúbicos Antifer dispostos em duas camadas.

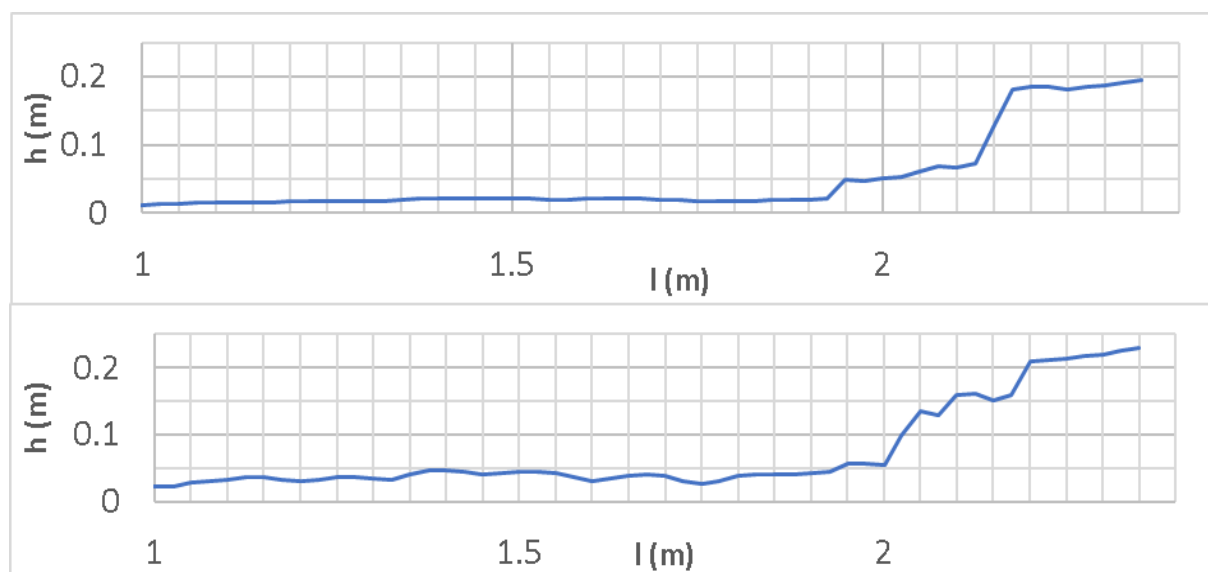


Figura 97 – Levantamento do perfil dos fundos inicial (superior) e no final da Série 1 (inferior).

A comparação dos perfis inicial e final mostra que houve uma mudança do fundo significativa, tendo-se formado rugosidades de fundo na zona frontal à estrutura em areia. A zona da risberma sofreu modificações em relação à sua disposição inicial, como aliás já foi referido anteriormente a partir da análise dos elementos fotográficos. Estes fenómenos eram previsíveis e foram observados ao longo dos ensaios. Não obstante, para as condições de teste consideradas, não se observam infraescavações. Sem embargo, é possível que para testes de maior duração possam ocorrer infraescavações.

Os resultados desta análise mostram que a solução considerada neste trabalho para o prolongamento do quebramar Norte do porto de Leixões é estável, embora tenha sofrido danos significativos, nomeadamente na risberma, quando submetida a condições de agitação marítima extremas.

#### 4.5.1.2. Série 3

A quarta série de testes realizada, a Série 3, pretende estudar o comportamento do quebramar já com o dispositivo de aproveitamento da energia das ondas integrado.

Antes da realização de qualquer ensaio foi tirada uma fotografia do quebramar de taludes com o dispositivo integrado, ou seja, numa situação de referência, e feito o levantamento do perfil dos fundos. A estrutura foi reconstruída e a areia nivelada após os testes da Série 2 e Série 2W, de forma a serem obtidos resultados comparáveis com os da Série 1. Depois da realização de cada ensaio foi também tirada uma fotografia, e no final da Série 3 foi feito o levantamento do perfil dos fundos.

As alturas de onda efetivamente geradas pelo sistema de geração não correspondem exatamente às alturas teóricas apresentadas na Tabela 25, pelo que a Tabela 28 apresenta a altura de onda significativa efetivamente gerada pelo sistema, calculada após o tratamento dos dados de forma a não ser considerada a onda refletida, e a altura de onda significativa medida diante do quebramar. No entanto, durante a análise serão referidos os valores teóricos, por simplicidade.

Tabela 28 – Altura de onda significativa gerada real e perto do quebramar na Série 1.

<b>H<sub>s</sub> teórico (m)</b>	<b>H<sub>s</sub> real (m)</b>	<b>H<sub>s</sub> próxima do quebramar (m)</b>	<b>T<sub>P</sub> (s)</b>	<b>Nível da água</b>
6	5.9	6.9	13	BM
8	7.8	8.9	16	BM
9.5	8.8	8.7	18	BM
6	5.9	6.8	13	PM
8	8.2	8.8	16	PM
11	9.8	10.0	16	PM

A Figura 98 apresenta as fotografias da evolução do manto resistente e da risberma do quebramar ao longo da Série 3, tendo a primeira sido tiradas antes dos ensaios. As restantes correspondem, por ordem sequencial, visualizando de cima para baixo e da direita para a esquerda, aos ensaios da Série 3 apresentados na Tabela 25.

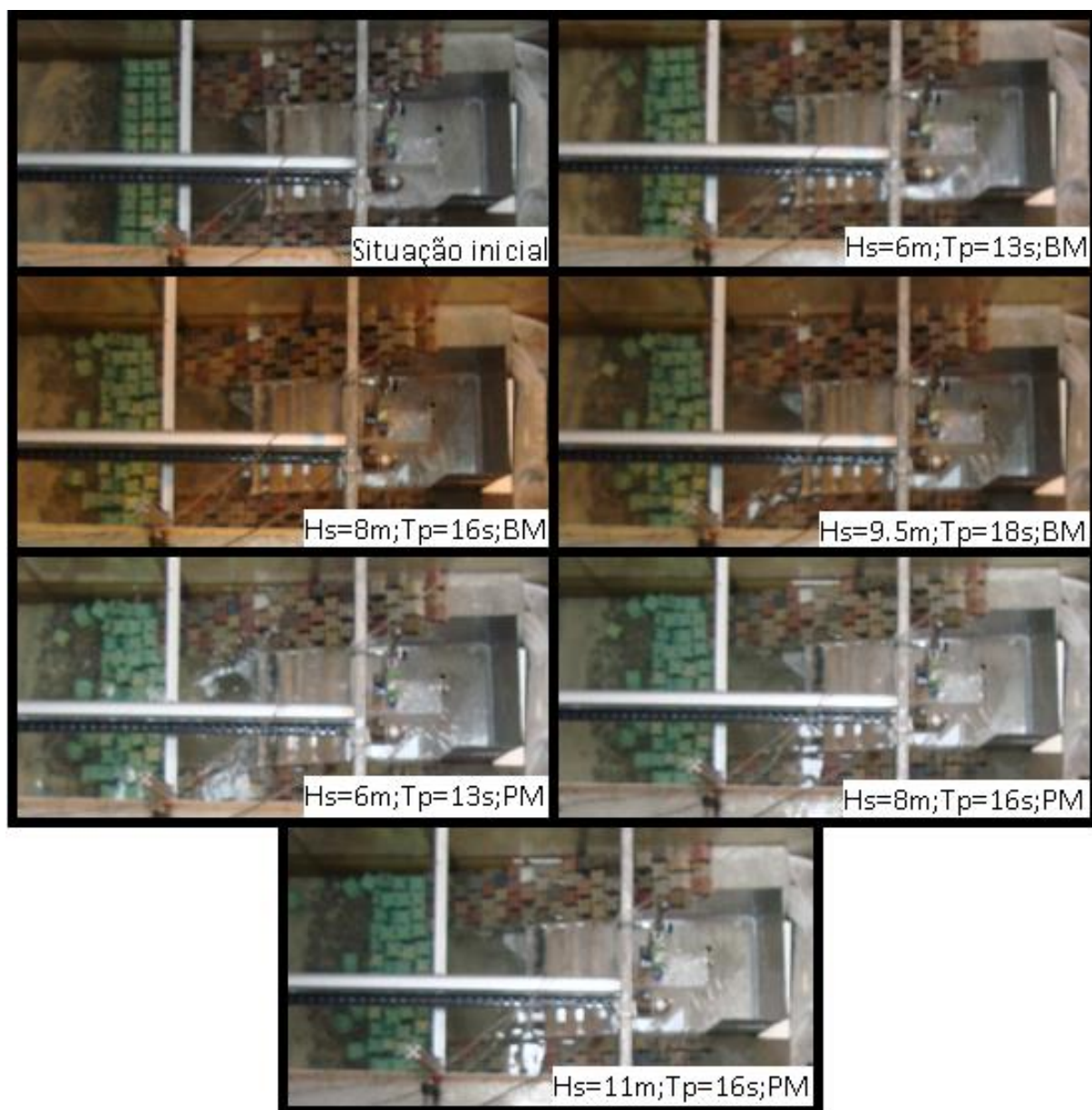


Figura 98 – Fotografias da evolução do manto resistente e da risberma do quebramar ao longo da Série 3.

A Figura 98 mostra que houve danos consideráveis que afetaram nomeadamente os blocos cúbicos Antifer da risberma, embora apenas durante os ensaios realizados com o nível de água correspondente à baixa-mar. Nos ensaios com o nível de água correspondente à preia-mar é apenas visível o deslocamento de um bloco no final do último teste. Tal como aconteceu com os ensaios da Série 1, o manto parece alcançar uma posição de equilíbrio estável, após alguns deslocamentos iniciais. Não se observam, no entanto, escorregamentos do manto resistente. O dispositivo de aproveitamento da energia das ondas não sofreu qualquer deslocamento.

Em suma, os blocos do manto resistente sofreram alguns deslocamentos ao longo dos ensaios da Série 3, sem que estas tenham afetado de forma muito significativa a estabilidade do quebramar.

No final dos três ensaios com o nível de baixa-mar observou-se o seguinte:

- Cerca de 20 blocos da risberma foram deslocados, alguns significativamente (mais do que uma dimensão característica do bloco);
- A risberma parece alcançar uma posição de equilíbrio, após alguns deslocamentos iniciais dos blocos.

No final dos três ensaios com o nível de preia-mar observou-se o seguinte:

- Os ensaios não provocam deslocamentos adicionais significativos de blocos, observando-se apenas um bloco deslocado.

A Figura 99 mostra o perfil inicial dos fundos, levantado antes da realização de quaisquer testes, e no final da Série 3 de testes.

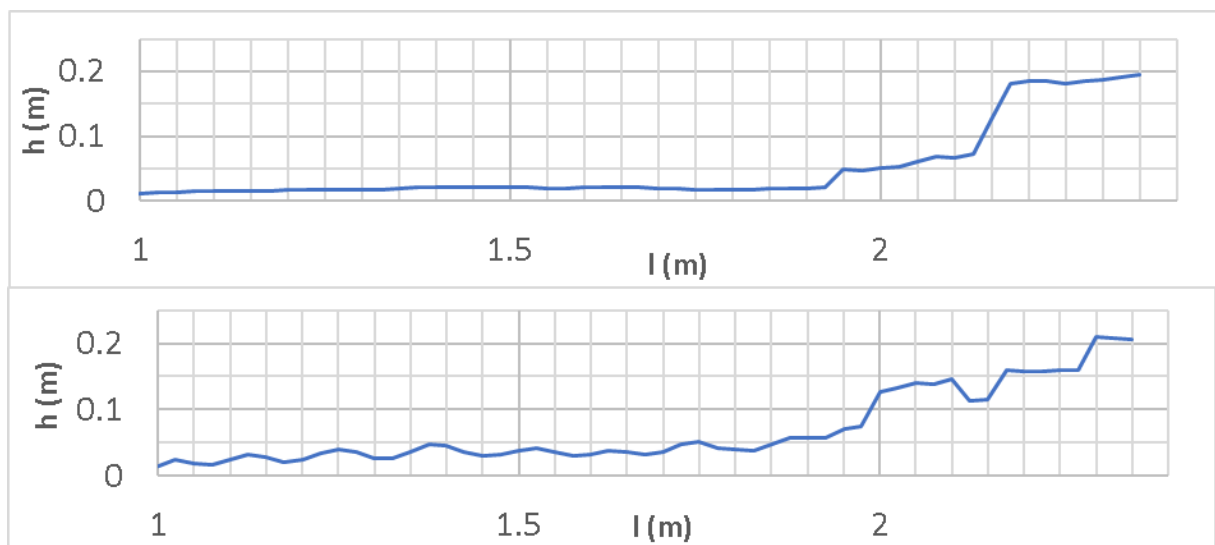


Figura 99 – Levantamento do perfil dos fundos inicial (superior) e no final da Série 3 (inferior).

A comparação dos perfis inicial e final em frente ao quebramar mostra um comportamento idêntico ao que foi observado na Série 1. Houve uma alteração significativa dos fundos, tendo-se formado rugosidades de fundo na zona frontal à estrutura em areia. A zona da risberma sofreu modificações em relação à sua disposição inicial, como aliás já foi referido anteriormente a partir da análise dos elementos fotográficos. Não obstante, para as condições de teste consideradas, não se observam infraescavações. Sem embargo, é possível que para testes de maior duração possam ocorrer infraescavações.

Os resultados desta análise mostram que a solução considerada neste trabalho para o prolongamento do quebramar Norte do porto de Leixões com o dispositivo de aproveitamento da energia das ondas integrado é estável, embora tenha sofrido danos significativos, nomeadamente na risberma, quando submetida a condições de agitação marítima extremas.

#### 4.5.1.3. Comparação das duas soluções

Os ensaios realizados na Série 1 e 3 mostraram que ambas as soluções têm um comportamento estrutural pouco adequado, com deslocamentos significativos de blocos na zona da risberma. Após os estudos realizados pelo LNEC (Fortes *et al.*, 2017), concluiu-se que deveriam ser alterados os pesos dos blocos do manto e da risberma, aumentando os do manto para 680 kN e os da risberma para 800 kN. No entanto,

não se prevê a ocorrência de infraescavações relevantes em frente à estrutura. Não obstante, será comparado o estado das estruturas no final das duas séries de ensaios.

A Figura 100 mostra as fotografias tiradas no final do sexto ensaio da Série 1 e da Série 3.

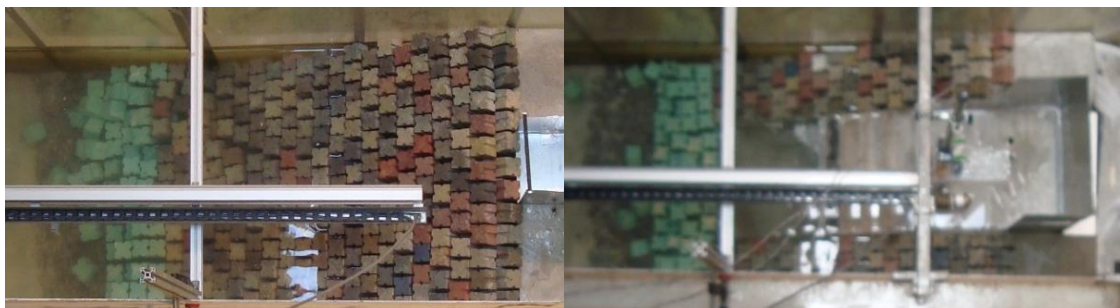


Figura 100 – Fotografia do quebramar após a Série 1 (esquerda) e após a Série 3 (direita).

Comparando as duas fotografias é perceptível um número maior de blocos deslocados no final da Série 1 do que no final da Série 3. Também não há escorregamentos após a Série 3, enquanto no final da Série 1 era visível o escorregamento dos blocos do lado esquerdo do manto resistente. Não obstante, este resultado pode dever-se ao efeito de parede decorrente da largura reduzida do canal. Devido à largura de 80 cm do canal, quando o dispositivo foi colocado no quebramar, foi apenas possível colocar três blocos do lado direito do dispositivo e quatro do lado esquerdo. No entanto, não foi possível respeitar o mesmo afastamento entre blocos, e os blocos do manto resistente estão menos distanciados na Série 3 do que na Série 1. Esta compactação adicional pode ter contribuído para um comportamento estrutural superior da solução com o dispositivo. Sem embargo, o espaçamento entre blocos fica à escolha do projetista/Dono de Obra, sendo que um espaçamento superior leva a custos mais reduzidos, e vice-versa, mas a uma estabilidade menor. No entanto, um espaçamento maior entre blocos aumenta a porosidade do manto, o que conduz a menores galgamentos da estrutura. Na zona central do canal, em frente ao dispositivo, observa-se uma redução significativa do número de blocos deslocados após os testes com o dispositivo de aproveitamento da energia das ondas integrado, em relação aos testes sem dispositivo.

A Figura 101 apresenta os perfis dos fundos no final da Série 1 e da Série 3.

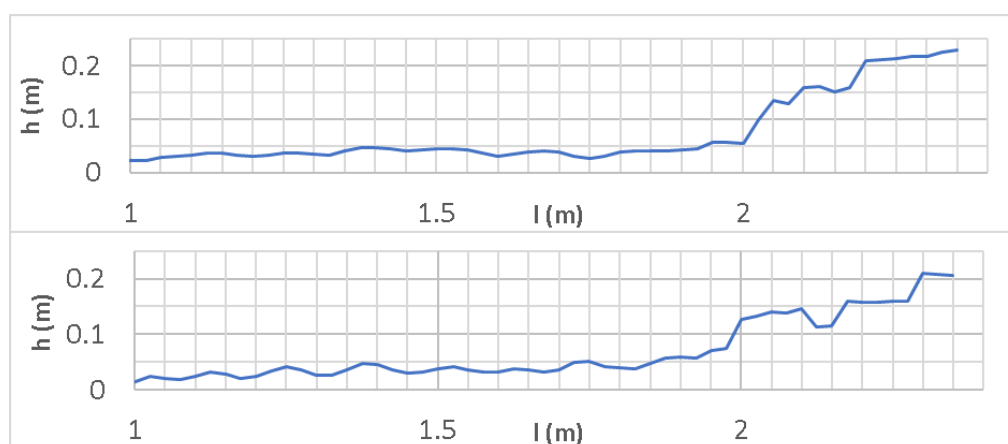


Figura 101 – Levantamento do perfil dos fundos no final de Série 1 (superior) e no final da Série 3 (inferior).



Não se observam diferenças relevantes entre os dois perfis na zona frontal à estrutura em areia, sendo que em nenhum dos dois há indicação da presença de infraescavações. Observa-se, não obstante, diferenças consideráveis a partir dos 2 m, na zona correspondente ao prisma de fundação, constituído por blocos de enrocamento, e à risberma, constituída por blocos cúbicos Antifer. Após a Série 3, os deslocamentos nesta zona são maiores do que na Série 1, observando-se diferenças mais significativas em relação ao perfil inicial. No entanto, pode-se concluir que a presença do dispositivo na estrutura não conduz ao aparecimento de infraescavações, e que as diferenças observadas no prisma de fundação e na risberma não são significativas.

Em suma, a aplicação do dispositivo de aproveitamento da energia das ondas não parece introduzir efeitos negativos no comportamento estrutural do quebramar, sendo que, para qualquer dos casos, com e sem dispositivo, a estrutura demonstra uma estabilidade satisfatória quando submetida a condições de agitação marítima severas/extremas.

#### 4.5.2. DESEMPENHO FUNCIONAL

##### 4.5.2.1. Série 1

Durante os ensaios da Série 1 e 3, foram medidos volumes de galgamento da estrutura e calculados os correspondentes caudais médios. Para o efeito foi utilizada uma calha posicionada sobre a superestrutura. Determinado o volume de água que galgou a estrutura e a duração do ensaio, foi possível calcular o caudal médio de galgamento da estrutura por metro de desenvolvimento desta. A Tabela 29 apresenta os resultados da Série 1, em valores de protótipo.

Tabela 29 – Caudais médios de galgamento da estrutura na Série 1 em valores de protótipo.

<b>H<sub>s</sub> teórico (m)</b>	<b>H<sub>s</sub> real (m)</b>	<b>H<sub>s</sub> próxima do quebramar (m)</b>	<b>T<sub>P</sub> (s)</b>	<b>Nível da água</b>	<b>Caudal de galgamento por metro (m<sup>3</sup>/h/m)</b>
6	6.1	6.8	13	BM	4
8	7.6	9.0	16	BM	138
9.5	9.1	8.9	18	BM	251
6	5.9	6.8	13	PM	34
8	7.8	9.4	16	PM	457
11	9.5	10.6	16	PM	1061

A Figura 102 apresenta os caudais de galgamento por metro de desenvolvimento da estrutura durante a Série 1, em função da altura de onda significativa incidente teórica.

Na Figura 102 observa-se que o caudal de galgamento aumenta consideravelmente com a altura de onda, embora para uma altura de onda significativa de 6 m o caudal de galgamento seja muito pequeno, quer na baixa-mar, quer na preia-mar. No entanto, com o aumento da altura de onda significativa a diferença de galgamento entre a baixa-mar e a preia-mar aumenta. Para  $H_S = 8\text{ m}$  o caudal de galgamento é cerca de 3.3 vezes maior na preia-mar do que na baixa-mar. Para  $H_S = H_{max}$  os valores de galgamento não são comparáveis, pois a onda máxima é limitada pela profundidade de água na baixa-mar, resultando em alturas diferentes na preia-mar. A diferença observada entre os galgamentos na baixa-mar e na preia-mar era esperada, pois o nível de água varia cerca de 3 m entre as duas situações, em valores de protótipo, o que leva a que a estrutura seja muito mais facilmente galgável durante a preia-mar.

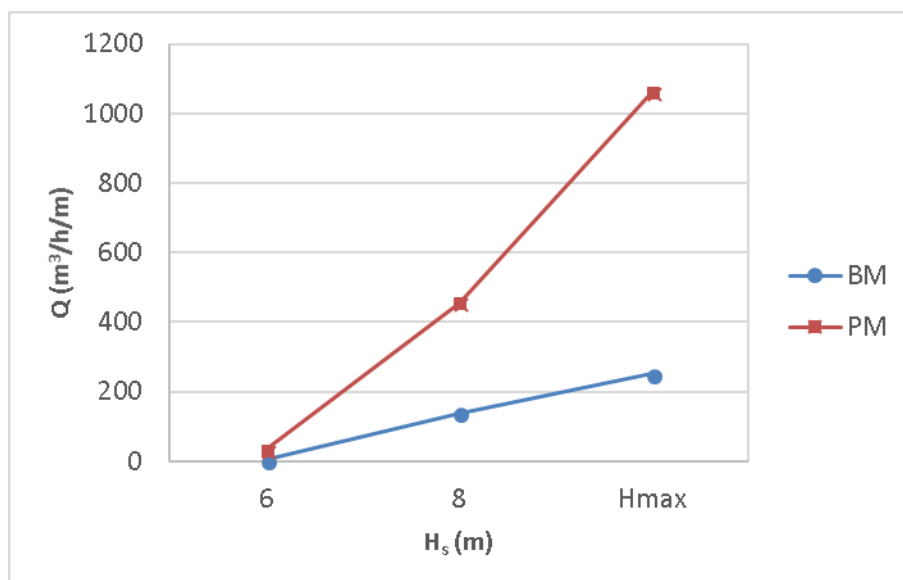


Figura 102 – Caudal médio de galgamento da estrutura por metro de desenvolvimento da estrutura ( $m^3/h/m$ ) na Série 1.

#### 4.5.2.2. Série 3

A Tabela 30 apresenta os caudais médios de galgamento determinados para os testes da Série 3, em valores de protótipo.

Tabela 30 – Caudais de galgamento da estrutura na Série 3.

$H_s$ teórica (m)	$H_s$ real (m)	$H_s$ próxima do quebramar (m)	$T_P$ (s)	Nível da água	Caudal de galgamento por metro ( $m^3/h/m$ )
6	5.9	6.9	13	BM	26
8	7.8	8.9	16	BM	68
9.5	8.8	8.7	18	BM	105
6	5.9	6.8	13	PM	9
8	8.2	8.8	16	PM	165
11	9.8	10.0	16	PM	325

A Figura 103 apresenta os caudais de galgamento por metro de desenvolvimento da estrutura durante a Série 3, em função da altura de onda significativa incidente teórica.

Na Figura 103 observa-se o mesmo que na Série 1, i.e., o caudal de galgamento cresce com a altura de onda significativa, fenómeno mais acentuado na preia-mar do que na baixa-mar. Da mesma forma, a diferença de galgamento entre a baixa-mar e a preia-mar mantém-se.

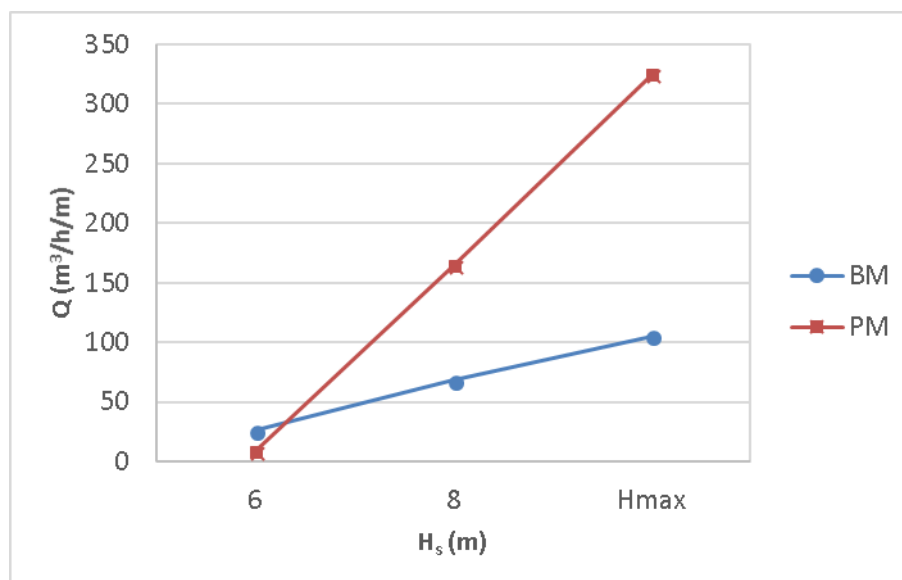


Figura 103 – Caudal médio de galgamento da estrutura por metro de desenvolvimento da estrutura (m³/h/m) na Série 3.

#### 4.5.2.3. Comparação das duas situações

Foram observados galgamentos da estrutura do quebramar para ambas as soluções, ou seja, com e sem o dispositivo de aproveitamento da energia das ondas. No entanto, comparar-se-á agora os caudais estimados para as duas situações. A Figura 104 e a Figura 105 apresentam os caudais de galgamento para a Série 1, a azul, e para a Série 3, a vermelho, respetivamente para os níveis de baixa-mar e preia-mar.

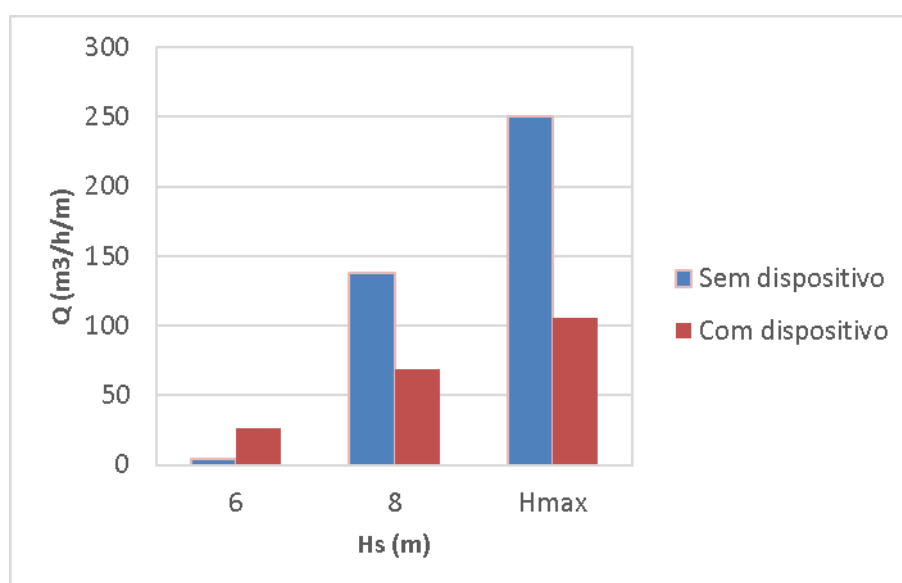


Figura 104 – Comparação dos caudais médios de galgamento da estrutura na baixa-mar (m³/h/m) na Série 1 e na Série 3.

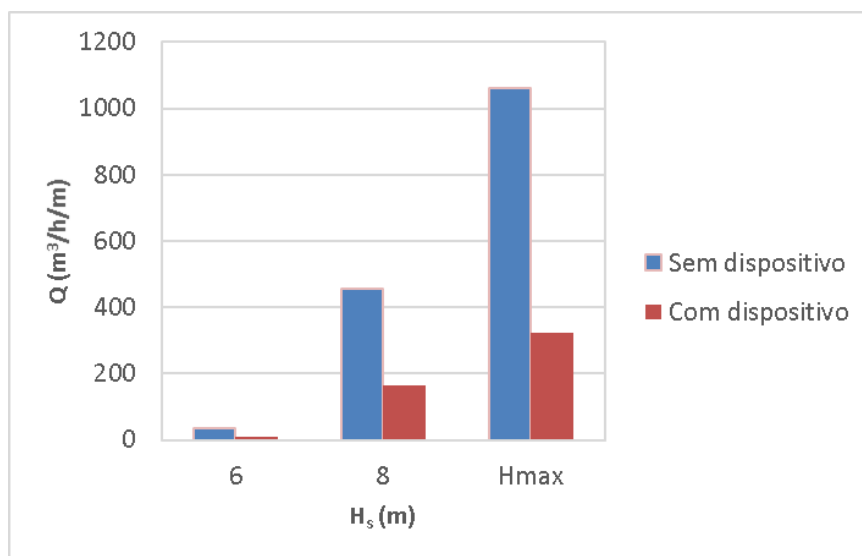


Figura 105 – Comparação dos caudais médios de galgamento da estrutura na preia-mar ( $m^3/h/m$ ) na Série 1 e na Série 3.

A Figura 104 e a Figura 105 mostram que a aplicação do dispositivo de aproveitamento da energia das ondas no quebramar conduz a uma redução significativa do caudal de galgamento, nomeadamente para a situação de preia-mar. A Tabela 31 sintetiza os resultados obtidos apresentando a redução do caudal decorrente da introdução do dispositivo de aproveitamento da energia das ondas, para as mesmas condições de agitação.

Tabela 31 – Redução do caudal médio de galgamento pela introdução do dispositivo de aproveitamento da energia das ondas.

Nível de água	$H_s=6m$	$H_s=8m$	$H_s=H_{max}$
BM	-550%	51%	58%
PM	74%	64%	69%

Note-se que os valores obtidos para  $H_s = 6 m$  são pouco representativos, pois o caudal de galgamento era muito pequeno para os dois níveis de água, principalmente para a baixa-mar, daí os valores obtidos serem diferentes do expectável. Excluindo os valores para  $H_s = 6 m$ , verifica-se uma redução média do caudal de galgamento de 61% devido à introdução do dispositivo de aproveitamento da energia das ondas.

Importa salientar que durante os ensaios se observou que, para o nível de baixa-mar, a parede vertical na entrada da CAO funcionava como um quebramar vertical, e condicionava muito o galgamento da estrutura. Para a altura de onda  $H_s = H_{max}$ , a parede vertical no topo do dispositivo funcionava da mesma forma. Para o nível de preia-mar apenas a parede no topo do dispositivo tinha este efeito de quebramar vertical.

Em suma, a introdução do dispositivo de aproveitamento da energia das ondas no quebramar resulta numa redução significativa do caudal de galgamento da estrutura. De notar que apenas foi medido o caudal de galgamento do dispositivo em si durante a Série 3, e não o caudal que galgava a estrutura na zona lateral ao dispositivo (quebramar de taludes). Assim, os valores obtidos representam apenas a zona

onde é introduzido o dispositivo, e não foi avaliado o impacto do dispositivo no galgamento pelas zonas laterais a este. Durante os ensaios observaram-se impactos muito fortes da onda contra o dispositivo, nomeadamente nas paredes verticais referidas. Considera-se que, para a parede no topo do dispositivo, isso poderia ser acautelado com a introdução duma parede com curvatura, em forma de defletor, que não só poderia reduzir as forças de impacto das ondas, mas também reduzir ainda mais os caudais de galgamento.

#### 4.5.3. DESEMPENHO DO DISPOSITIVO

##### 4.5.3.1. Série 2

Na Série 2 de ensaios utilizaram-se ondas regulares de forma a estudar qual o efeito do período e da altura de onda no comportamento do dispositivo, tendo sido feita uma comparação entre as três geometrias estudadas de forma a ser escolhida uma. Como a energia potencial capturada varia entre os reservatórios, devido à sua diferença de cotas, apenas a comparação dos caudais de galgamento dos reservatórios não seria suficiente para comparação. Consequentemente, será estudada a potência capturada à entrada dos reservatórios pela componente de galgamento do dispositivo de aproveitamento da energia das ondas por metro de desenvolvimento, utilizando a equação (5). A potência total será a soma da potência capturada pelos quatro reservatórios. Nesta série de testes não serão feitas estimativas de produção energética, pois ondas perfeitamente regulares não existem na Natureza, e os valores obtidos seriam pouco representativos da produção energética real.

Inicialmente, foram realizados ensaios em que a altura de onda foi mantida constante, com  $H = 1\text{ m}$ , e o período  $T$  variou entre 6 e 14 s, para as três geometrias. A matriz de ensaios teórica é a apresentada na Tabela 21.

A Figura 106 apresenta a potência total capturada pela componente de galgamento do dispositivo para as três geometrias, em função do período de onda  $T$ .

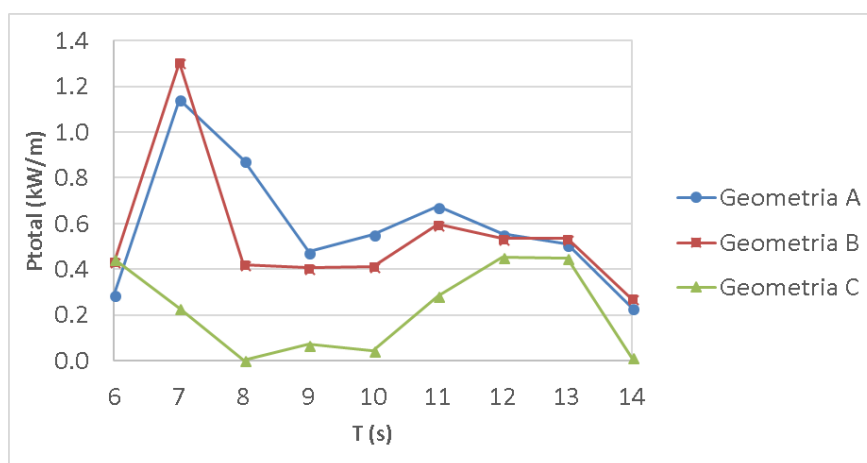


Figura 106 – Potência capturada para as três geometrias para  $H = 1\text{ m}$  em função de  $T$ .

Na Figura 106 observa-se que as geometrias A e B têm um comportamento muito semelhante, variando a potência média total absorvida da mesma forma com o período de onda. A geometria C apresenta um comportamento diferente da A e da B, sendo a potência absorvida menor para os períodos testados.

As geometrias A e B apresentam um pico de potência para o período de 7 s, sendo que para os restantes períodos a potência se mantém muito estável. Este pico pode ser devido à existência de interferência construtiva das ondas para este período, embora fosse previsível que o mesmo acontecesse para o período de 14 s, pois este é um múltiplo de 7.

A geometria C não apresenta picos de potência absorvida, embora tenha um comportamento pouco regular, sendo a potência absorvida quase nula para os períodos de 8, 9 e 10 s.

Seria expectável que os períodos mais baixos apresentassem maiores potências, pois a frequência das ondas é mais elevada, havendo assim mais ondas espraçadas na estrutura, e, conseqüentemente, o caudal deveria ser maior (Oliveira, 2014). No entanto, isso só acontece para  $T = 7$  s nas geometrias A e B. A análise das alturas de onda efetivamente geradas pelo sistema de geração mostrou que houve um aumento destas para os períodos maiores, podendo justificar a potência sensivelmente linear ao longo dos períodos testados. A Tabela 32 apresenta a altura de onda efetivamente gerada pelo sistema, calculada após o tratamento dos dados de forma a não ser considerada a onda refletida.

Tabela 32 – Altura de onda gerada real na Série 2.

H teórico (m)	H real (m)	T (s)	Geometria
1	1.00	6	A
1	1.18	7	A
1	1.16	8	A
1	1.29	9	A
1	1.16	10	A
1	1.39	11	A
1	1.38	12	A
1	1.33	13	A
1	1.09	14	A
1	1.02	6	B
1	1.21	7	B
1	1.15	8	B
1	1.28	9	B
1	1.17	10	B
1	1.39	11	B
1	1.39	12	B
1	1.34	13	B
1	1.09	14	B
1	1.13	6	C
1	1.30	7	C
1	1.13	8	C
1	1.28	9	C
1	1.17	10	C
1	1.44	11	C
1	1.41	12	C
1	1.35	13	C
1	1.09	14	C

Os resultados mostraram um melhor desempenho das geometrias A e B em relação à geometria C. Tendo a geometria C sido a última a ser ensaiada, o seu desempenho inferior pode, em parte, dever-se a constrangimentos adicionais no escoamento do caudal entre os reservatórios do dispositivo SSG e os correspondentes reservatórios auxiliares. A Figura 107 apresenta a potência média total capturada para as três geometrias para os ensaios da Tabela 21. Pode-se concluir que as geometrias A e B têm um desempenho semelhante, com uma potência capturada muito superior à geometria C. A potência capturada pela geometria A é cerca de 2.7 vezes superior àquela capturada pela geometria C, e a potência capturada pela geometria B é cerca de 2.5 vezes superior àquela capturada pela geometria C.

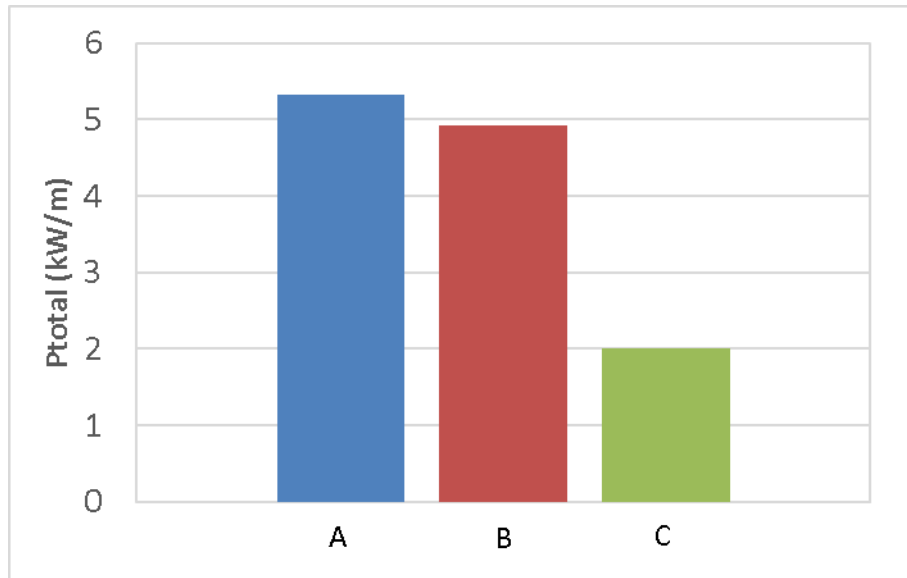


Figura 107 – Comparação da potência média total capturada por metro de desenvolvimento do dispositivo para as geometrias A, B e C.

A componente de coluna de água oscilante será avaliada a partir da oscilação do nível da superfície livre da água durante os testes, e da amplitude da pressão medida à saída da câmara. O Anexo E apresenta a variação do nível da superfície livre da água para todos os períodos testados, e a Figura 108 para  $T = 6$  s, como exemplo.

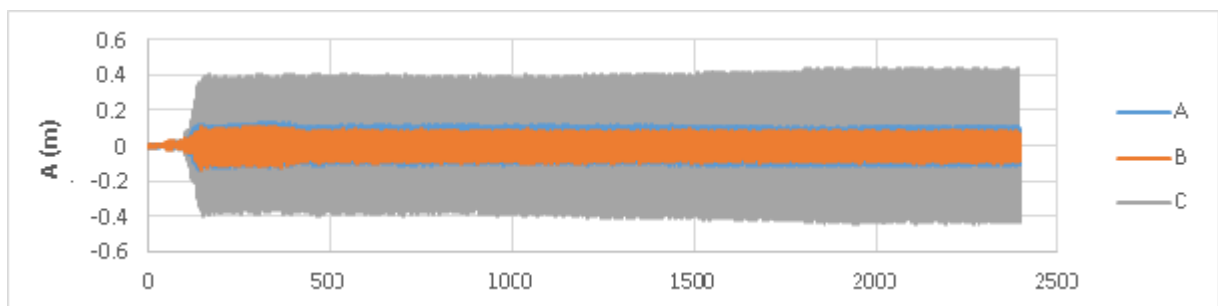


Figura 108 – Amplitude de variação do nível da superfície livre da água dentro da câmara para  $T=6$ s.

O Anexo E mostra uma amplitude consideravelmente maior para a geometria C nos ensaios com um período de onda baixo, enquanto as geometrias A e B se mantêm muito próximas. Com o aumento do período, a amplitude observada para as geometrias A e B vai aumentando, até que para o período de 12 s estas apresentam uma amplitude superior à geometria C. No entanto, as amplitudes mantêm-se muito próximas para as três geometrias a partir do período de 12 s. A variação da amplitude para todas as geometrias ao longo do ensaio deve-se à diminuição da abertura da saída da câmara, tendo sido testadas oito aberturas diferentes.

A Figura 109 mostra a amplitude média da variação da pressão em função da abertura da saída da câmara para a geometria A, a Figura 110 para a geometria B e a Figura 111 para a geometria C.

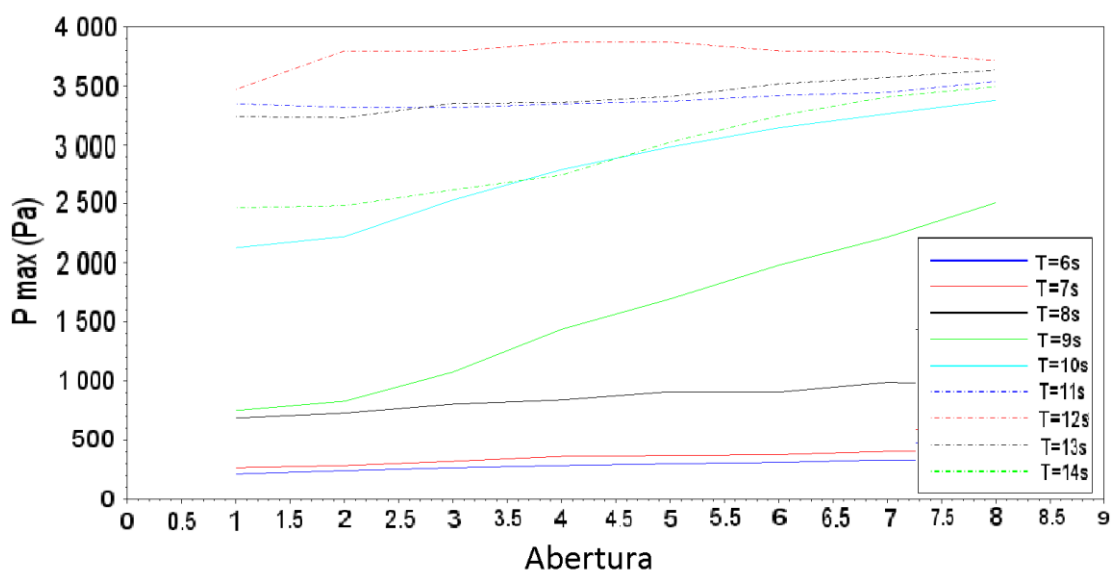


Figura 109 – Amplitude da variação da pressão média para a geometria A.

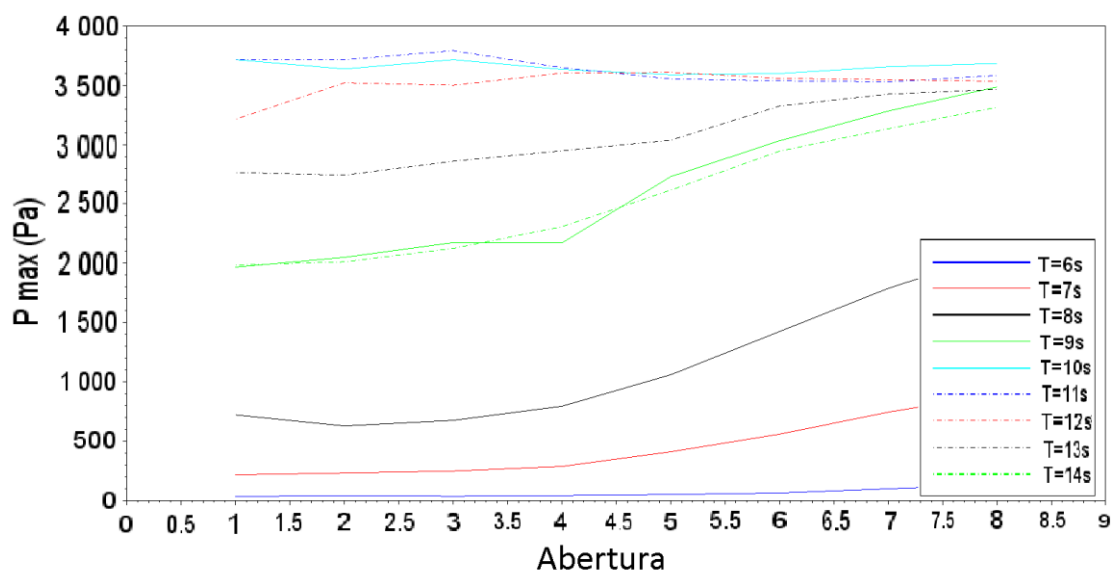


Figura 110 – Amplitude da variação da pressão média para a geometria B.



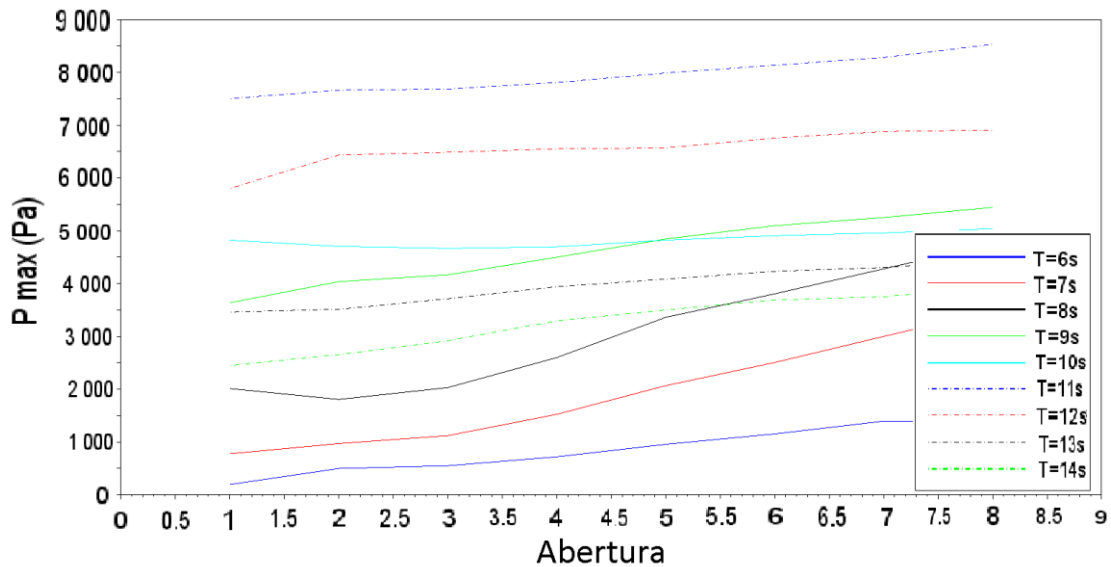


Figura 111 – Amplitude da variação da pressão média para a geometria C.

Observa-se o mesmo comportamento para as três geometrias: um aumento da pressão com o aumento do período de onda, e um ligeiro aumento da amplitude com o aumento da abertura. No entanto, a geometria C apresenta amplitudes consideravelmente maiores, cerca de duas vezes superiores às das geometrias A e B.

Em suma, a geometria C apresenta resultados superiores para a CAO para os períodos mais frequentes (até 12 s), e resultados muito semelhantes às geometrias A e B para períodos maiores e menos frequentes. As geometrias A e B têm um comportamento muito semelhante.

De seguida, foi testada a influência da altura da onda no desempenho do dispositivo, variando a altura de onda entre 2 e 3 m, para períodos entre 9 e 12 s. Para o período ressonante de cada geometria, foi também testada uma altura de onda de 4 m. Os resultados dos ensaios apresentados na Tabela 22 serão apresentados em conjunto de forma a simplificar o estudo.

A Figura 112 mostra a variação das potências médias obtidas pelo dispositivo de galgamento em função da altura de onda, para os diferentes períodos de onda.

Para os quatro períodos testados, observa-se o mesmo comportamento. A potência média capturada aumenta ligeiramente quando a altura de onda passa de 1 para 2 m, e aumenta consideravelmente mais quando a altura passa de 2 para 3 m.

A Figura 113 mostra a variação das potências médias obtidas em função da altura de onda para o período ressonante da coluna de água oscilante de cada geometria, pois foi testada mais uma altura de onda (4 m). O período ressonante das geometrias A e B foi estimado em 12 s e o da geometria C em 11 s. A potência capturada quando a altura de onda passa de 3 para 4 m aumenta, sensivelmente, da mesma forma que quando a altura de onda passa de 2 para 3 m. Este comportamento sugere uma correlação linear entre a altura de onda e a potência média capturada.

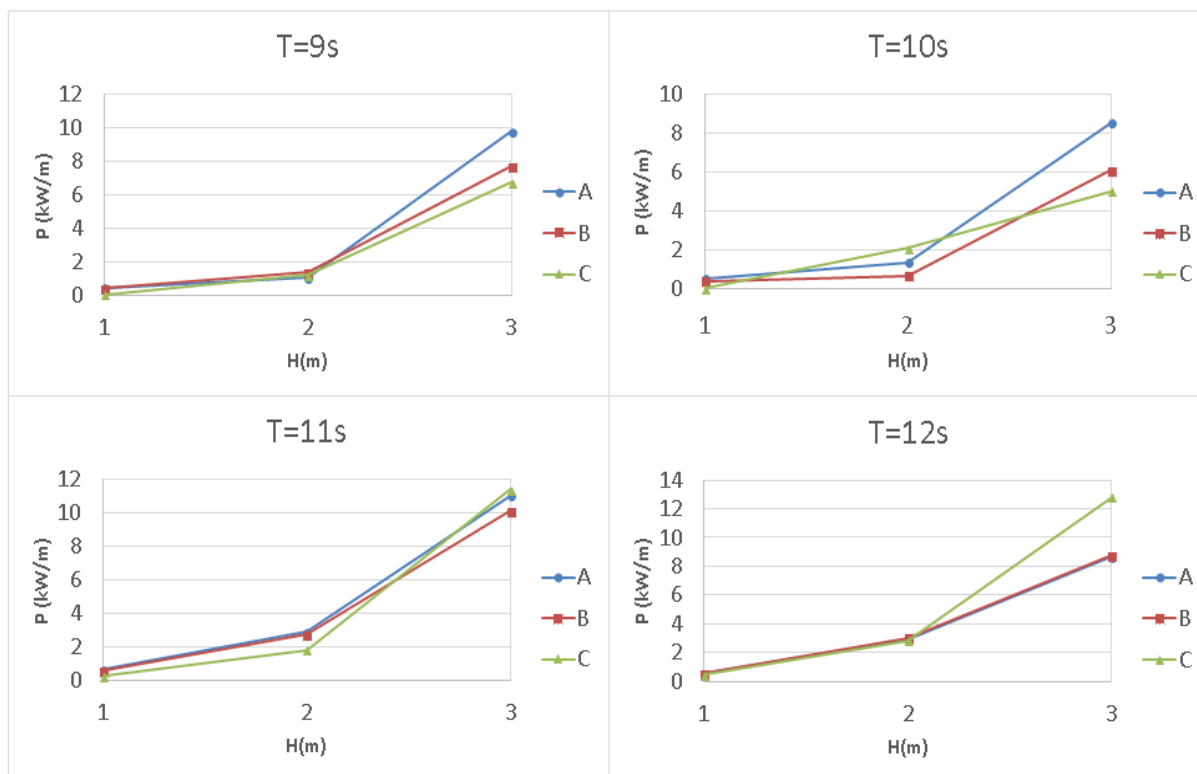


Figura 112 – Potência capturada para as três geometrias em função de  $H$ .

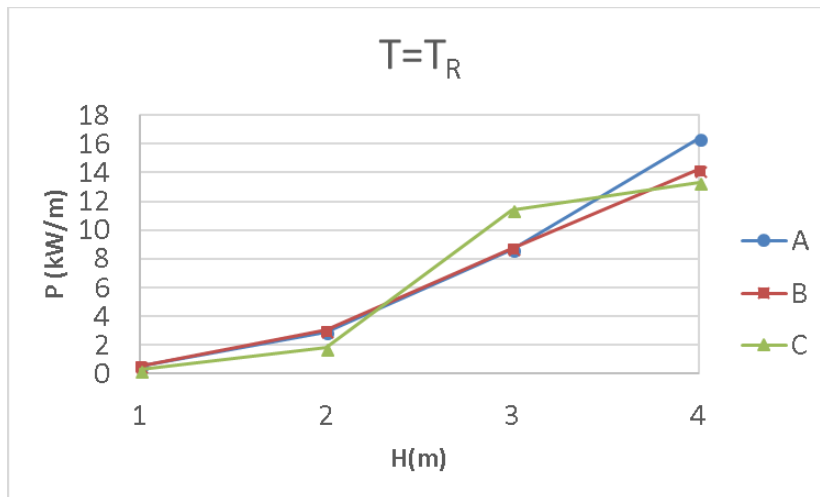


Figura 113 – Potência capturada para as três geometrias em função de  $H$ , para o período ressonante.

A Figura 114 compara a potência média total capturada para os ensaios da Tabela 22 e da Tabela 23, para cada geometria. Observa-se um desempenho muito semelhante entre as três geometrias, com a geometria A a apresentar o melhor desempenho, seguida da geometria C e a geometria B com o pior desempenho. Não obstante, as diferenças são muito reduzidas, sem que nenhuma se evidencie. A potência capturada pela geometria A é cerca de 9 % superior àquela capturada pela geometria C, e a potência capturada pela geometria C é cerca de 5 % superior àquela capturada pela geometria B.

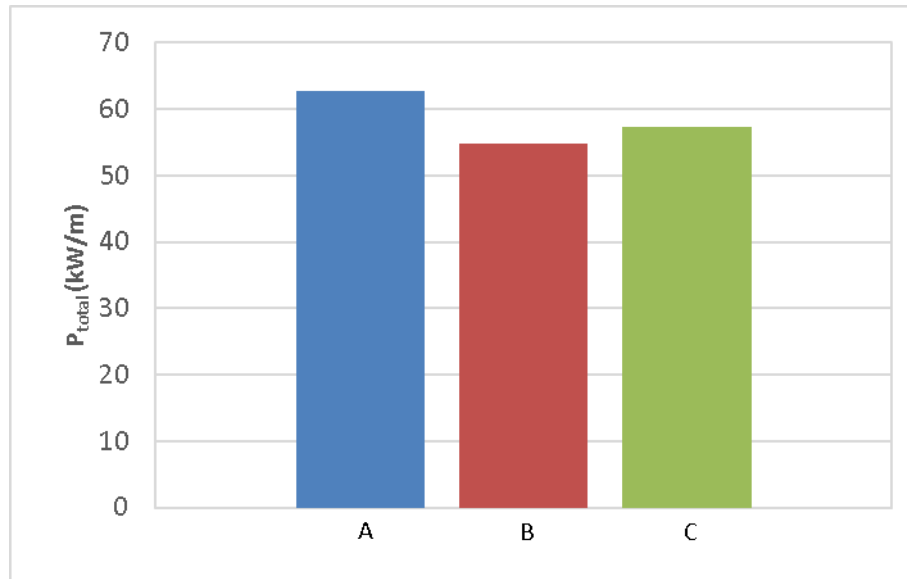


Figura 114 – Comparação da potência total capturada por metro de desenvolvimento para as geometrias A, B e C.

A Figura 115 mostra, para o período ressonante, a amplitude de variação do nível da superfície livre da água dentro da câmara da coluna de água oscilante para  $H = 2\text{ m}$ , a Figura 116 para  $H = 3\text{ m}$  e a Figura 117 para  $H = 4\text{ m}$ . Observa-se uma amplitude próxima para as três geometrias testadas, embora a geometria A apresente uma amplitude um pouco maior do que a geometria B, e a geometria B do que a geometria C, para as três alturas de onda.

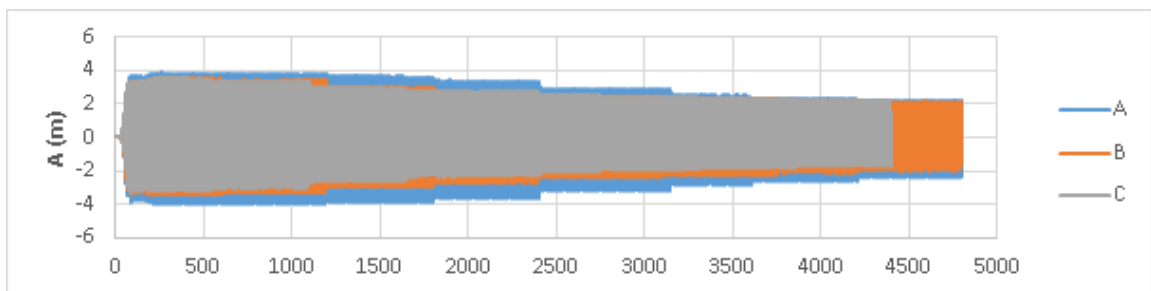


Figura 115 – Amplitude de variação do nível da superfície livre da água dentro da câmara para  $H = 2\text{ m}$ .

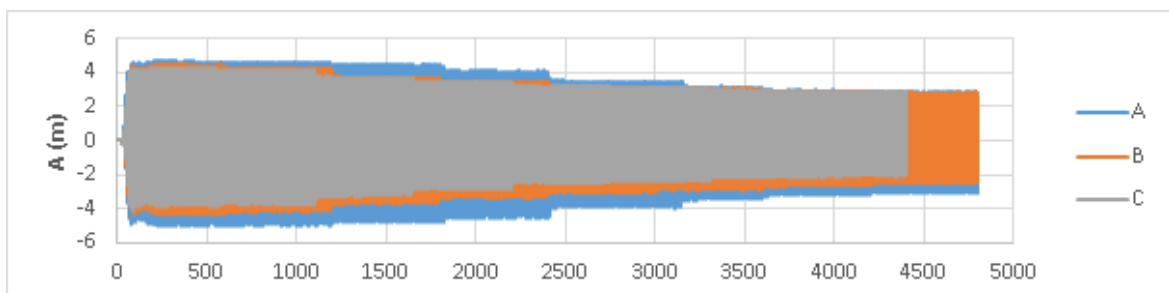


Figura 116 – Amplitude de variação do nível da superfície livre da água dentro da câmara para  $H = 3\text{ m}$ .

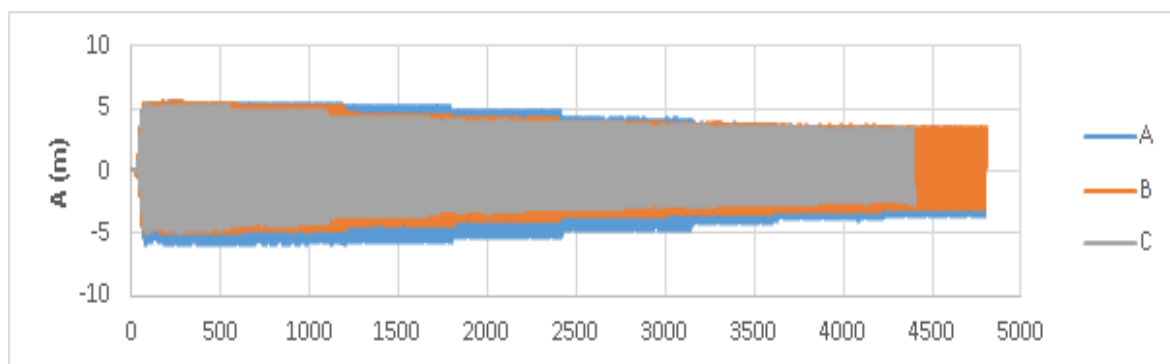


Figura 117 – Amplitude de variação do nível da superfície livre da água dentro da câmara para  $H = 4$  m.

Em suma, a Série 2 permitiu concluir o seguinte para a componente de galgamento do dispositivo:

- As geometrias A e B apresentam um desempenho semelhante, e cerca de 2.6 vezes superior à geometria C, para uma altura de onda de 1 m e período de onda a variar entre 6 e 14 s;
- Para alturas de onda entre 2 e 3 m, e período de onda a variar entre 9 e 12 s, o desempenho é semelhante para as três geometrias, tendo a geometria A um desempenho ligeiramente superior à geometria C, e a geometria C à geometria B.

Para a componente de coluna de água oscilante do dispositivo conclui-se o seguinte:

- A variação do nível da superfície livre da água dentro da CAO é muito superior para a geometria C para períodos de onda baixos, até ao período de 12 s. Para períodos de onda entre 12 e 14 s, as três geometrias apresentam uma variação semelhante. Para todas as geometrias, a variação aumenta com o período;
- A amplitude de variação da pressão à saída da câmara da CAO aumenta com o período para as três geometrias. A geometria C apresenta amplitudes cerca de duas vezes superiores às das geometrias A e B. As geometrias A e B apresentam amplitudes muito semelhantes;
- Para alturas de onda entre 2 e 3 m e períodos de onda a variar entre 9 e 12 s, a variação do nível da superfície livre da água dentro da CAO é semelhante entre as três geometrias, tendo a geometria A uma variação superior à da geometria C, e a geometria C à da geometria B.

#### 4.5.3.2. Série 2W

Na Série 2W utilizaram-se ondas irregulares, que são as que mais se aproximam daquilo que acontece na Natureza. Consequentemente, os resultados obtidos nesta série de ensaios serão os mais representativos do desempenho do dispositivo, e permitirão fazer uma avaliação da eficiência hidráulica e uma estimativa da energia produzida por este. As alturas de onda significativas calculadas são ligeiramente diferentes das teóricas, e por isso todos os resultados apresentados foram calculados com as alturas de onda significativas efetivamente geradas. A eficiência hidráulica será calculada pela equação (7) e as restantes eficiências serão consideradas iguais àquelas estimadas por Margheritini (2009). Apenas a componente de galgamento do dispositivo de aproveitamento da energia das ondas será avaliada.

A Figura 118 apresenta a potência média capturada por cada reservatório para todos os ensaios da Série 2W.

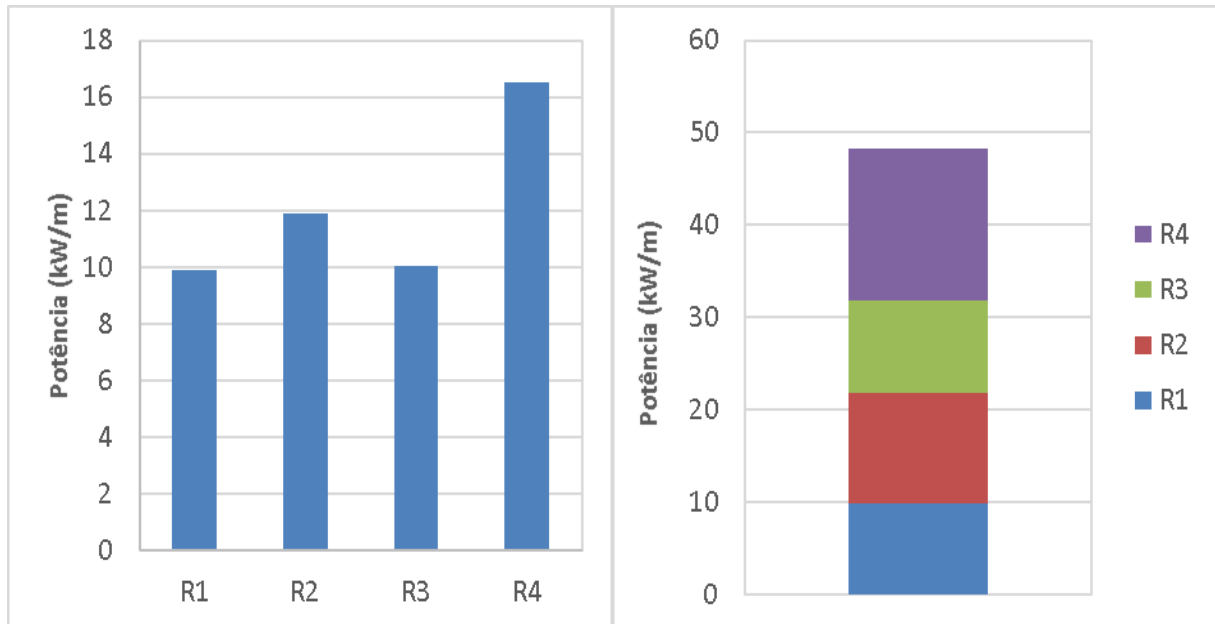


Figura 118 – Potência média capturada pelos reservatórios para todos os ensaios da Série 2W.

Os resultados da Figura 118 mostram que o reservatório 4, o mais elevado, é aquele que captura uma maior potência à entrada do reservatório, enquanto o reservatório 1, o mais baixo, é aquele que captura uma menor potência. Não obstante, as condições de agitação marítima que levam a galgamentos para o reservatório 4 têm uma probabilidade de ocorrência pequena, enquanto que para os reservatórios mais baixos a probabilidade é maior.

Assim, optou-se por ponderar as potências capturadas pela probabilidade de ocorrência de cada um dos 22 estados do mar testados na Série 2W. Como nem todos os estados do mar considerados na Tabela 24 foram testados, foi necessário distribuir ponderadamente as probabilidades de ocorrência dos estados que não foram ensaiados por aqueles que foram. Tendo em conta a Tabela 7, considerou-se de forma simplificada que os níveis de baixa-mar e preia-mar correspondem, respetivamente, aos três primeiros e aos três últimos intervalos de maré. O nível médio corresponde aos três intervalos centrais. A probabilidade de ocorrência de cada nível de maré considerada foi de 24.8 %, 58.0 % e 17.2 %, respetivamente para a baixa-mar, nível médio e preia-mar. Estes valores correspondem à soma da probabilidade de ocorrência dos três intervalos de maré que caracterizam cada um dos três níveis de maré, baixa-mar, preia-mar e nível médio. A cada estado do mar foi atribuída uma probabilidade de ocorrência em função da altura de onda significativa, período de pico e nível de água. A Figura 119 mostra a potência capturada por cada reservatório para todos os ensaios da Série 2W ponderada pelas respetivas probabilidades de ocorrência.

A Figura 119 mostra que o primeiro reservatório é aquele que tem maior potencial de captura, pois embora a queda seja menor, os estados do mar que têm maior probabilidade de ocorrência são aqueles com pequenas alturas de onda significativas.

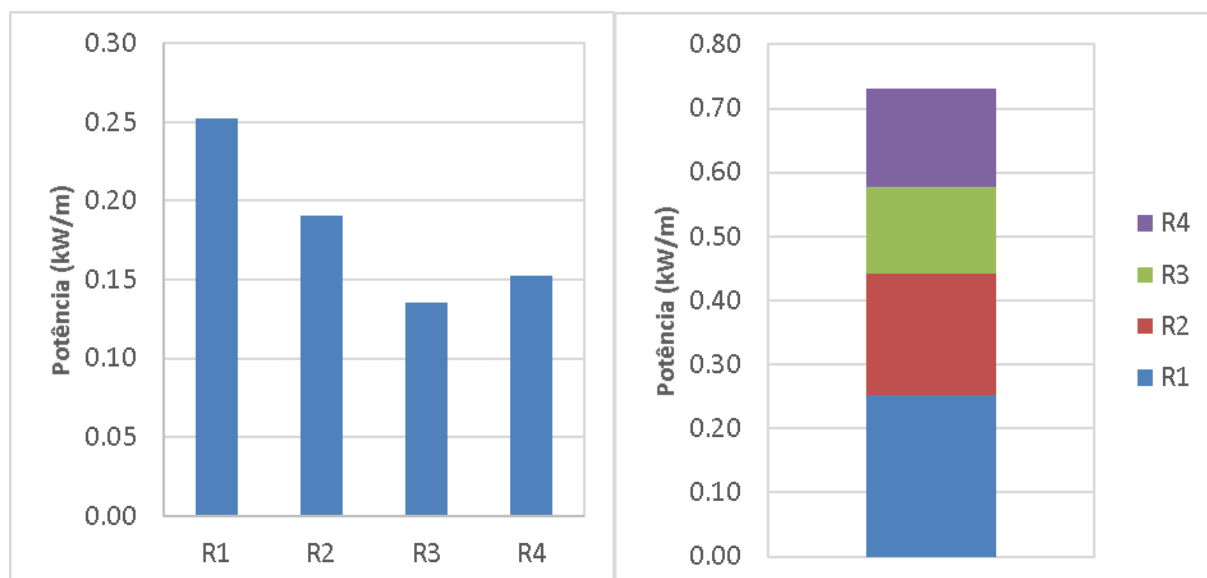


Figura 119 – Potência capturada pelos reservatórios para todos os ensaios da Série 2W ponderada pelas respectivas probabilidades de ocorrência.

Finalmente, a Figura 120 apresenta a eficiência hidráulica do dispositivo para os quatro estados de mar ensaiados com o nível correspondente à baixa-mar e à preia-mar. Por motivos de comparação, para o nível correspondente ao nível médio, apenas foram considerados os mesmos quatro estados de mar. Analisando a Figura 120, pode-se concluir que estados de mar com alturas de onda significativas elevadas apresentam, de uma forma geral, uma eficiência hidráulica superior. Para o nível de preia-mar há um ligeiro decaimento da eficiência para as alturas de onda significativas maiores, que pode ser explicado pela diminuição da queda disponível. Observa-se ainda que a eficiência hidráulica é, de uma forma geral, superior para o nível médio do que para os níveis de baixa-mar e preia-mar.

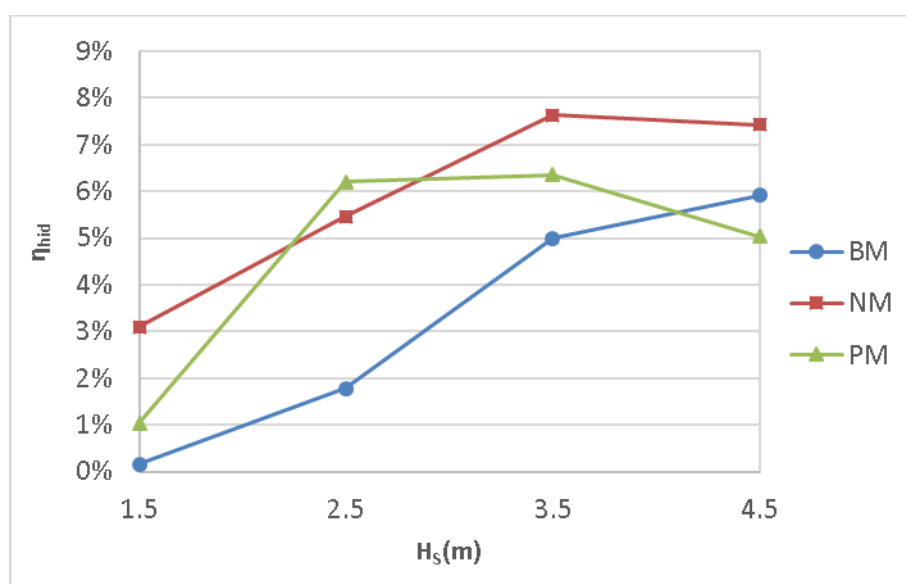


Figura 120 – Eficiência hidráulica global do dispositivo em função da altura de onda significativa  $H_s$ .

Considerando todos os estados de mar ensaiados, aos quais foram afetadas as respectivas probabilidades de ocorrência em função da altura de onda significativa, do período de pico e do nível de maré que os caracterizam, a eficiência hidráulica global do dispositivo foi de 4.2 %.

Finalmente, a produção energética foi estimada utilizando as eficiências propostas por Margheritini (2009). Estas são as seguintes:

- Das cristas dos reservatórios para os reservatórios – 75 %;
- Na passagem pelas turbinas – 98 %;
- No gerador elétrico e no equipamento elétrico – 95 %.

A energia produzida por metro de desenvolvimento do dispositivo num ano seria de 4.5 MWh/ano/m. Para o dispositivo estudado, com 20 m de largura, a produção energética anual estima-se em cerca de 89.4 MWh/ano.

Estes resultados encontram-se muito aquém daqueles que foram obtidos pelas simulações numéricas efetuadas no capítulo 3, em que a eficiência hidráulica era de 28.5 % e a energia produzida cerca de 500 MWh/ano, o que corresponde a uma diminuição da energia produzida de cerca de 82 % entre a simulação numérica e a simulação em modelo físico. Comparando com os resultados obtidos por outros autores, a energia produzida estimada é muito baixa. Para os ensaios feitos com um dispositivo SSG com três reservatórios, e para condições de agitação marítima semelhantes, Oliveira (2014) obteve uma produção energética de 10.5 MWh/ano/m.

Considera-se que esta redução de eficiência e de energia produzida tão acentuada se deve a erros de construção do modelo físico do dispositivo. Nomeadamente, observou-se durante os ensaios que a capacidade de vazão dos reservatórios era muito inferior ao caudal de galgamento, e, conseqüentemente, havia uma parte do caudal que não era contabilizado, pois os reservatórios encontravam-se sempre cheios. O gráfico apresentado na Figura 95 mostra um aumento linear do nível da água no reservatório, enquanto que seria previsível que houvesse “degraus” no gráfico, correspondentes à chegada das ondas ao dispositivo. Este comportamento verificou-se para a maioria dos ensaios em todos os reservatórios. Observou-se ainda que os reservatórios nunca ficavam totalmente vazios, mesmo passadas várias horas sem serem realizados ensaios. Esta ineficácia para contabilizar todo o caudal de galgamento pode ser explicada pelo seguinte:

- Diâmetro das condutas de ligação dos reservatórios principais aos reservatórios auxiliares demasiado pequeno;
- Lajes dos reservatórios desniveladas, retirando-lhes capacidade de armazenamento;
- Um volume de ar que fica capturado dentro dos reservatórios, nomeadamente para condições de agitação marítima mais energéticas, retirando-lhes capacidade de armazenamento e impedindo a entrada de água. Este efeito pode dever-se ao facto de os reservatórios ficarem completamente cheios;
- A abertura dos reservatórios no modelo era inferior àquela idealizada, devido a erros de construção, o que levou a uma redução do caudal que entra nos reservatórios.





# 5

## SÍNTESE E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 5.1. SÍNTESE

O presente trabalho integra-se no projeto *SE@PORTS* e apresenta uma avaliação do desempenho de sistemas híbridos de aproveitamento da energia das ondas instalados em quebramares portuários. O objetivo foi desenvolver e otimizar um dispositivo híbrido para um dos casos de estudo do projeto: o quebramar Norte do porto de Leixões. Após um estudo e uma caracterização das tecnologias existentes, foram selecionadas duas, a coluna de água oscilante (CAO) e o *Seawave Slot-cone Generator* (SSG), para constituírem o sistema híbrido a estudar. A tecnologia de CAO encontra-se já bem desenvolvida, com vários protótipos em funcionamento, existindo mesmo uma aplicação comercial de uma CAO num quebramar portuário, em Mutriku, Espanha (Torre-Enciso *et al.*, 2009). No entanto, até ao momento, ainda não foi construído nenhum dispositivo que utilize exatamente a tecnologia SSG, com vários reservatórios sobrepostos, embora tenham sido feitos estudos de viabilidade para alguns locais na Europa. As duas tecnologias apresentaram um bom desempenho e mostraram-se adequadas à aplicação em quebramares portuários, razões pelas quais foram selecionadas. No entanto, não existe à data desta dissertação nenhum estudo que avalie o desempenho dum sistema híbrido que utilize as duas, o que por si só denota o caráter inovador deste trabalho.

O local considerado neste estudo para a aplicação do sistema de aproveitamento da energia das ondas foi o porto de Leixões, situado no Norte de Portugal, e sujeito a condições de agitação marítima severas. Este caso de estudo é interessante, pois está prevista a construção dum prolongamento de 300 m do quebramar Norte do porto, onde poderá vir a ser aplicado o dispositivo de aproveitamento da energia das ondas. Nesta dissertação começou-se por caracterizar o regime de agitação marítima próximo do local de construção do prolongamento do quebramar, de forma a otimizar o dispositivo para as condições locais. Foi feito um pré-dimensionamento do sistema híbrido, conjugando as duas tecnologias num só dispositivo, e de seguida realizou-se uma otimização da componente SSG. Inicialmente, elaborou-se um estudo numérico, utilizando o *software* WOPSim, com o objetivo de definir as dimensões principais do SSG, de forma a maximizar a potência média absorvida. Também se efetuou um pré-dimensionamento de turbinas para serem utilizadas no dispositivo, adequadas às quedas e aos caudais calculados. Após o processo de otimização numérica, passou-se ao estudo do dispositivo em modelo físico.

O modelo do dispositivo foi construído à escala 1:50 e estudado no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Foi também reproduzida a solução escolhida para o prolongamento do quebramar Norte do porto de Leixões, em quebramar de taludes. Este trabalho experimental teve como

objetivo estudar o efeito da aplicação do dispositivo no quebramar, escolher uma geometria de entre três consideradas viáveis e estudar em detalhe o desempenho do dispositivo para a melhor geometria. Para isso, avaliou-se o comportamento estrutural e o caudal de galgamento da estrutura, compararam-se as três soluções, calculou-se a eficiência hidráulica do dispositivo de galgamento, avaliaram-se as oscilações da superfície livre da água dentro da CAO e mediu-se a pressão à saída da câmara da CAO. Foram realizados ensaios com ondas regulares e irregulares, utilizando o espectro de JONSWAP, e geradas condições de agitação marítima frequentes e extremas.

Os ensaios permitiram concluir que ambas as soluções, com e sem dispositivo de aproveitamento da energia das ondas, apresentam um comportamento estrutural adequado. Sem embargo, observou-se uma estabilidade da estrutura ligeiramente superior com o dispositivo aplicado, com menos e mais reduzidos deslocamentos de blocos do manto resistente e da risberma. No entanto, admite-se que esta melhoria se possa dever, em parte, ao efeito de parede inerente a um estudo a duas dimensões. Observou-se também uma redução muito significativa dos caudais de galgamento da estrutura com o dispositivo em relação à solução inicial, nomeadamente para alturas de onda significativas elevadas e para o nível de preia-mar. Não obstante, considera-se que este efeito tão acentuado se deve, em parte, à opção de interromper a rampa frontal do dispositivo, criando uma parede vertical que dificulta o espraiamento e impede a existência de galgamentos mais significativos.

Os ensaios com ondas regulares permitiram concluir que, para a componente de CAO e para alturas de onda e períodos reduzidos, a geometria do dispositivo em que a rampa frontal é interrompida imediatamente abaixo do último reservatório tem um desempenho muito superior comparativamente às geometrias em que a rampa se estende até cotas inferiores. Estas condições de agitação marítima são as mais frequentes no local em estudo. Para alturas de onda e períodos mais elevados, as três geometrias têm um comportamento muito semelhante.

Concluiu-se, também, que o desempenho da componente de galgamento (SSG) do dispositivo utilizando a geometria com a rampa frontal cortada imediatamente abaixo do último reservatório é inferior às outras geometrias para alturas de onda e períodos reduzidos. No entanto, as três geometrias apresentam um desempenho semelhante quando estes aumentam. Observou-se, ainda, que a potência capturada pela componente de galgamento do dispositivo aumenta sensivelmente de forma linear com a altura de onda, mas que a variação do período não conduz a variações significativas da potência média capturada.

O estudo do desempenho do dispositivo com ondas regulares levou a que fosse selecionada uma geometria que condicionava o desempenho da componente SSG do dispositivo. Esta escolha deveu-se ao bom desempenho da geometria para a componente de CAO, e às condicionantes do modelo que conduziram a uma subavaliação do desempenho da componente SSG do dispositivo. Sem embargo, foram quantificados os caudais de galgamento que ocorrem em cada reservatório para os ensaios com ondas irregulares. Desta forma, foi calculada a eficiência hidráulica e feita uma estimativa da produção energética.

Os ensaios com ondas irregulares, aquelas que mais se aproximam da realidade, revelaram que a eficiência hidráulica do dispositivo SSG aumenta ligeiramente com a altura de onda significativa. Estes ensaios mostraram, também, que a eficiência hidráulica é mais elevada para o nível médio do que para os níveis de baixa-mar e preia-mar. A eficiência hidráulica global da componente de galgamento do dispositivo, considerando os três níveis de maré e os diversos estados do mar, foi calculada em 4.2 %, e a produção energética estimada em cerca de 89.4 MWh/ano para um dispositivo com 20 m de largura.

O estudo realizado nesta dissertação levou à definição duma geometria otimizada para a componente de galgamento do dispositivo de aproveitamento da energia das ondas híbrido em estudo para o porto de Leixões. A eficiência e a estimativa de produção de energia elétrica estimadas numericamente

revelaram-se encorajadoras, tendo sido atingida uma eficiência global de 20.9 % e estimada uma produção energética de cerca de 500 MWh/ano para um dispositivo com 20 m de largura. No entanto, o estudo em modelo físico apresentou resultados muito aquém dos esperados, embora estes se devam, em parte, a limitações inerentes ao próprio modelo físico. A componente de CAO revelou um desempenho adequado, quer nas simulações numéricas, quer nos ensaios em modelo físico. Finalmente, pode-se concluir que o sistema de aproveitamento da energia das ondas híbrido conjugando as tecnologias de coluna de água oscilante e do *Seawave Slot-cone Generator* é viável. Não obstante, deverão ser feitos mais estudos em modelo físico que permitam avaliar com maior fiabilidade a eficiência conjunta do dispositivo e a produção energética total deste.

## **5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Com base no trabalho realizado, nas observações efetuadas e nos resultados que foram obtidos, apresentam-se algumas recomendações para desenvolvimentos futuros do sistema híbrido estudado. Estas recomendações resultam de aspetos que não foram considerados ou otimizados durante o estudo, e em opções que não se revelaram adequadas durante a modelação física. Para futuros estudos, considera-se necessário averiguar de forma mais aprofundada os seguintes aspetos:

- Devem ser estudadas com maior detalhe as turbinas hidráulicas a serem utilizadas na componente de galgamento do dispositivo, pois verificou-se que estas são preponderantes no seu desempenho, e estão ainda pouco estudadas;
- Devem ser calculadas e consideradas as perdas de energia que ocorrem no arranque e na paragem das turbinas, pois verificou-se que estas afetam consideravelmente o desempenho;
- Devem ser realizados estudos numéricos com códigos de CFD, validados com resultados experimentais, para a otimização do dispositivo híbrido e dos seus vários componentes;
- Devem ser estudadas as pressões a que o dispositivo está sujeito em condições de agitação marítima extremas, de forma a garantir a sua integridade estrutural;
- Devem ser realizados mais testes em modelo físico com ondas irregulares, pois são as que melhor representam as condições de agitação marítima reais;
- No final dos ensaios verificou-se uma grande acumulação de sedimentos dentro dos reservatórios da componente de galgamento do dispositivo e dentro da coluna de água oscilante. Embora a manutenção dos reservatórios tenha sido acautelada impondo uma altura mínima dentro destes, deve ser estudado o efeito dos sedimentos no funcionamento do dispositivo, para ambas as componentes;
- Na construção do modelo físico deve ser incorporada uma chaminé que permita a saída do ar que fica enclausurado dentro dos reservatórios, e deve ser estudada a importância deste efeito no protótipo; deve ainda ser obtida uma capacidade de vazão dos reservatórios superior, nomeadamente com a utilização de condutas rígidas de maior diâmetro, e devem ser rigorosamente respeitadas as dimensões de projeto durante a construção do modelo;
- Deve ser feito um estudo em modelo físico 3D que permita avaliar com maior rigor o efeito na estabilidade da estrutura decorrente da aplicação do dispositivo, e que permita estudar o efeito da variação do ângulo de incidência da agitação marítima no dispositivo;
- Finalmente, aconselha-se a elaboração duma estimativa dos custos para o equipamento e para a construção do dispositivo, pois a viabilidade económica e o preço da energia são fatores essenciais para a competitividade do dispositivo. No estudo económico deve ser considerada a construção de vários dispositivos lado a lado (construção modular), de forma a ser minimizado o custo de energia elétrica produzida (efeito de escala).



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akuo Energy (2018) – *NEMO – 10,7 MW*. (<http://www.akuoenergy.com/fr/nemo>). 29 de maio 2018.
- APDL (2018) – *Estatísticas*. (<https://www.apdl.pt/estatisticas/navios2>). 11 de junho 2018.
- Atlantis Resources Ltd (2018) – *MeyGen*. (<https://www.atlantisresourcesltd.com/projects/meygen>). 10 de junho 2018.
- Booij, N.; Haagsma, I.; Holthuijsen, L.H.; Kieftenburg, A.; Ris, R. C.; Van der Westhuysen, A. J.; Zijlema, M. (2006) – *SWAN Technical Documentation, Cycle III, version 40.51*. Delft, The Netherlands: Delft University of Technology.
- Borgarino, B.; Kofoed, J. P. (2007) – *Power Production from Integration of SSG in a Breakwater at Liseleje*. Aalborg: Department of Civil Engineering, Aalborg University. DCE Technical Report, No.36.
- Borgarino, B.; Kofoed, J. P.; Meinert, P. (2007) – *Development of a Generic Power Simulation Tool for Overtopping Based WEC*. Aalborg: Department of Civil Engineering, Aalborg University. DCE Technical Report, No.36.
- Bostek (2015) – *MS Fjordlys – 2015*. (<http://bostek.no/en/referanse/ms-fjordlys/>). 8 de junho 2018.
- Broglioli, D. (2009) – *Extracting Renewable Energy from a Salinity Difference Using a Capacitor*. Physical Review Letters, Vol.103, No.5, pp. 058501, doi:10.1103/PhysRevLett.103.058501.
- Arnett, J.; Schaffer, L.; Rumberg, J.; Tolbert, R. (1984) – *Design, installation and performance of the ARCO Solar one-megawatt power plant*. Photovoltaic Solar Energy Conference; Proceedings of the Fifth International Conference, Athens, Greece, October 17-21, 1983 (A85-11301 02-44). Dordrecht, D. Reidel Publishing Co., 1984, pp. 314-320.
- Chen, M.; Huang, L.; Yang, J.; Lyu, Y. (2017) – *Design and simulation of multi-energy hybrid power system based on wave and wind energy*. 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Sydney, NSW, 2017, pp. 1-6, doi:10.1109/ICEMS.2017.8056368.
- CIA (2016) – *The World Factbook*. (<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/>). 15 de fevereiro 2018.
- Cimate Innovation Window (2017) – *OBREC*. (<http://climateinnovationwindow.eu/innovations/obrec>). 8 de junho 2018.
- Correio da Manhã (2018) – *Obra no porto de Leixões está a gerar contestação*. (<https://www.cmjornal.pt/portugal/cidades/detalhe/obra-no-porto-de-leixoes-esta-a-gerar-contestacao>). 11 de junho 2018
- de la Parra, I.; Marcos, J.; Muñoz, M.; García, M. (2015) – *Comparison of control strategies for PV power ramp-rate limitation using energy storage*. Proceedings of the 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg.
- Designboom (2018) – *The world's largest floating solar plant starts producing power in Huainan, China*. (<https://www.designboom.com/technology/sungrow-floating-solar-plant-huainan-china-05-25-2017/>). 10 de junho 2018.
- Diário de Notícias (2018) – *Governo avança com ampliação da zona piloto para energias renováveis oceânicas*. (<https://www.dn.pt/lusa/interior/governo-avanca-com-ampliacao-da-zona-piloto-para-energias-renovaveis-oceanicas-9128771.html>). 27 de maio 2018.

Diendorfer, C.; Haider, M.; Lauermann, M. (2014) – *Performance Analysis of Offshore Solar Power Plants*. Energy Procedia, Vol. 49, pp.2462-2471. ISSN 1876-6102, doi:10.1016/j.egypro.2014.03.261.

École Nationale Supérieure de Paris (2018) – *L'usine marémotrice de la Rance*. (<http://www.geographie.ens.fr/La-situation-geographique.html?lang=fr>). 27 de maio 2018.

EDP (2018) – *Windfloat*. (<https://portugal.edp.com/pt-pt/historias/windfloat>). 26 de maio 2018.

Empresa de Eletricidade da Madeira (2015) – *A nossa história*. (<https://www.eem.pt/pt/conteudo/eem/quem-somos/a-nossa-historia/de-1974-a-1994/>). 26 de maio 2018.

Enerdata (2017) – *Enerdata Global Energy Statistical Yearbook 2017*. (<https://yearbook.enerdata.net/electricity/electricity-domestic-consumption-data.html>). 9 de fevereiro 2018.

Ente Vasco de la Energia (2017) – *Marine Energy*. ([www.eve.eus/Proyectos-energeticos/Proyectos/Energia-Marina.aspx?lang=en-GB](http://www.eve.eus/Proyectos-energeticos/Proyectos/Energia-Marina.aspx?lang=en-GB)). 9 de junho 2018.

Evans, D.; Falcão, A. F. O. (1986) – *Hydrodynamics of Ocean Wave-Energy Utilization*. International Union of Theoretical and Applied Mechanics Symposium, Lisbon, Portugal, 1985. ISBN 978-3-642-82668-9. Doi:10.1007/978-3-642-82666-5 [citado por Mustapa *et al.* (2017)].

Expresso (2016) – *Primeiro projeto eólico offshore em Portugal conclui fase de testes*. ([http://expresso.sapo.pt/economia/economia\\_energia/2016-06-02-Primeiro-projeto-eolico-offshore-em-Portugal-conclui-fase-de-testes#gs.kWkv4Ww](http://expresso.sapo.pt/economia/economia_energia/2016-06-02-Primeiro-projeto-eolico-offshore-em-Portugal-conclui-fase-de-testes#gs.kWkv4Ww)). 26 de maio 2018.

Falcão, A.; Gato, L.; Nunes, E. (2013a) – *A novel radial self-rectifying air turbine for use in wave energy converters*. Renewable Energy. Vol.50, pp.289-298, doi:10.1016/j.renene.2012.06.050.

Falcão, A.; Gato, L.; Nunes, E. (2013b) – *A novel radial self-rectifying air turbine for use in wave energy converters. Part 2. Results from model testing*. Renewable Energy. Vol.53, pp.159-164, doi:10.1016/j.renene.2012.11.018.

Falcão, A.; Henriques, J., Gato, L., Gomes, R. (2014) – *Air turbine choice and optimization for floating oscillating-water-column wave energy converter*. Ocean Engineering. Vol.75, pp.148-156, doi: 10.1016/j.oceaneng.2013.10.019.

Falcão, A.; Henriques, J. (2014) – *Model-prototype similarity of oscillating-water-column wave energy converters*. International Journal of Marine Energy, Vol.6, pp.18-34, ISSN 2214-1669, doi:10.1016/j.ijome.2014.05.002.

Fisheries and Oceans Canada (2018) – *Glossary*. (<http://www.tides.gc.ca/eng/info/glossary#T>). 27 de maio 2018.

Fortes, C. J.; Lemos, R.; Fortunato, A.; Capitão, R.; Pinheiro, L.; Neves, M.; Freire, P.; Oliveira, F.; Azevedo, A.; Lopes, H.; Tato, P.; Dias, E.; Luís, L. (2017) – *Estudos realizados com vista à melhoria das condições de segurança do acesso marítimo ao porto de Leixões*. 9<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária LNEC, Lisboa, Portugal 23 e 24 de novembro 2017.

Friedrich, D. (2016) – *Evaluation of the effect of flexible demand on the design and operation of Hybrid Energy Systems*. Offshore Energy and Storage Symposium, University of Malta, 13-15 July 2016.

Frigaard, P.; Andersen, T. L.; Margheritini, L.; Vicinanza, D. (2008) – *Design, Construction, Reliability and Hydraulic Performance of an Innovative Wave Overtopping Device*. Transportation

Engineering/Coastal & Harbour Engineering/Hydraulic Engineering: Proceedings of the 8th International Congress on Advances in Civil Engineering, ACE 2008, Famagusta, North Cyprus, 15-17 September 2008, Vol.1, pp. 551-558, Eastern Mediterranean University Press.

Global Wind Energy Council (2017) – *Global Wind Report*. (<http://gwec.net/cost-competitiveness-puts-wind-in-front/>). 23 de maio 2018.

Gonçalves, F. (2016) – *Desenvolvimento de Fundidos em Aço Inoxidável Martensítico para Hidrelétricas – Parte 1*. (<https://pt.linkedin.com/pulse/desenvolvimento-de-fundidos-em-aço-inoxidável-para-parte-gonçalves>). 19 de junho 2018.

Gunn, K.; Stock-Williams, C. (2012) – *Quantifying the global wave power resource*. Renewable Energy, Vol.44, pp.296-304, August 2012, doi:10.1016/j.renene.2012.01.101, ISSN 0960-1481.

Henriques, J.; Falcao, A. (2017) – *Control of the PTO system of OWCs: feedback vs model predictive control*. In 2017 Maynooth University Wave Energy Workshop, Maynooth, 2017, doi: 10.13140/RG.2.2.18036.55684.

HHLA (2018) – *Electric power replaces diesel oil*. (<https://hhla.de/en/sustainability/ecology/electric-power-replaces-diesel-oil.html>). 7 de junho 2018.

INEGI (2018) – *Dispositivo de conversão de energia das ondas híbrido em SolidWorks*. Projeto SE@PORTS, Porto, Portugal.

INEGI; APREN (2014) – *Parques Eólicos em Portugal*. ([http://e2p.inegi.up.pt/relatorios/Portugal\\_Parques\\_Eolicos\\_201412.pdf](http://e2p.inegi.up.pt/relatorios/Portugal_Parques_Eolicos_201412.pdf)). 26 de maio 2018.

INEGI; APREN (2017) – *Parques Eólicos em Portugal*. (<http://www.apren.pt/contents/documents/wind-power-2017-1562.pdf>). 26 de maio 2018.

INEGI; WavEC; ENERGYIN (2012) – *OTEO – Observatório Tecnológico para as Energias Offshore. Estado da Arte – Relatório 2012*. ([http://oteo.inegi.up.pt/resources/358\\_1\\_oteo\\_estado\\_da\\_arte\\_final\\_2013.pdf](http://oteo.inegi.up.pt/resources/358_1_oteo_estado_da_arte_final_2013.pdf)). 26 de maio 2018.

International Energy Agency (2017) – *Snapshot of Global Photovoltaic Markets 2016*. ([http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS\\_-\\_A\\_Snapshot\\_of\\_Global\\_PV\\_-\\_1992-2016\\_\\_1\\_.pdf](http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2016__1_.pdf)). 27 de maio 2018.

International Water Power & Dam Construction (2008) – *Floating for Success*. (<http://www.waterpowermagazine.com/features/featurefloating-for-success/>). 8 de junho 2018.

Jiang, R.; Ingle, K. N.; Golberg, A. (2016) – *Macroalgae (seaweed) for liquid transportation biofuel production: what is next?* Algal Research, Vol.14, pp.48-57. ISSN 2211-9264. Doi: 10.1016/j.algal.2016.01.001.

Jornal de Negócios (2018) – *Central eólica “offshore” ligada à rede em 2019*. (<https://www.jornaldenegocios.pt/empresas/energia/detalhe/central-eolica-offshore-ligada-a-rede-em-2019>). 27 de maio 2018.

Knapp, W.; Holmén, E.; Schilling, R. (2000) – *Considerations for Water Turbines to be used in Wave Energy Converters*. Institute for Hydraulic Machinery and Plants, Technical University of Munich, Germany.

Kofoed, J. P. (2002a) – *Wave Overtopping of Marine Structures: utilization of wave energy*. PhD Thesis. Aalborg: Hydraulics & Coastal Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering, Aalborg University. Series Papers, No. 24

Kofoed, J. P. (2002b). *Hydrauliske undersøgelser af bølgeenergianlægget Power Pyramid: fase 2*. Aalborg: Hydraulics & Coastal Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering, Aalborg University.

Kofoed, J. P. (2005) – Model Testing of the Wave Energy Converter Seawave Slot-Cone Generator. Hydraulics and Coastal Engineering No. 18, ISSN 1603-9874, Department of Civil Engineering, Aalborg University.

Kofoed, J. P.; Frigaard, P. (2000) – *Indledende hydrauliske undersøgelser af bølgeenergianlægget Power Pyramid*. Aalborg: Hydraulics and Coastal Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering, Aalborg University [citado por Kofoed (2002a)]

Kyocera (2013) – *KYOCERA Starts Operation of 70MW Solar Power Plant, the Largest in Japan*. ([https://global.kyocera.com/news/2013/1101\\_nnms.html](https://global.kyocera.com/news/2013/1101_nnms.html)). 20 de maio 2018.

L'Usine Nouvelle (2017) – *EDF rénove les bulbes de l'usine marémotrice de la Rance*. (<https://www.usinenouvelle.com/article/edf-renove-les-bulbes-de-l-usine-maremotrice-de-la-rance.N482629>). 10 de junho 2018.

Liu, L.; Wang, Q.; Lin, H.; Li, H.; Sun, Q.; Wennersten, R. (2017) – *Power Generation Efficiency and Prospects of Floating Photovoltaic Systems*. Energy Procedia, Vol.105, pp.1136-1142, ISSN 1876-6102.

LNEC (2017) – *Estudos em modelo físico e numérico do prolongamento do quebra-mar exterior e das acessibilidades marítimas do Porto de Leixões. Estudo I – Regimes de agitação marítima*. Relatório No. 227/2017, abril de 2017, Lisboa, Portugal, ISBN 227/2017.

Margheritini, L.(2009) – *R&D Towards Commercialization of Sea Wave Slot Cone Generator (SSG) Overtopping Wave Energy Converter: selected topics in the field of wave energy*. PhD Thesis, Aalborg University, Aalborg. DCE Thesis No. 24, ISSN 1901-7294.

Margheritini, L.; Kofoed, J. P. (2008) – *Case Study for Breakwater SSG Application*. Aalborg: Department of Civil Engineering, Aalborg University. DCE Contract Reports, No. 44.

Margheritini, L.; Kofoed, J. P. (2010) – *Definition of Geometry for SSG Breakwater at Hanstholm Location: calculations of expected power production for crest levels higher than optimal*. Department of Civil Engineering, Wave Energy Research Group, Aalborg University. DCE Contract Report No. 89.

Margheritini, L.; Kofoed, J. P.; Frigaard, P. (2006) – *Status and Performance of the SSG Wave Energy Converter*. Proceedings of the Fourth CA-OE Workshop: Performance Monitoring of Ocean Energy Systems, Lisbon, 16-17 November, 2006 Coordination Action on Ocean Energy (CA-OE): Sixth Framework Programme.

Margheritini, L.; Stratigaki, V.; Troch, P. (2012) – *Geometry optimization of an overtopping wave energy device implemented into the new breakwater of the Hanstholm Port expansion*. Proceedings of the Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece, 17-22 de junho, 2012. ISBN 978-1-880653-94-4.

Margheritini, L.; Vicinanza, D.; Frigaard, P. (2009a) – *SSG wave energy converter: design, reliability and performance of an innovative overtopping device*. Renewable Energy, Vol.34, No.5, pp. 1371-80, doi:10.1016/j.renene.2008.09.009, ISSN 0960-1481.

Margheritini, L.; Vicinanza, D.; Kofoed, J. P. (2009b) – *Overtopping performance of Sea wave Slot cone Generator*. Coasts, marine structures and breakwaters: adapting to change; proceedings of the 9th



international conference organised by the Institution of Civil Engineers, 2009, Edinburgh, Thomas Telford.

Medina-Lopez, E.; Allsop, W.; Dimakopoulos, A.; Bruce, T. (2015) – *Conjectures on the failure of the OWC breakwater at Mutriku*. Coastal Structures & Solutions To Coastal Disasters Joint Conference, pp.1-12.

MEEE Services (2018) – *Biggest Solar Power Plants*. (<https://meee-services.com/biggest-solar-power-plants/>). 10 de junho 2018.

Meinert, P.; Gilling, L.; Kofoed, J. P. (2008) – *User manual for SSG Power simulation 2*. Hydraulics and Coastal Engineering, No. 44, Aalborg, Denmark, ISSN 1603-9874.

Milano, J.; Ong, H. C.; Masjuki, H. H.; Chong, W. T.; Lam, M. K.; Loh, P. K.; Vellayan, V. (2016) – *Microalgae biofuels as an alternative to fossil fuel for power generation*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.58, pp.180-197, ISSN 1364-0321.

Mustapa, M. A.; Yaakob, O.; Ahmed, Y.; Rheem, C.-K.; Koh, K.; Adnan, F. (2017) – *Wave energy device and breakwater integration: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 77, pp.433-58, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.110.

Nielsen, A.; Kofoed, J. P. (1997) – *The Wave Dragon: evaluation of a wave energy converter*. M. Sc. Thesis. Hydraulics & Coastal Engineering Laboratory Department of Civil Engineering Aalborg University.

Noctula (2018) – *Projeto Windfloat Atlantic: Primeiro Parque Eólico marítimo em Portugal*. (<http://noctula.pt/projecto-windfloat-atlantic-primeiro-parque-eolico-maritimo-em-portugal/>). 26 de maio 2018.

Oak Ridge National Laboratory – Carbon Dioxide Information Analysis Center (2017) – *Global CO2 Emissions from Fossil-Fuel Burning, Cement Manufacture, and Gas Flaring: 1751-2014*. ([http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/ftp/ndp030/global.1751\\_2014.ems](http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/ftp/ndp030/global.1751_2014.ems)). 10 de fevereiro 2018.

Ocean Energy Systems (2011) – *An International Vision for Ocean Energy*. (<https://www.dutchmarineenergy.com/about-us/downloads/10%20-%20OES%20-%20International%20Vision%20Brochure.pdf>). 27 de maio 2018.

Ocean Power Technologies (2018) – *PowerBuoy*. (<https://www.oceanpowertechnologies.com/products.htm>). 9 de junho 2018.

Okinawa Renewable Energy for the Future (2018) – *The Okinawa Prefecture Ocean Thermal Energy Conversion Power Demonstration Project*. (<http://otecokinawa.com/en/Project/index.html>). 29 de maio 2018

Oliveira, P. (2014) – *Aproveitamento da energia do mar através do espraiamento de estruturas costeiras portuárias*. Dissertação de Mestrado, Mestrado Integrado em Engenharia Civil – 2013/2014 – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.

Oliveira, P.; Taveira-Pinto, F.; Morais, T.; Rosa-Santos, P. (2016) – *Experimental evaluation of the effect of wave focusing walls on the performance of the Sea-wave Slot-cone Generator*. Energy Conversion and Management, Vol. 110, pp.165-175, ISSN 0196-8904.

- Orphin, J; Fleming, A; Algie, C. (2017) – *Physical scale model testing of a flexible membrane wave energy converter: Videogrammetric analysis of membrane operation*. International Journal of Marine Energy, Vol. 20, pp. 135-150, doi:10.1016/j.ijome.2017.09.004.
- Ouest France (2016) – *L’usine marémotrice de la Rance vit au rythme des marées*. (<https://www.ouest-france.fr/bretagne/dinard-35800/barrage-de-la-rance/turbines-du-barrage-de-la-rance-une-innovation-en-son-temps-4611044>). 27 de maio 2018
- Parlamento Europeu (2009) – *Diretiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Abril de 2009*. Jornal Oficial da União Europeia, L 140/16.
- Pauly; Zeller (2015) – *Sea Around Us*. (<http://www.seaaroundus.org/data/#/eez>). 15 de fevereiro 2018.
- Pecher, A.; Kofoed, J. P. (2017) – *Erratum to: Handbook of Ocean Wave Energy*. Handbook of Ocean Wave Energy, Springer International Publishing, ISBN 978-3-319-39889-1, doi: 10.1007/978-3-319-39889-1\_11.
- Pelamis Wave Power (2018) – *Pelamis Aguçadoura*. (<https://www.youtube.com/watch?v=cwhGbrRCirc>). 9 de junho 2018.
- Pelc, R.; Fujita, R. M. (2002) – *Renewable energy from the ocean*. Marine Policy, Vol. 26, No. 6, pp.471-479, ISSN 0308-597X.
- PLOCAN (2017) – *Sustainable Energy at Sea Ports*. (<http://www.plocan.eu/index.php/en/208-project/active-projects/1651-seaports-en>). 13 de março 2018
- PORDATA (2018a) – *Consumo de energia eléctrica: total e por tipo de consumo*. (<https://www.pordata.pt/Portugal/Consumo+de+energia+el%C3%A9ctrica+total+e+por+tipo+de+consumo-1124>). 13 de fevereiro 2018.
- PORDATA (2018b) – *Produção de energia eléctrica: total e a partir de fontes renováveis*. (<https://www.pordata.pt/Portugal/Produ%C3%A7%C3%A3o+de+energia+el%C3%A9ctrica+total+e+a+partir+de+fontes+renov%C3%A1veis-1127>). 14 de fevereiro 2018
- Portal Energia (2016) – *Projeto Waveroller energia das ondas em Peniche recebe 10 milhões de euros*. (<https://www.portal-energia.com/projeto-waveroller-energia-das-ondas-peniche-recebe-10-milhoes-euros/>). 9 de junho 2018
- Power Technology (2014) – *Tidal energy – the world’s five biggest tidal power plants*. (<https://www.power-technology.com/features/featuretidal-giants-the-worlds-five-biggest-tidal-power-plants-4211218/>). 29 de maio 2018
- REN21 (2013) – *Renewables Global Futures Report*. REN21 Secretariat, Paris.
- RenewableEnergyWorld (2011) – *Obama Calls for 80% “Clean Energy” by 2035*. (<http://www.renewableenergyworld.com/articles/2011/01/obama-calls-for-80-clean-energy-by-2035.html>). 14 de fevereiro 2018.
- República Portuguesa (2009) – *Plano Nacional de Acção para as Energias Renováveis ao Abrigo da Directiva 2009/28/CE*. (<https://ec.europa.eu/energy/node/71>). 14 de fevereiro 2018.
- REUK (2018) – *Oyster*. (<http://www.reuk.co.uk/wordpress/wave/oyster-wave-power/>). 9 de junho 2018.

Reuters (2018) – *Dutch plan to build giant offshore solar power farm.*

(<https://www.reuters.com/article/netherlands-solar-offshore/dutch-plan-to-build-giant-offshore-solar-power-farm-idUSL8N1Q46M0>). 20 de maio 2018.

Sales, B. B.; Saakes, M.; Post, J. W.; Buisman, C. J. N.; Biesheuvel, P. M.; Hamelers, H. V. M. (2010) – *Direct Power Production from a Water Salinity Difference in a Membrane-Modified Supercapacitor Flow Cell.* Environmental Science & Technology, Vol. 44, No. 14, pp.5661-5665, ISSN 0013-936X.

Schaetzle, O.; Buisman, C. J. N. (2015) – *Salinity Gradient Energy: Current State and New Trends.* Engineering. Vol. 1, No. 2, pp.164-166, ISSN 2095-8099.

Science Gallery (2018) – *Wavebob.* ([https://dublin.sciencegallery.com/gm\\_wavebob](https://dublin.sciencegallery.com/gm_wavebob)). 9 de junho 2018.

Seabased (2018) – *Seabased.* (<https://www.seabased.com/>) 9 de junho 2018.

SE@PORTS (2016) – *Sustainable Energy at Sea PORTS.* OCEANERA-NET Second Joint Call 2016 Proposal 325.

SE@PORTS (2018) – *Sustainable Energy at Sea PORTS.* Preliminary Design Report.

SHRHA (2018) – *Laboratório de Hidráulica – Descrição e funcionamento do equipamento.* ([https://paginas.fe.up.pt/~shrha/laboratorios/desc\\_func.html](https://paginas.fe.up.pt/~shrha/laboratorios/desc_func.html)). 11 de junho 2018.

Solar Industry (2018) – *Acciona Completes 46 MW Solar Photovoltaic Installation In Portugal.* (<https://solarindustrymag.com/acciona-completes-46-mw-solar-photovoltaic-installation-in-portugal/>). 27 de maio 2018.

Sul Informação (2017) – *Investigadores da Universidade do Algarve extraem energia das marés na barra Faro-Olhão.* (<http://www.sulinformacao.pt/2017/06/investigadores-da-ualg-pioneiros-na-instalacao-de-dispositivo-de-extracao-de-energia-das-mares/>). 29 de maio 2018.

Tan, I. S.; Lee, K. T. (2015) – *Solid acid catalysts pretreatment and enzymatic hydrolysis of macroalgae cellulosic residue for the production of bioethanol.* Carbohydrate Polymers, Vol. 124, pp.311-321, ISSN 0144-8617.

Taveira-Pinto, F.; Veloso-Gomes, F.; Silva, R.; Neves, L.; Santos, P.; Lopes, H.; Neves, A. (2007) – *O Novo Sistema de Geração e Aquisição de Agitação Marítima do Laboratório de Hidráulica da FEUP.* Atas das 2as Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, 2007, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, ISBN 978-989-95557-1-6.

TecDragon (2018) – *TecDragon.* (<http://www.tecdragon.pt/>) 9 de junho 2018.

Telegraph (2018) – *World's largest renewable energy projects: in pictures.* (<https://www.telegraph.co.uk/finance/newsbysector/energy/8390731/Worlds-largest-renewable-energy-projects-in-pictures.html?image=9>). 27 de maio 2018.

Tethys (2017) – *Pico Oscillating Water Column.* (<https://tethys.pnnl.gov/annex-iv-sites/pico-oscillating-water-column>). 7 de junho 2018.

Thetys (2018) – *Marine Energy Content.* (<https://tethys.pnnl.gov/knowledge-base>). 10 de junho 2018.

Tidal Lagoon Power (2018) – *Swansea Bay.* (<http://www.tidallagoonpower.com/projects/swansea-bay/>). 10 de junho 2018.

- Torre-Enciso, Y.; Ortubia, I.; López De Aguilera, L. I.; Marqués, J. (2009) – *Mutriku Wave Power Plant: From the Thinking out to the Reality*. Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference, Uppsala, Sweden, 200, pp. 319-329.
- Transportweekly (2012) – *Terex Port Solutions supplies automation technology to terminals*. (<http://www.transportweekly.com/pages/en/news/articles/94655/>). 7 de junho 2018.
- TSF (2017) – *Extração da energia das marés: estudo inédito em Portugal*. (<https://www.tsf.pt/sociedade/ambiente/interior/extracao-da-energia-das-mares-estudo-inedito-em-portugal-8562740.html>). 29 de maio 2018.
- U.S. Energy Information Administration (2017a) – *International Energy Outlook 2017*. ([https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf)). 9 de fevereiro 2018.
- U.S. Energy Information Administration (2017b) – *Greenhouse Gases\ Effect on the Climate*. ([https://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=environment\\_how\\_ghg\\_affect\\_climate](https://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=environment_how_ghg_affect_climate)). 13 de fevereiro 2018.
- U.S. Energy Information Administration (2017c) – *Tidal Power*. ([https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=hydropower\\_tidal](https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=hydropower_tidal)). 27 de maio 2018.
- Union of Concerned Scientists USA (2018) – *How Solar Energy Works*. (<https://www.ucsusa.org/clean-energy/renewable-energy/solar-resource#.WwFPxfZFyHs>). 20 de maio 2018.
- United Nations (1982) – *United Nations Convention on the Law of the Sea of 10 December 1982*. Montego Bay, Jamaica, 10 de dezembro de 1982.
- Vicinanza, D.; Margheritini, L.; Kofoed, J. P.; Buccino, M. (2012) – *The SSG Wave Energy Converter: Performance, Status and Recent Developments*. *Energies*, Vol.5, Nº2. Pp.193-226, doi:10.3390/en5020193, ISSN 1996-1073.
- Wave Dragon (2018) – *Wave Dragon*. (<http://www.wavedragon.net/>). 9 de junho 2018.
- Wind Power Offshore (2017) – *JDR selected for WindFloat Atlantic*. (<https://www.windpoweroffshore.com/article/1435585/jdr-selected-windfloat-atlantic>). 10 de junho 2018.
- Wyre Tidal Energy (2018) – *La Rance Barrage*. (<https://web.archive.org/web/20150204062904/http://www.wyretidalenergy.com/tidal-barrage/la-rance-barrage>). 27 de maio 2018.
- Xie, J.; Zuo, L. (2013) – *Dynamics and control of ocean wave energy converters*. *International Journal of Dynamics and Control*, Vol. 1, No. 3, pp.262-276.
- Yang, S. H.; He, G. Y.; Zhang, H. R. (2014) – *Design and Development of Wave Energy – Wind Energy Hybrid Power Generation System*. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 535, pp.17-21, ISSN: 1662-7482, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.535.17.
- Yip, N. Y.; Elimelech, M. (2012) – *Thermodynamic and Energy Efficiency Analysis of Power Generation from Natural Salinity Gradients by Pressure Retarded Osmosis*. *Environmental Science & Technology*, Vol. 46, No. 9, pp.5230-5239, doi:10.1021/es300060m, ISSN 0013-936X.
- Yu, C.; Townsend, N.; Mingyi, T. (2017) – *Hybrid renewable energy system for ocean going platforms*. Piscataway, NJ, USA, 2017. IEEE, doi:10.1109/OCEANSE.2017.8084799.





## **ANEXOS**





## **ANEXOS**

Anexo A: Folhas de cálculo Microsoft Excel ® utilizadas no processo iterativo de otimização da cota das cristas dos reservatórios.....	140
Anexo B: Exemplo dos resultados apresentados pelo <i>software</i> WOPSim no final de cada simulação, para três reservatórios.....	142
Anexo C: Curvas características das turbinas dimensionadas para os dispositivos com três, quatro e cinco reservatórios .....	149
Anexo D: Modelo físico do dispositivo híbrido utilizado nos testes experimentais.....	161
Anexo E: Variação do nível da superfície livre da água dentro da CAO para os períodos de onda de 6 a 14 s.....	163

**ANEXO A: FOLHAS DE CÁLCULO MICROSOFT EXCEL® UTILIZADAS NO PROCESSO ITERATIVO DE OTIMIZAÇÃO DA COTA DAS CRISTAS DOS RESERVATÓRIOS**

g=	9.81	m/s <sup>2</sup>											
ρ=	1025	kg/m <sup>3</sup>											
Rc,1=	0.75	m											
Rc,2=	2.00	m											
Rc,3=	3.25	m											
Rc,4=	5.00	m											
Rc,5=		m											
ΔMWL=	0	m											
A=	0.197	-											
B=	-1.753	-											
C=	-0.408	-											
λdr=	1	-											
TE=	1.1518*Tz	-											

Intervalo	N valores	Frequencia	Valor médio (m)	ΔMWL (m)
] 0 ; 0.5 ]	1987	0.00497	0.25	-1.75
] 0.5 ; 1 ]	26154	0.06545	0.75	-1.25
] 1 ; 1.5 ]	70926	0.17748	1.25	-0.75
] 1.5 ; 2 ]	79562	0.19909	1.75	-0.25
] 2 ; 2.5 ]	69242	0.17327	2.25	0.25
] 2.5 ; 3 ]	83213	0.20823	2.75	0.75
] 3 ; 3.5 ]	54782	0.13708	3.25	1.25
] 3.5 ; 4 ]	13455	0.03367	3.75	1.75
] 4 ; 4.5 ]	307	0.00077	4.25	2.25
	399628	1.00000		

SS	Hs(m)	Tz(s)	Tp(s)	Te(s)	Prob	Prob(100%)
1	1.08	5.3	6.3	6.1	21.03%	21.13%
2	1.24	7.0	8.3	8.0	32.82%	32.99%
3	1.37	8.9	10.7	10.2	16.41%	16.49%
4	2.62	7.2	8.6	8.3	5.13%	5.15%
5	2.80	9.0	10.8	10.3	9.74%	9.79%
6	2.29	10.9	13.0	12.5	11.28%	11.34%
7	2.75	12.8	15.4	14.8	3.08%	3.09%
					99.49%	100.00%

q1	P1 (kW/m)	q2	P2 (kW/m)	q3	P3 (kW/m)	q4	P4 (kW/m)	q5	P5 (kW/m)	Pwave(kW/m)	ηturb	P(kW/m)
0.15	0.26	0.09	0.55	0.04	0.48	0.01	0.21	0.00	0.02	3.51	1.00	1.52
0.17	0.30	0.11	0.71	0.06	0.72	0.02	0.40	0.00	0.06	6.02	1.00	2.18
0.19	0.33	0.13	0.85	0.07	0.95	0.03	0.62	0.00	0.12	9.40	1.00	2.87
0.35	0.60	0.33	2.11	0.29	3.77	0.23	5.18	0.09	3.60	27.87	1.00	15.26
0.37	0.63	0.35	2.28	0.33	4.20	0.27	6.10	0.11	4.70	39.70	1.00	17.92
0.31	0.54	0.28	1.80	0.23	2.98	0.16	3.64	0.05	2.04	32.23	1.00	11.00
0.36	0.63	0.35	2.24	0.32	4.09	0.26	5.87	0.11	4.42	54.99	1.00	17.25
1.91	3.30	1.64	10.54	1.34	17.19	0.98	22.02	0.36	14.95	173.72		68.00

ηhyd(%)	P*Prob(kW/m)	Pwave*Prob(kW/m)	ηhyd global(%)
43.32	0.32	0.74	
36.27	0.72	1.97	
30.53	0.47	1.54	
54.77	0.78	1.43	
45.13	1.75	3.87	
34.13	1.24	3.64	
31.37	0.53	1.69	
<b>39.15</b>	<b>5.81</b>	<b>14.88</b>	<b>39.03</b>

Figura A1 – Folha de cálculo Microsoft Excel® sem consideração das marés.



**ANEXO B: EXEMPLO DOS RESULTADOS APRESENTADOS PELO SOFTWARE WOPSIM NO FINAL DE CADA SIMULAÇÃO, PARA TRÊS RESERVATÓRIOS**

Simulation: Simulation 0, 09/04/2018 11:28:07

RESULTS (Flow):

=====

TOTALS:

-----

FLows AND PRODUCED POWER:

Res No.	Water in [m <sup>3</sup> /s]	Water overflow [m <sup>3</sup> /s]	Water through [m <sup>3</sup> /s]	Water.chg reservoir [m <sup>3</sup> /s]	Produced power [kWh/yr]	Average power [kW]
1	67.028+E0	81.313+E0	0.000+E0	0.832-E3	0.000+E00	0.000+E0
2	12.826+E0	14.285+E0**	0.000+E0	0.796-E3	0.000+E00	0.000+E0
3	2.013+E0	1.460+E0**	0.552+E0	0.001+E0	73.479+E03	8.382+E0
Sum	81.868+E0	81.313+E0	0.552+E0	0.003+E0	73.479+E03	8.382+E0

\*\* Flow to next reservoir

RESERVOIR EFFICIENCIES:

Res No.	Eff. overtop [%]	Eff. res. [%]
1	359.2	0.0
2	137.5	0.0
3	36.0	3.4
Sum	532.7	3.4

TURBINES EFFICIENCIES:

Res No.	Turb No.	Eff. through turb [%]	Turb work eff [%]	Turb.on time [hours/yr]	Turb.on pct [%]	Turb charac eff [%]	No. of turn on/ turn off [hour]	Produced power [kWh/yr]
1	1	0.0	0.0	8764.6	100.0	0.0	0.0	0.000+E00
2	1	0.0	0.0	8764.8	100.0	0.0	0.0	0.000+E00
3	1	3.5	3.0	5234.5	59.7	74.1	1.0	73.479+E03

SIMULATED SEASTATES:

-----

No. [-]	Hs [m]	Tp [s]	Offset [m]	Prob [%]	Model waves [-]	Model time [s]	Prototype waves [1/yr]	Prototype time [s/yr]	Wave Energy [kWh/yr]	Average power [kW]
1	0.5	5.0	3.0	13.500	5000	20833	1022444	4260183	9.485+E3	8.015+E0
2	1.0	6.1	3.0	30.300	5000	25417	1880999	9561743	103.890+E3	39.115+E0
3	1.7	7.9	3.0	26.500	5000	32917	1270265	8362581	340.074+E3	146.398+E0
4	2.4	9.3	3.0	16.400	5000	38750	667785	5175333	493.801+E3	343.491+E0
5	3.6	10.6	3.0	8.300	5000	44167	296516	2619223	640.902+E3	880.889+E0
6	4.7	11.7	3.0	3.500	5000	48750	113281	1104492	508.454+E3	1.657+E3
7	5.9	12.7	3.0	1.500	5000	52917	44726	473354	372.736+E3	2.835+E3
Sum				100.000	35000	263750	5296016	31556900	2.469+E6	281.702+E0

Figura B1 – Resumo dos resultados para todos os reservatórios apresentados pelo WOPSim.

```

RESERVOIR: 1
-----
FLOWS AND PRODUCED POWER:
Sea      Water  Overflow  Water  Water  Water.chg  Produced  Average
state    in      Water in  overflow through reservoir energy      power
[-]      [m^3/s] [m^3/s]   [m^3/s] [m^3/s] [m^3/s]   [kWh/yr] [kW]
1        0.000+E0 5.553+E0 5.549+E0 0.000+E0 0.004+E0 0.000+E0 0.000+E0
2        120.166+E0 8.305+E0 128.471+E0 0.000+E0 0.207-E3 0.000+E0 0.000+E0
3        61.740+E0 13.301+E0 75.040+E0 0.000+E0 0.522-E3 0.000+E0 0.000+E0
4        48.526+E0 18.367+E0 66.893+E0 0.000+E0 -0.331-E3 0.000+E0 0.000+E0
5        47.781+E0 29.934+E0 77.716+E0 0.000+E0 -0.317-E3 0.000+E0 0.000+E0
6        46.345+E0 37.442+E0 83.781+E0 0.000+E0 0.006+E0 0.000+E0 0.000+E0
7        47.383+E0 45.824+E0 93.213+E0 0.000+E0 -0.006+E0 0.000+E0 0.000+E0

Mean     67.028+E0 14.285+E0 81.313+E0 0.000+E0 0.832-E3 0.000+E0 0.000+E0

RESERVOIR EFFICIENCIES:
Sea      Eff. Eff.
state    overtop res.
[-]      [%] [%]
1        0.0 -1.0
2        4638.4 0.0
3        636.7 0.0
4        213.3 0.0
5        81.9 0.0
6        42.2 0.0
7        25.2 0.0

Mean     359.2 0.0

TURBINES EFFICIENCIES:
Sea      Eff. Turb  Turb  Turb  Turb  No. of  Produced
No.      No.  through work  on  on  charac  turn on/  power
1        1    0.0  0.0  8757  99.9  0.0  0.1  0.000+E0
2        1    0.0  0.0  8766  100.0  0.0  0.0  0.000+E0
3        1    0.0  0.0  8766  100.0  0.0  0.0  0.000+E0
4        1    0.0  0.0  8766  100.0  0.0  0.0  0.000+E0
5        1    0.0  0.0  8766  100.0  0.0  0.0  0.000+E0
6        1    0.0  0.0  8766  100.0  0.0  0.0  0.000+E0
7        1    0.0  0.0  8766  100.0  0.0  0.0  0.000+E0

Mean.    1    0.0  0.0  8764.6  100.0  0.0  0.0  0.000+E0

Mean on turb. 0.0  0.0  8764.6  100.0  0.0  0.0  0.000+E0
    
```

Figura B2 – Resultados do primeiro reservatório apresentado pelo WOPSim.

RESERVOIR: 2

---

-----

FLAWS AND PRODUCED POWER:

Sea state	Water in	Overflow Water in	Water overflow	Water through	Water.chg reservoir	Produced energy	Average power
[-]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[kWh/yr]	[kW]
1	5.559+E0	0.000+E0	5.553+E0	0.000+E0	0.006+E0	0.000+E0	0.000+E0
2	8.293+E0	0.012+E0	8.305+E0	0.000+E0	0.009-E12	0.000+E0	0.000+E0
3	12.889+E0	0.412+E0	13.301+E0	0.000+E0	0.104-E12	0.000+E0	0.000+E0
4	16.404+E0	1.963+E0	18.367+E0	0.000+E0	-0.429-E12	0.000+E0	0.000+E0
5	23.898+E0	6.036+E0	29.934+E0	0.000+E0	-0.642-E12	0.000+E0	0.000+E0
6	28.049+E0	9.395+E0	37.442+E0	0.000+E0	0.002+E0	0.000+E0	0.000+E0
7	32.759+E0	13.063+E0	45.824+E0	0.000+E0	-0.002+E0	0.000+E0	0.000+E0
Mean	12.826+E0	1.460+E0	14.285+E0	0.000+E0	0.796-E3	0.000+E0	0.000+E0

RESERVOIR EFFICIENCIES:

Sea state	Eff. overtop	Eff. res.
[-]	[%]	[%]
1	2094.3	-0.3
2	640.3	0.0
3	265.8	0.0
4	144.2	0.0
5	81.9	0.0
6	51.1	0.0
7	34.9	0.0
Mean	137.5	0.0

TURBINES EFFICIENCIES:

Sea No.	Turb No.	Eff. through turb [%]	Turb work eff [%]	Turb.on time [hours/yr]	Turb.on pct [%]	Turb charac eff [%]	No. of turn on/turn off [/hour]	Produced power [kWh/yr]
1	1	0.0	0.0	8758	99.9	0.0	0.1	0.000+E0
2	1	0.0	0.0	8766	100.0	0.0	0.0	0.000+E0
3	1	0.0	0.0	8766	100.0	0.0	0.0	0.000+E0
4	1	0.0	0.0	8766	100.0	0.0	0.0	0.000+E0
5	1	0.0	0.0	8766	100.0	0.0	0.0	0.000+E0
6	1	0.0	0.0	8766	100.0	0.0	0.0	0.000+E0
7	1	0.0	0.0	8766	100.0	0.0	0.0	0.000+E0
Mean.	1	0.0	0.0	8764.8	100.0	0.0	0.0	0.000+E0
Mean on turb.		0.0	0.0	8764.8	100.0	0.0	0.0	0.000+E0

Figura B3 – Resultados do segundo reservatório apresentado pelo WOPSim.

RESERVOIR: 3  
-----

FLAWS AND PRODUCED POWER:

Sea state [-]	Water in [m <sup>3</sup> /s]	Overflow Water in [m <sup>3</sup> /s]	Water overflow [m <sup>3</sup> /s]	Water through [m <sup>3</sup> /s]	Water.chg reservoir [m <sup>3</sup> /s]	Produced energy [kWh/yr]	Average power [kW]
1	0.000+E0	0.000+E0	0.000+E0	0.000+E0	0.000+E0	0.000+E0	0.000+E0
2	0.180+E0	0.000+E0	0.012+E0	0.167+E0	0.002+E0	5.283+E3	1.989+E0
3	1.272+E0	0.000+E0	0.412+E0	0.858+E0	0.002+E0	28.346+E3	12.202+E0
4	2.885+E0	0.000+E0	1.963+E0	0.922+E0	-0.425-E3	21.555+E3	14.994+E0
5	6.961+E0	0.000+E0	6.036+E0	0.924+E0	0.464-E3	11.385+E3	15.648+E0
6	10.319+E0	0.000+E0	9.395+E0	0.924+E0	0.167-E3	4.833+E3	15.752+E0
7	13.987+E0	0.000+E0	13.063+E0	0.924+E0	0.516-E12	2.077+E3	15.795+E0
Mean	2.013+E0	0.000+E0	1.460+E0	0.552+E0	0.001+E0	73.479+E3	8.382+E0

RESERVOIR EFFICIENCIES:

Sea state [-]	Eff. overtop [%]	Eff. res. [%]
1	0.0	0.0
2	23.2	5.9
3	43.7	9.6
4	42.3	5.1
5	39.8	2.1
6	31.3	1.1
7	24.8	0.6
Mean	36.0	3.4

TURBINES EFFICIENCIES:

Sea No.	Turb No.	Eff. through turb [%]	Turb work eff [%]	Turb.on time [hours/yr]	Turb.on pct [%]	Turb charac eff [%]	No. of turn on/turn off [/hour]	Produced power [kWh/yr]
1	1	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.000+E0
2	1	5.9	5.1	1577	18.0	85.7	1.7	5.283+E3
3	1	9.7	8.3	8135	92.8	85.7	1.7	28.346+E3
4	1	5.1	4.4	8750	99.8	85.7	0.1	21.555+E3
5	1	2.1	1.8	8766	100.0	85.7	0.0	11.385+E3
6	1	1.1	1.0	8766	100.0	85.7	0.0	4.833+E3
7	1	0.7	0.6	8766	100.0	85.7	0.0	2.077+E3
Mean.	1	3.5	3.0	5234.5	59.7	74.1	1.0	73.479+E3
Mean on turb.		3.5	3.0	5234.5	59.7	74.1	1.0	73.479+E3

Figura B4 – Resultados do terceiro reservatório apresentado pelo WOPSim.

INPUT PARAMETERS:

=====

SEA STATES:

-----

Number of sea states: 7

Sea No.	Hs [m]	Tp [s]	SWL Offset [m]	Prob [-]	No. of waves [-]
1	0.50	5.00	3.000	0.13500	5000
2	1.00	6.10	3.000	0.30300	5000
3	1.70	7.90	3.000	0.26500	5000
4	2.40	9.30	3.000	0.16400	5000
5	3.60	10.60	3.000	0.08300	5000
6	4.70	11.70	3.000	0.03500	5000
7	5.90	12.70	3.000	0.01500	5000

GEOMETRY:

-----

Res No.	Crest level [m]	Floor level [m]	Approx height [m]	length [m]	width [m]	Initial freespace [m]
1	1.500	0.00	0.00	10.00	15.00	0.60
2	3.000	1.50	0.00	10.00	13.00	0.90
3	5.000	3.00	0.00	10.00	10.00	1.20

TURBINE CONFIGURATION:

-----

TURBINE CHARACTERISTIC:

Turbine: 1.01

Head [m]	Flow [m <sup>3</sup> /s]	Efficiency [%]
0.50	3.34	60.4
0.63	3.49	75.6
0.75	3.63	83.2
0.88	3.75	87.0
1.00	3.86	88.9
1.13	3.97	89.6
1.25	4.08	89.7
1.38	4.18	89.4
1.50	4.28	88.8

Turbine: 2.01

Head [m]	Flow [m <sup>3</sup> /s]	Efficiency [%]
1.50	1.80	81.8
1.69	1.84	85.3
1.88	1.89	87.5
2.06	1.93	88.8
2.25	1.97	89.4

Figura B5 – Resumo dos estados do mar, geometria do dispositivo e curvas características da primeira e segunda turbina considerados.



2.44	2.00	89.7
2.63	2.04	89.7
2.81	2.08	89.5
3.00	2.11	89.1

Turbine: 3.01		
Head	Flow	Efficiency
[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[%]
3.00	0.92	85.7
3.25	0.94	87.3
3.50	0.96	88.4
3.75	0.97	89.1
4.00	0.99	89.5
4.25	1.00	89.7
4.50	1.02	89.7
4.75	1.03	89.6
5.00	1.04	89.4

STRATEGY:								
Turb No.	On		On		Off		Off	
	space lower limit	space upper limit	on Hs gain	On Hs offset	space lower limit	space upper limit	Off Hs gain	Off Hs offset
	[m]	[m]	[-]	[-]	[m]	[m]	[-]	[-]
1.01	0.10	0.10	0.00	0.00	0.60	0.60	0.00	0.00
2.01	0.15	0.15	0.00	0.00	0.90	0.90	0.00	0.00
3.01	0.20	0.20	0.00	0.00	1.20	1.20	0.00	0.00

Strategy for turbine: 1.01			
Hs	On		Off
	freeSpace	freeSpace	freeSpace
[m]	[m]	[m]	[m]
1.00	0.10	0.10	0.60
2.00	0.10	0.10	0.60
3.00	0.10	0.10	0.60
4.00	0.10	0.10	0.60
5.00	0.10	0.10	0.60
6.00	0.10	0.10	0.60

Start/stop ramp type : Cosine  
 Start-up time : 0.000  
 Shutdown time : 0.000  
 Power production on start-up: False

Strategy for turbine: 2.01			
Hs	On		Off
	freeSpace	freeSpace	freeSpace
[m]	[m]	[m]	[m]
1.00	0.15	0.15	0.90
2.00	0.15	0.15	0.90
3.00	0.15	0.15	0.90
4.00	0.15	0.15	0.90
5.00	0.15	0.15	0.90
6.00	0.15	0.15	0.90

Figura B6 – Curvas características da segunda e terceira turbina consideradas e respetivas estratégias de turbinamento.

```
Start/stop ramp type      : Cosine
Start-up time             : 0.000
Shutdown time             : 0.000
Power production on start-up: False

Strategy for turbine: 3.01
      On           Off
Hs   freeSpace   freeSpace
[m]  [m]         [m]
1.00 0.20       1.20
2.00 0.20       1.20
3.00 0.20       1.20
4.00 0.20       1.20
5.00 0.20       1.20
6.00 0.20       1.20

Start/stop ramp type      : Cosine
Start-up time             : 0.000
Shutdown time             : 0.000
Power production on start-up: False

COMPUTATIONAL SETTINGS
-----
Number of time steps in each wave period : 10
Waterflow model                          : General multi-level
Simulated seastate Waves                  : Sea State waves
Overflow to next reservoir                 : True
Compute plot values                       : True
Use average head                          : True
Random seed value (0=No seed)             : 10
Overtop distribution type                 : Even
Overtop spreading (1 - 100%)             : 100

ADVANCED SETTINGS
-----
Overtopping model :
A: 0.197
B: -1.753
C: -0.408
Correction coefficients :
Geometry          : 1
Attack angle     : 0
Slope angle      : 30
Generic correction coefficient : 1

---- End of Simulation 0 ----
```

Figura B7 – Estratégia de turbinamento da terceira turbina e parâmetros de simulação considerados.

**ANEXO C: CURVAS CARACTERÍSTICAS DAS TURBINAS DIMENSIONADAS PARA OS DISPOSITIVOS COM TRÊS, QUATRO E CINCO RESERVATÓRIOS**

Tabela C1 – Curva característica da turbina 3T1 (D=1.4 m).

H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	η (-)
0.2	3.46876	0
0.27	3.568617	0.6
0.34	3.601858	0.78
0.41	3.738443	0.855
0.48	3.824392	0.88
0.54	3.9212	0.895
0.61	4.090874	0.89
0.68	4.198831	0.88
0.75	4.244831	0.875

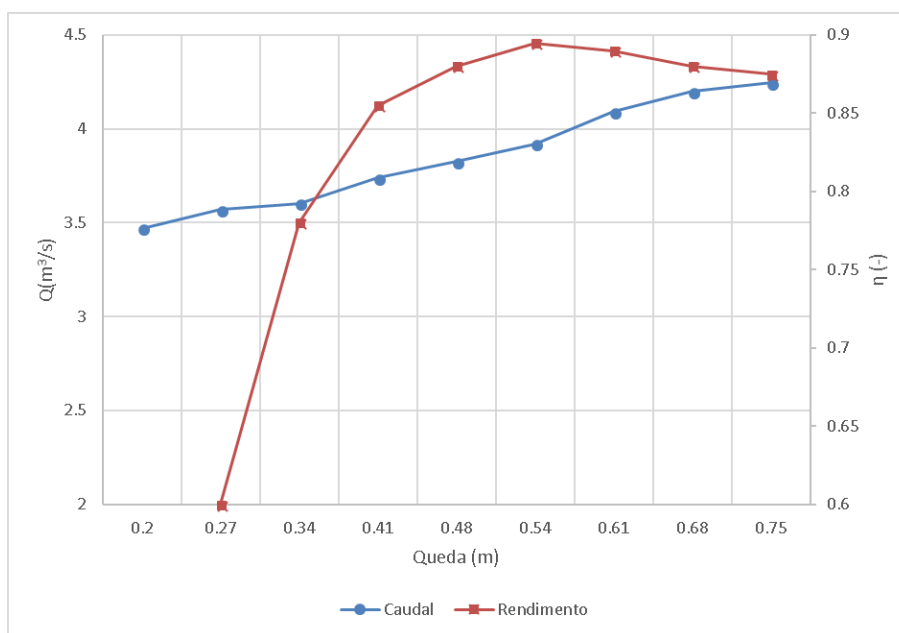


Figura C1 – Curva característica da turbina 3T1 (D=1.4 m).

Tabela C2 – Curva característica da turbina 3T2 (D=0.7 m).

H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	$\eta$ (-)
0.75	1.245525	0.87
0.91	1.339836	0.88
1.06	1.429773	0.885
1.22	1.511407	0.89
1.38	1.57858	0.895
1.53	1.648404	0.898
1.69	1.705648	0.899
1.84	1.75912	0.898
2	1.818223	0.897

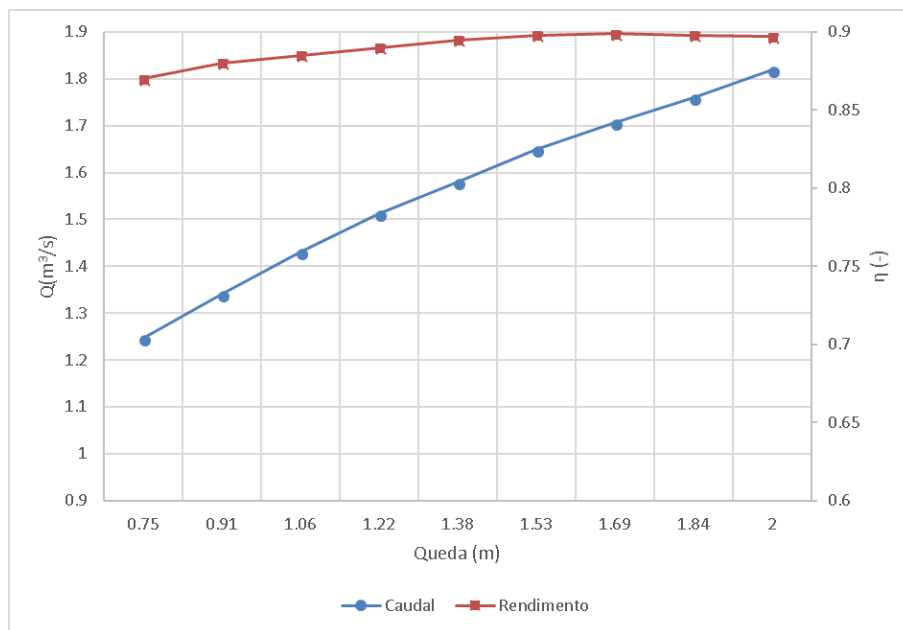


Figura C2 – Curva característica da turbina 3T2 (D=0.7 m).

Tabela C3 – Curva característica da turbina 3T3 (D=0.27 m).

H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	$\eta$ (-)
2.2	0.318607	0.875
2.44	0.33187	0.88
2.68	0.343728	0.885
2.91	0.353778	0.89
3.15	0.364775	0.892
3.39	0.373724	0.894
3.63	0.382274	0.895
3.86	0.392878	0.896
4.1	0.402278	0.897

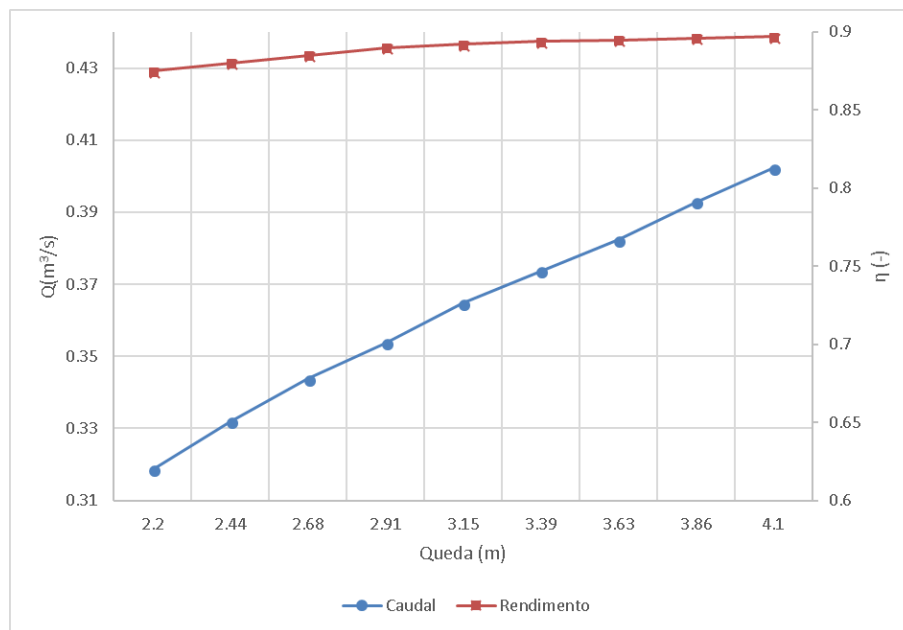


Figura C3 – Curva característica da turbina 3T3 (D=0.27 m).

Tabela C4 – Curva característica da turbina 4T1 (D=1.4 m).

H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	$\eta$ (-)
2.2	0.318607	0.875
2.44	0.33187	0.88
2.68	0.343728	0.885
2.91	0.353778	0.89
3.15	0.364775	0.892
3.39	0.373724	0.894
3.63	0.382274	0.895
3.86	0.392878	0.896
4.1	0.402278	0.897

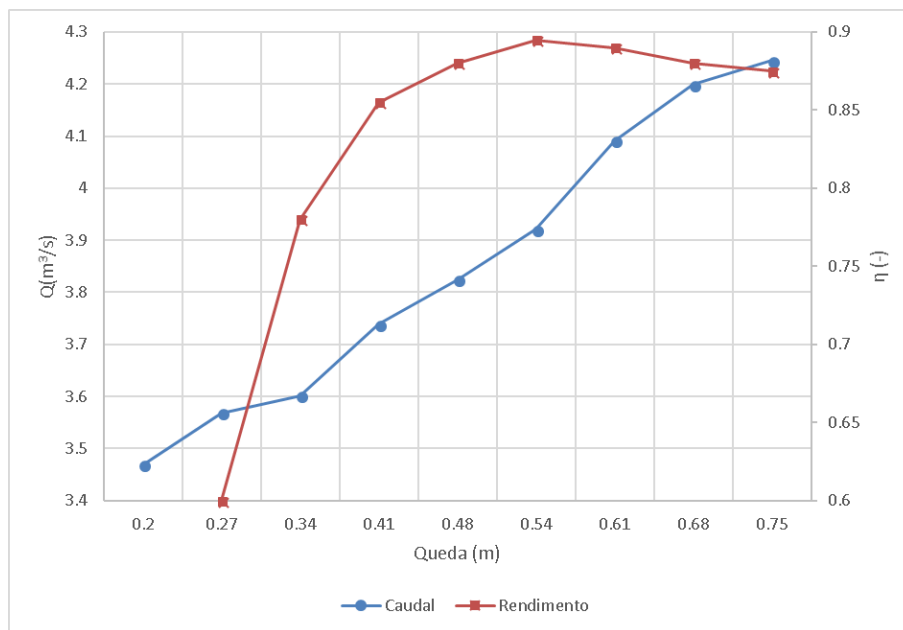


Figura C4 – Curva característica da turbina 4T1 (D=1.4 m).

Tabela C5 – Curva característica da turbina 4T2 (D=0.63 m).

H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	$\eta$ (-)
0.75	1.008875	0.87
0.91	1.085267	0.88
1.06	1.158116	0.885
1.22	1.22424	0.89
1.38	1.27865	0.895
1.53	1.335208	0.898
1.69	1.381575	0.899
1.84	1.424888	0.898
2	1.472761	0.897

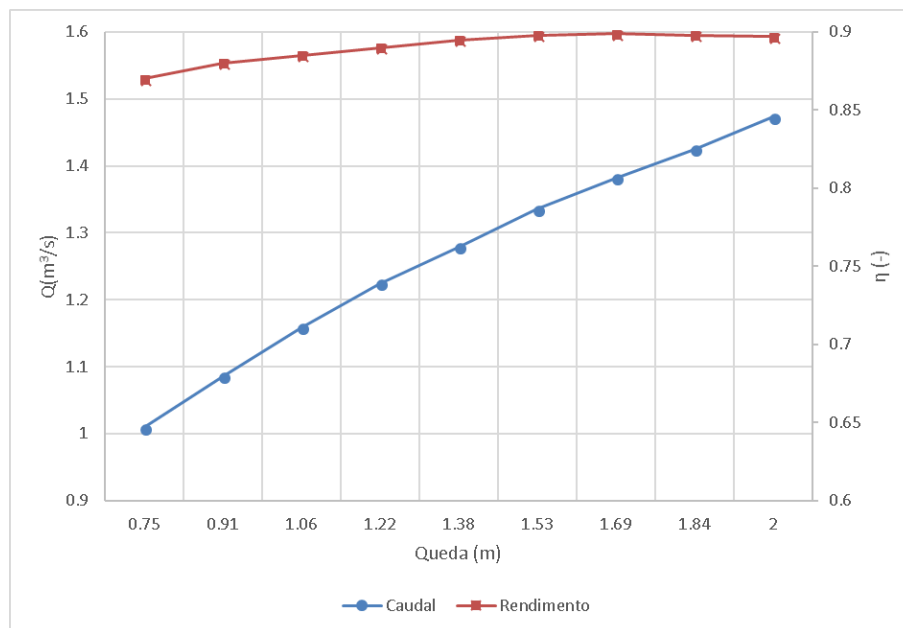


Figura C5 – Curva característica da turbina 4T2 (D=0.63 m).

Tabela C6 – Curva característica da turbina 4T3 (D=0.36 m).

H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	η (-)
2	0.540054	0.875
2.16	0.55491	0.88
2.31	0.568161	0.885
2.47	0.579047	0.89
2.63	0.591987	0.892
2.78	0.602018	0.894
2.94	0.611768	0.895
3.09	0.625092	0.896
3.25	0.636728	0.897

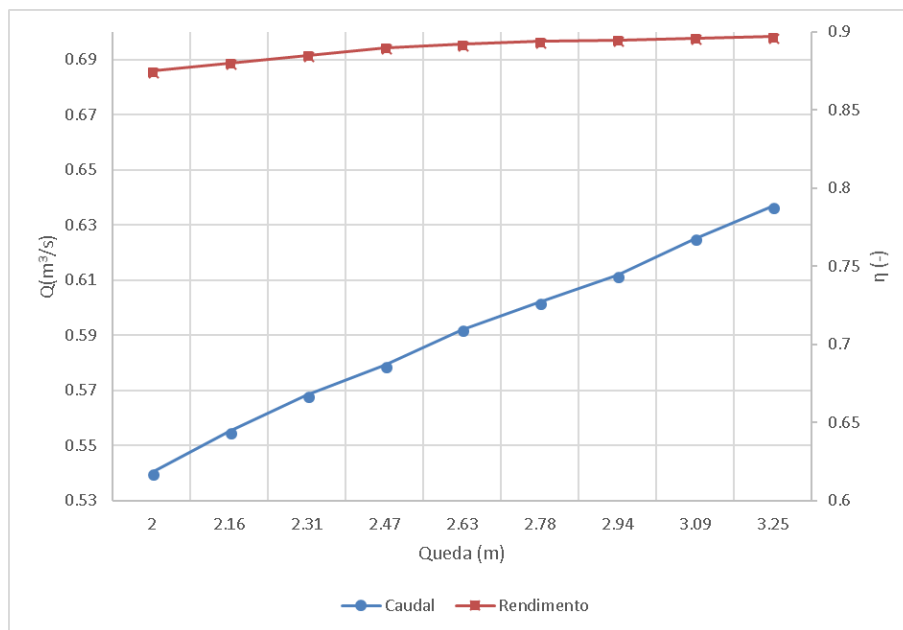


Figura C6 – Curva característica da turbina 4T3 (D=0.36 m).



Tabela C7 – Curva característica da turbina 4T4 (D=0.2 m).

H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	$\eta$ (-)
3.25	0.21248	0.875
3.47	0.217227	0.88
3.69	0.221438	0.885
3.91	0.224807	0.89
4.13	0.229042	0.892
4.34	0.232208	0.894
4.56	0.235317	0.895
4.78	0.239843	0.896
5	0.243754	0.897

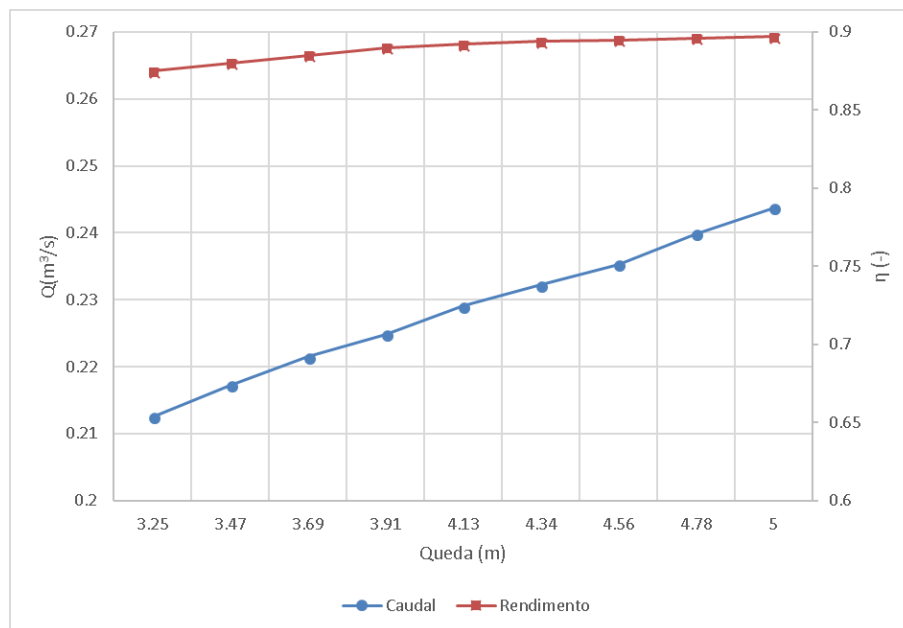


Figura C7 – Curva característica da turbina 4T4 (D=0.2 m).

Tabela C8 – Curva característica da turbina 5T1 (D=1.14 m).

H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	$\eta$ (-)
0.2	2.3	0
0.3	2.5	0.6
0.4	2.6	0.78
0.5	2.75	0.855
0.6	2.85	0.88
0.7	2.95	0.895
0.8	3.1	0.89
0.9	3.2	0.88
1	3.25	0.875

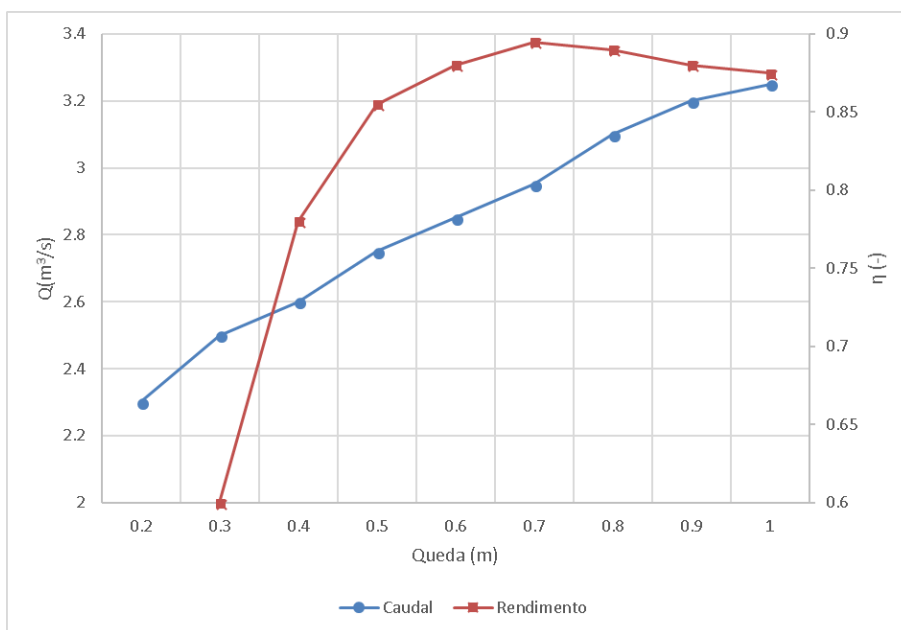


Figura C8 – Curva característica da turbina 5T1 (D=1.14 m).

Tabela C9 – Curva característica da turbina 5T2 (D=0.51 m).

H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	η (-)
1.2	0.836289	0.87
1.34	0.86401	0.88
1.48	0.894217	0.885
1.61	0.922823	0.89
1.75	0.945319	0.895
1.89	0.971468	0.898
2.03	0.9918	0.899
2.16	1.011269	0.898
2.3	1.035	0.897

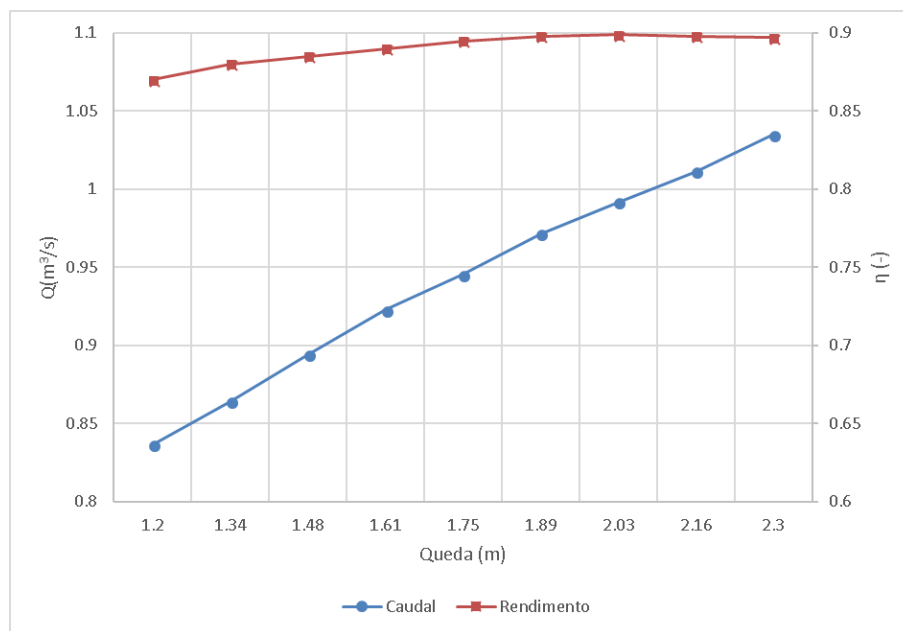


Figura C9 – Curva característica da turbina 5T2 (D=0.51 m).

Tabela C10 – Curva característica da turbina 5T3 (D=0.28 m).

H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	$\eta$ (-)
1.2	0.836289	0.87
1.34	0.86401	0.88
1.48	0.894217	0.885
1.61	0.922823	0.89
1.75	0.945319	0.895
1.89	0.971468	0.898
2.03	0.9918	0.899
2.16	1.011269	0.898
2.3	1.035	0.897

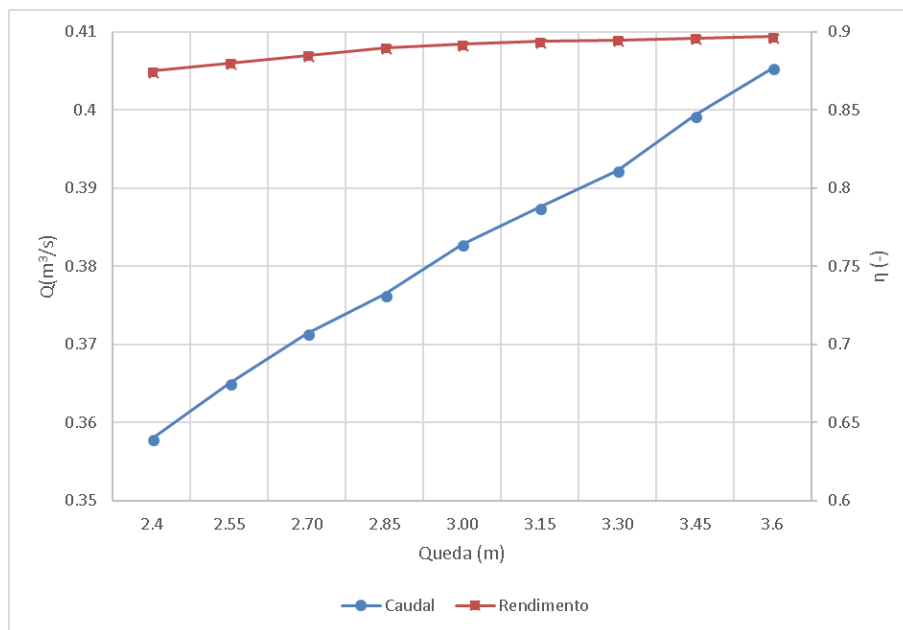


Figura C10 – Curva característica da turbina 5T3 (D=0.28 m).

Tabela C11 – Curva característica da turbina 5T4 (D=0.18 m).

H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	$\eta$ (-)
3.6	0.181139	0.875
3.75	0.182948	0.88
3.90	0.18446	0.885
4.05	0.185414	0.89
4.20	0.187203	0.892
4.35	0.188224	0.894
4.50	0.189297	0.895
4.65	0.191588	0.896
4.8	0.193452	0.897

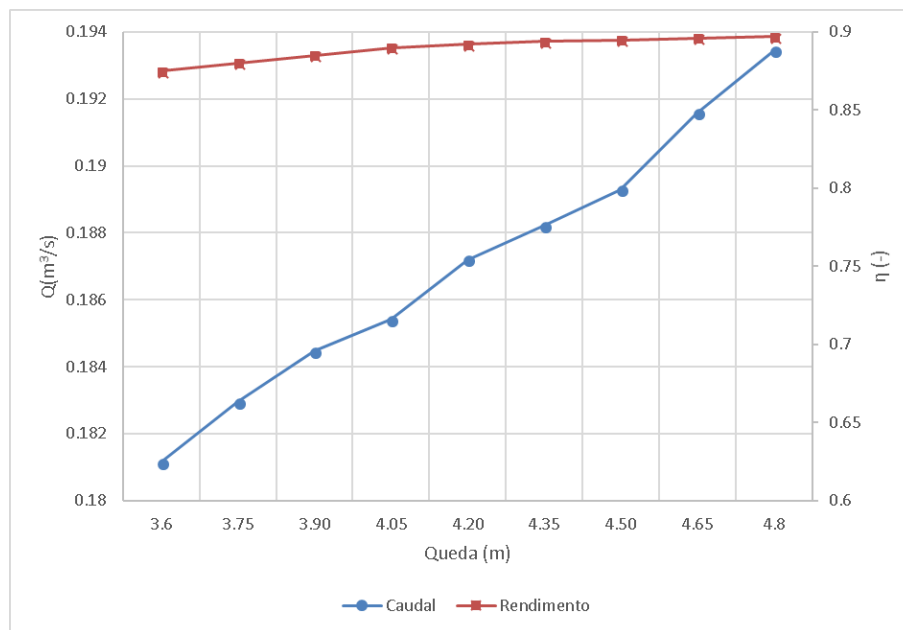


Figura C11 – Curva característica da turbina 5T4 (D=0.18 m).

Tabela C12 – Curva característica da turbina 5T5 (D=0.105 m).

H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	η (-)
5.4	0.075491	0.875
5.525	0.075564	0.88
5.65	0.075549	0.885
5.775	0.07534	0.89
5.9	0.0755	0.892
6.025	0.075377	0.894
6.15	0.075302	0.895
6.275	0.075732	0.896
6.4	0.076011	0.897

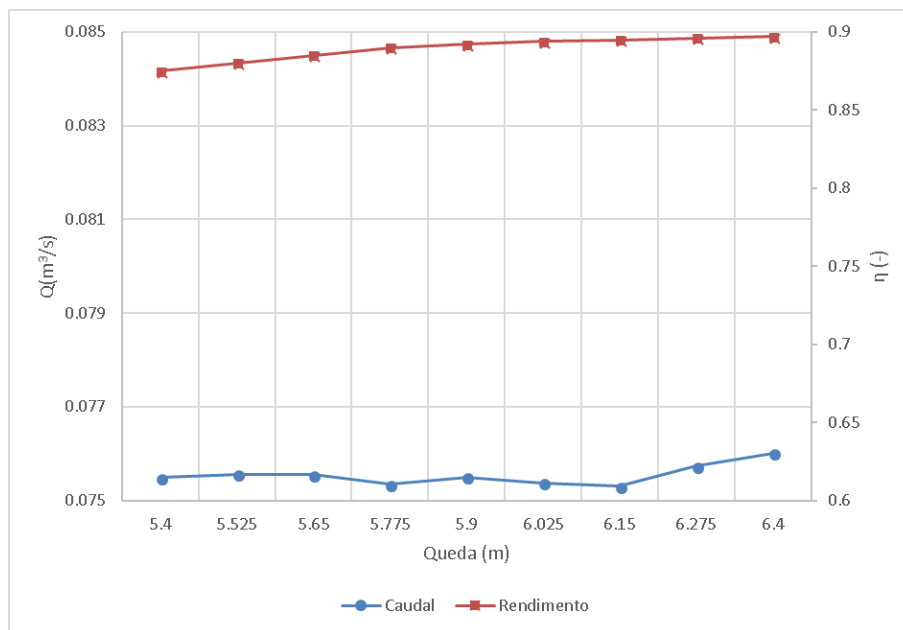


Figura C12 – Curva característica da turbina 5T5 (D=0.105 m).

**ANEXO D: MODELO FÍSICO DO DISPOSITIVO HÍBRIDO UTILIZADO NOS TESTES EXPERIMENTAIS**

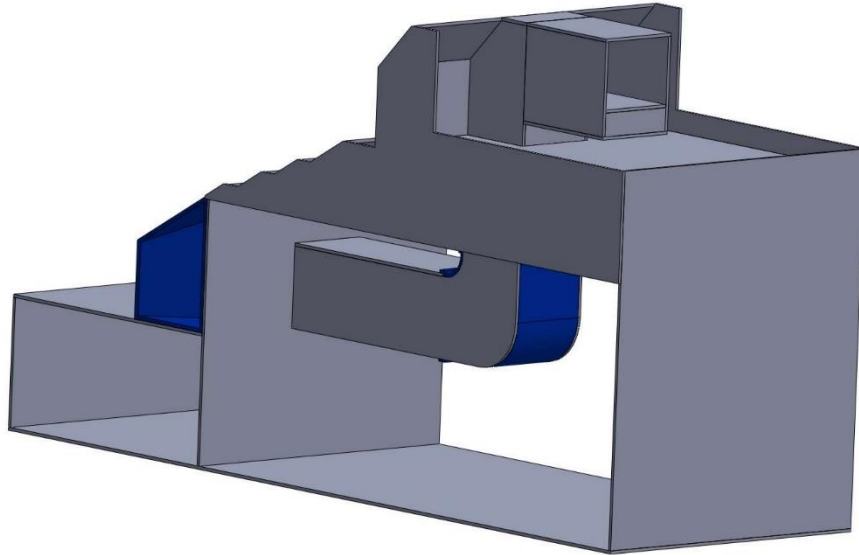


Figura D1 – Vista lateral do modelo desenhado em SolidWorks®.

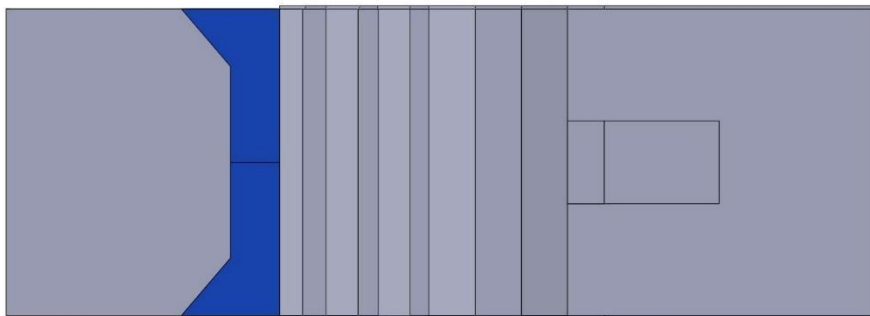


Figura D2 – Vista em planta do modelo desenhado em SolidWorks®.

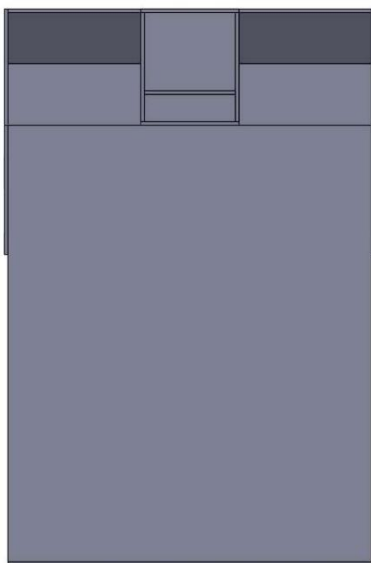


Figura D3 – Vista de trás do modelo desenhado em SolidWorks®.

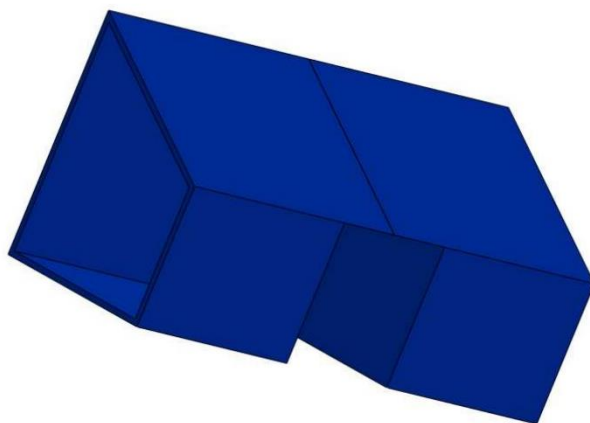


Figura D4 – Peça associada à geometria A do dispositivo desenhada em SolidWorks® e construída por impressão 3D.



**ANEXO E: VARIAÇÃO DO NÍVEL DA SUPERFÍCIE LIVRE DA ÁGUA DENTRO DA CAO PARA OS PERÍODOS DE 6 A 14 S**

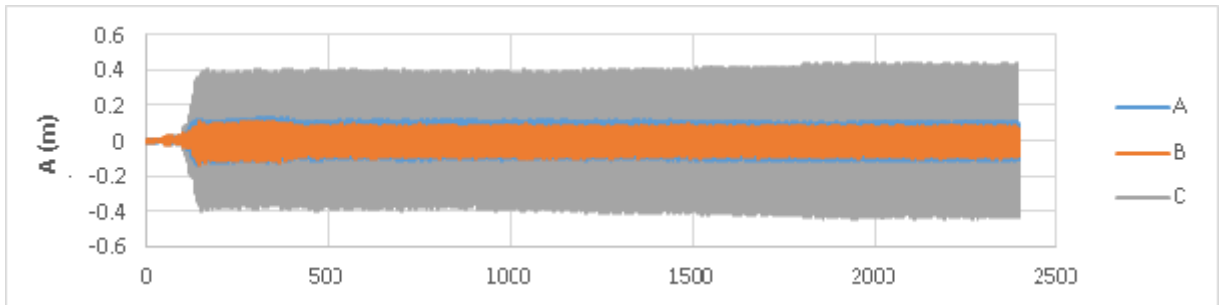


Figura E1 – Amplitude de variação do nível da superfície livre da água dentro da câmara para T=6s.

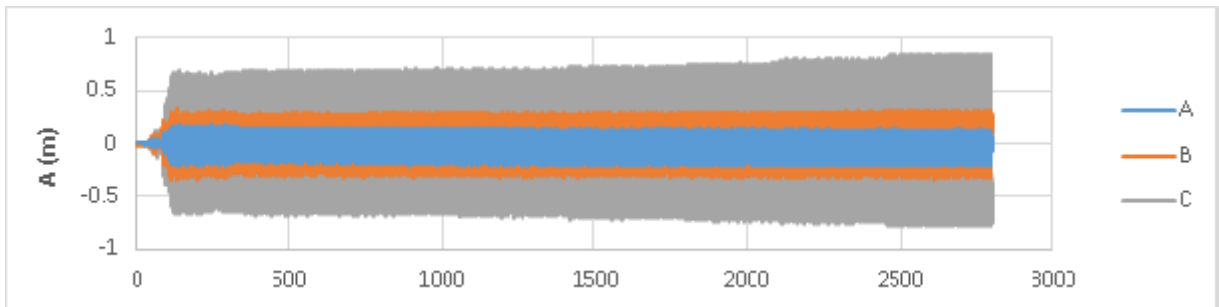


Figura E2 – Amplitude de variação do nível da superfície livre da água dentro da câmara para T=7s.

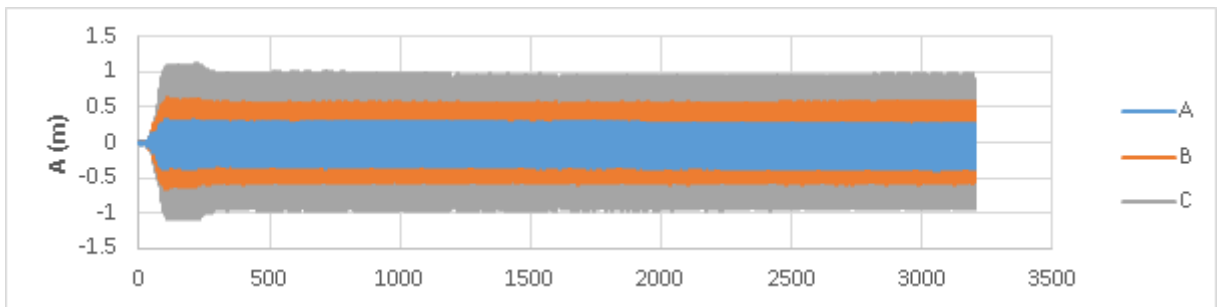


Figura E3 – Amplitude de variação do nível da superfície livre da água dentro da câmara para T=8s.

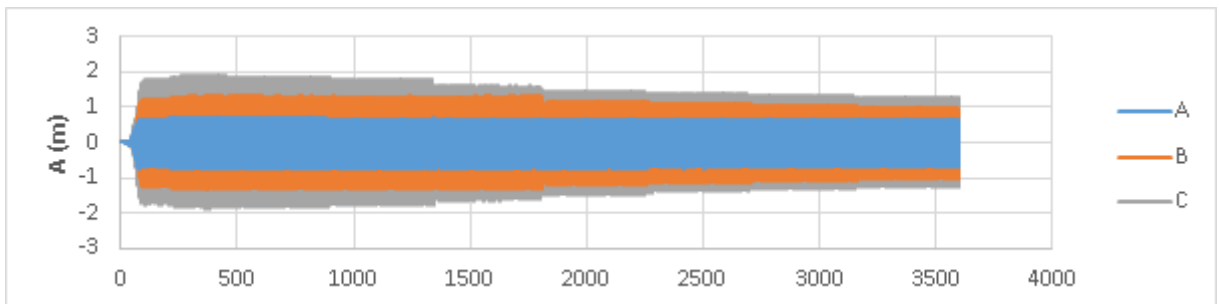


Figura E4 – Amplitude de variação do nível da superfície livre da água dentro da câmara para T=9s.

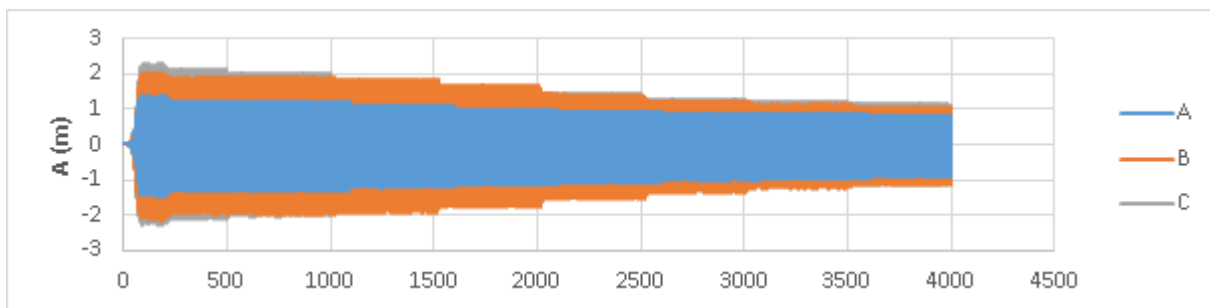


Figura E5 – Amplitude de variação do nível da superfície livre da água dentro da câmara para T=10s.

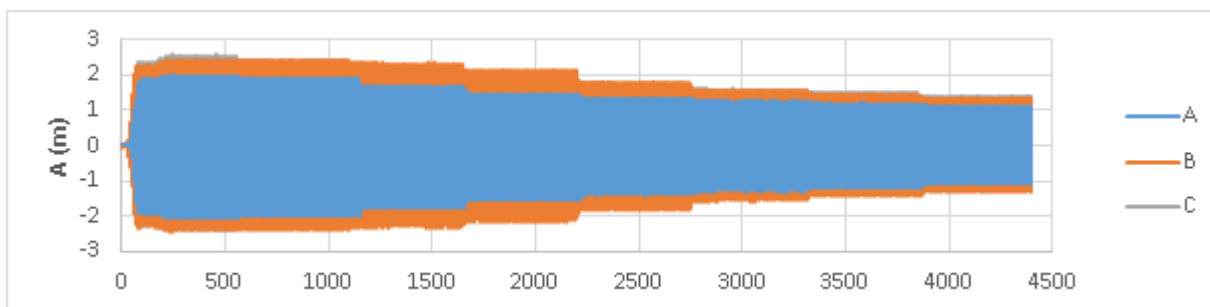


Figura E6 – Amplitude de variação do nível da superfície livre da água dentro da câmara para T=11s.

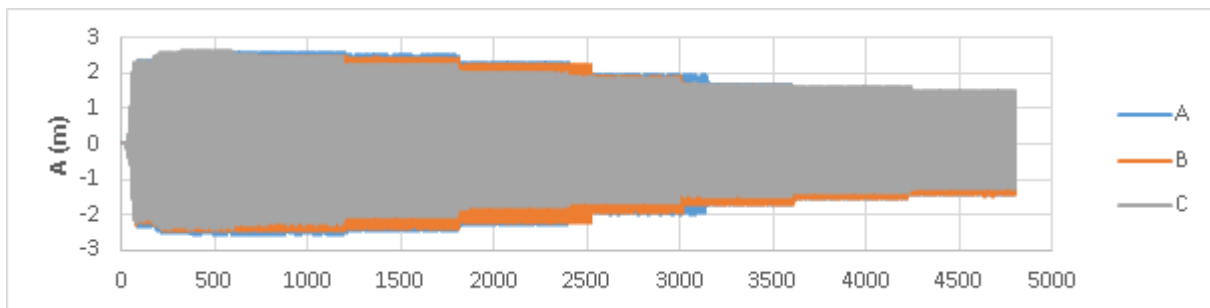


Figura E7 – Amplitude de variação do nível da superfície livre da água dentro da câmara para T=12s.

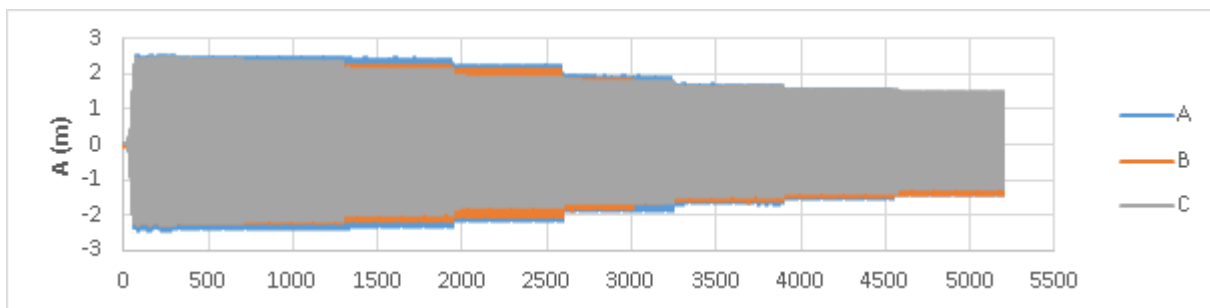


Figura E8 – Amplitude de variação do nível da superfície livre da água dentro da câmara para T=13s.

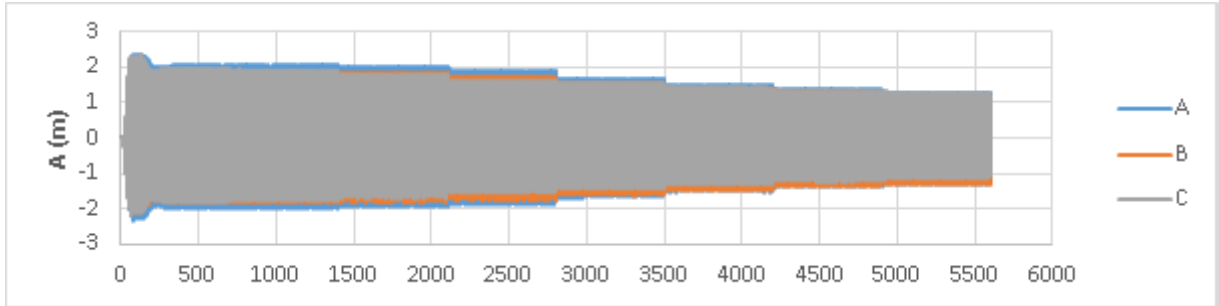


Figura E9 – Amplitude de variação do nível da superfície livre da água dentro da câmara para T=14s.