

OTIMIZAÇÃO DO CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS CECO

GONÇALO MIGUEL SOUSA COELHO

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

Orientador: Professor Doutor Paulo Jorge Rosa Santos

Coorientador: Professor Doutor Francisco de Almeida Taveira Pinto

JULHO 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

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

🌐 <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.

Aos meus Pais

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível graças a várias pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para o sucesso alcançado, das quais algumas foram imprescindíveis e merecem que expresse aqui o meu profundo e sincero agradecimento.

Em primeiro lugar, aos meus pais, que não consigo transmitir por palavras tudo aquilo que fizeram e continuaram a fazer por mim. A eles, o meu mais sincero e profundo agradecimento por me terem proporcionado esta oportunidade, acompanhando-me e garantindo todas as condições necessárias para que tudo isto fosse possível.

Um profundo agradecimento ao Professor Doutor Paulo Jorge Rosa Santos, por ter orientado de forma incansável a presente dissertação. Uma palavra de apreço ainda por todo o acompanhamento, ajuda, ensinamentos, motivação e paciência que demonstrou no decorrer deste trabalho. A ele, deixo aqui o meu sincero obrigado.

Ao professor Doutor Francisco de Almeida Taveira Pinto, coorientador do presente trabalho, pela disponibilidade demonstrada para o esclarecimento de qualquer questão e por ter garantido todas as condições de trabalho e meios necessários para o sucesso desta dissertação. A ele, o meu muito obrigado.

Ao professor Doutor Cláudio Alexis Rodríguez Castillo pela grande ajuda prestada, e por todos os seus contributos para o presente trabalho. A ele, um profundo obrigado.

Ao Professor Doutor Hélio Mendes de Sousa Mendonça e ao Professor Doutor António Paulo Gomes Mendes Moreira do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da FEUP pela disponibilidade e enorme ajuda prestada em todas as questões relacionadas com o sistema de reprodução do *Power Take Off* e sistema de monitorização do mesmo. A ele, um sincero obrigado.

Ao Sr. Miguel pela prontidão, vontade, ajuda e empenho demonstrado durante toda a fase de construção do modelo físico. A ele, deixo aqui o meu profundo obrigado.

Ao Daniel, pela ajuda prestada com a operação de todos os sistemas e equipamentos necessários para a realização dos trabalhos experimentais.

Um grande obrigado aos meus amigos que me acompanharam ao longo destes anos, especialmente ao Francisco Restivo, Filipa Santana, Renato Gaspar, Filipe José e Beatriz Osório pela ajuda durante os testes experimentais.

Devo ainda um profundo agradecimento a todos os professores que me acompanharam durante o meu percurso académico e à Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (SHRHA) pelas condições que me proporcionaram, disponibilizando todos os meios necessários para a concretização e sucesso do presente trabalho.

.

RESUMO

Esta dissertação insere-se no projeto de investigação e desenvolvimento “OPWEC – Otimização de Conversores de Energia das Ondas” e tem como principal objetivo o estudo experimental, em tanque de ondas, de uma versão otimizada do dispositivo conversor da energia das ondas CECO.

O modelo físico do dispositivo CECO estudado neste trabalho incluiu vários melhoramentos em relação às versões anteriores, fundamentalmente a nível da geometria dos seus módulos laterais flutuantes e das características do sistema de extração de energia, procurando-se assim melhorar a sua eficiência para as condições de agitação marítima típicas da costa oeste portuguesa.

De forma a complementar os trabalhos anteriores sobre o CECO, e tendo sempre por base os contributos dos mesmos para o estado atual do dispositivo, a presente dissertação foi dividida em quatro fases. A primeira fase consistiu na escolha de uma nova geometria para os módulos laterais flutuantes do CECO que permitisse ajustar o seu período de oscilação natural às condições de agitação pretendidas e de um sistema de reprodução do *Power Take-Off* apropriado.

A segunda fase consistiu na construção de um novo modelo físico do CECO à escala 1/25, tendo sido introduzidas várias alterações e melhoramentos a nível das diversas componentes do dispositivo.

Na terceira fase foi caracterizado o sistema utilizado na reprodução do PTO. Por fim, na quarta fase, o modelo físico construído foi testado no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da SHRHA da FEUP, para diversas condições de agitação marítima, tendo sido analisada a influência do nível de amortecimento do sistema de reprodução do PTO e da inclinação do CECO no seu desempenho.

No estudo experimental foram utilizadas várias ferramentas e técnicas avançadas de medição e análise de dados, que permitiram o estudo do comportamento do dispositivo para as várias condições de teste consideradas. O desempenho deste dispositivo foi analisado com base nos valores da potência instantânea absorvida, estimados quer com base na medição direta da diferença de potencial nos polos do gerador, quer, por via indireta, utilizando as séries temporais da velocidade do dispositivo e na aplicação das curvas de desempenho do sistema de reprodução do PTO, determinadas também no presente trabalho.

A potência média útil absorvida pelo dispositivo alcançou os 116,19 kW, tendo-se estimado uma potência média total 148.66 kW com base na potência dissipada no gerador. Os valores da largura de captura relativa variaram alcançaram os 44,50% (valores no protótipo, obtidos a partir da medição direta da potência instantânea absorvida).

Neste trabalho foram analisadas as conclusões resultantes de trabalhos anteriores e são também apresentados novos resultados experimentais e conclusões que poderão constituir o ponto de partida para futuros desenvolvimentos do dispositivo. Os dados experimentais obtidos permitirão a validação de novos modelos numéricos.

PALAVRAS-CHAVE: energias renováveis, energia das ondas, modelação física, *Power Take Off*, potência absorvida.

ABSTRACT

This dissertation is part of the research and development project "OPWEC - Optimization of Wave Energy Converters" and its main objective is the experimental study, in a wave tank, of an optimized version of the wave energy converter CECO.

The physical model of the CECO device studied in this work included several improvements over previous versions, mainly in terms of the geometry of its floating side modules and the characteristics of the energy extraction system, to improve its efficiency for typical conditions of the Portuguese west coast.

To complement the previous work on the CECO, and always based on the contributions of the same to the current state of the device, this dissertation was divided into four phases. The first phase consisted in the choice of a new geometry for the CECO floating side modules that allowed to adjust its natural oscillation period to the desired agitation conditions and an appropriate Power Take-Off reproduction system.

The second phase consisted on the construction of a new physical model of the CECO at scale 1/25, with several changes and improvements made to the various components of the device.

In the third phase the system used to reproduce the PTO was characterized. Finally, in the fourth phase, the built physical model was tested in the wave tank of the SHRHA Hydraulic Laboratory of FEUP, for several sea agitation conditions, and was also analyzed the influence of the damping level of the PTO in the performance of CECO.

In the experimental study, several tools, advanced data measurement and analysis techniques were used, which allowed the study of the behavior of the device for the various test conditions considered. The performance of this device was analyzed based on the values of the instantaneous power absorbed, estimated either based on the direct measurement of the potential difference at the generator poles or, indirectly, using the time series of the device speed and the application of the performance curves of the PTO reproduction system, also determined in the present work.

The average useful power absorbed by the device reached 116.19 kW, and a total average power of 148.66 kW was estimated based on the power dissipated in the generator. The values of the relative capture width reached 44.50% (values in the prototype, obtained from the direct measurement of the absorbed instantaneous power).

In this work, the conclusions resulting from previous work were analyzed. It's also presented new experimental results and conclusions that may be the starting point for future developments of the device. The experimental data obtained will allow the validation of new numerical models.

KEYWORDS: renewable energy, wave energy, physical modelling, Power Take Off, absorbed power.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO.....	III
ABSTRACT.....	V

1 INTRODUÇÃO.....1

1.1. ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	1
1.1.1. INTRODUÇÃO	1
1.1.2. ENERGIA RENOVÁVEIS EM PORTUGAL.....	1
1.2. ENQUADRAMENTO DO TEMA E OBJETIVOS DO TRABALHO.....	3
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3

2 SISTEMAS DE APROVEITAMENTO DE ENERGIA DAS ONDAS5

2.1. ENQUADRAMENTO BREVE.....	5
2.2. CLASSIFICAÇÃO DOS DISPOSITIVOS DE APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS	6
2.2.1. INTRODUÇÃO	6
2.2.2. CLASSIFICAÇÃO DOS DISPOSITIVOS	6
2.2.2.1. Distância à Costa	6
2.2.2.2. Dimensão e/ou Orientação do Dispositivo	7
2.2.2.3. Modo de Funcionamento.....	8
2.3. POWER TAKE-OFF.....	9
2.3.1. INTRODUÇÃO	9
2.3.2. TIPOS DE POWER TAKE-OFF	10
2.3.2.1. Turbina de Ar.....	10
2.3.2.2. Sistemas Hidráulicos.....	11
2.3.2.3. Turbinas Hidráulicas.....	11
2.3.2.4. Sistemas de Transmissão Mecânica	12
2.3.2.5. PTO Linear	13
2.3.3. CONTROLO	13
2.3.3.1. Introdução	13
2.3.3.2. Estratégias de Controlo.....	14

3 DISPOSITIVO CECO	17
3.1. INTRODUÇÃO	17
3.2. DESCRIÇÃO GERAL DO CECO	17
3.2.1. CONSTITUIÇÃO DO CECO	17
3.2.2. DESCRIÇÃO DOS PRINCIPAIS COMPONENTES DO CECO	20
3.2.2.1. Módulos Laterais Móveis.....	20
3.2.2.2. Corpo Central Fixo	20
3.2.2.3. Tirantes.....	20
3.2.3. MODO DE FUNCIONAMENTO DO CECO	21
3.3. ANÁLISE CRÍTICA E SÍNTESE DE TRABALHOS ANTERIORES.....	22
4 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL	37
4.1. INTRODUÇÃO.....	37
4.2. TANQUE DE ONDAS	38
4.3. SISTEMA DE GERAÇÃO DE ONDAS	38
4.4. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE AGITAÇÃO MARÍTIMA.....	40
4.5. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE MOVIMENTOS	42
4.6. SISTEMA DE REPRODUÇÃO DO PTO	43
4.7. SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DO PTO	45
4.8. MODELAÇÃO FÍSICA	48
4.8.1. INTRODUÇÃO	48
4.8.2. CRITÉRIOS DE SEMELHANÇA	48
4.9. MODELO FÍSICO DO CECO	52
4.9.1. INTRODUÇÃO	52
4.9.2. ESCALA GEOMÉTRICA	52
4.9.3. DIMENSÕES DO MODELO	53
4.9.4. CONSTRUÇÃO DO MODELO FÍSICO.....	57
4.9.4.1. Introdução	57
4.9.4.2. Módulos Laterais Móveis.....	57
4.9.4.3. Elemento anelar estrutural e tirantes	61
4.9.4.4. Base de fixação	68
4.9.4.5. Corpo central fixo e sistema de guiamento dos tirantes	70

5 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL	75
5.1. INTRODUÇÃO	75
5.2. PLANO DE TESTES	75
5.3. CARATERIZAÇÃO DO SISTEMA DE REPRODUÇÃO DO PTO.....	79
5.3.1. CURVAS DE DESEMPENHO DO SISTEMA PTO.....	80
5.3.2. POTÊNCIA ABSORVIDA – MÉTODO INDIRETO.....	82
5.3.3. POTÊNCIA ABSORVIDA – MÉTODO DIRETO.....	83
5.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	84
5.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	90
5.5.1. INTRODUÇÃO	90
5.5.2. ANÁLISE DOS MOVIMENTOS DO DISPOSITIVO CECO.....	91
5.5.3. POTÊNCIA ABSORVIDA	97
5.5.3.1. Introdução	97
5.5.3.2. Potência teórica da onda	97
5.5.3.3. Potência Absorvida – Método Direto.....	98
5.5.3.4. Potência Absorvida – Método Indireto	105
5.5.4. EFICIÊNCIA DO DISPOSITIVO	108
 6 SÍNTESE, CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS	
FUTUROS.....	115
6.1. SÍNTESE E CONCLUSÕES	115
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	116
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119
 ANEXOS	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Evolução da Potência Instalada do Parque electroprodutor português (adaptado de Associação Portuguesa de Energias Renováveis, 2018).....	2
Figura 1.2 - Peso das diferentes fontes na produção de eletricidade em Portugal no ano 2017	2
Figura 2.1 - Distribuição global da potência média anual de energia das ondas (Cornett, 2008)	6
Figura 2.2 - Classificação dos dispositivos quanto à linha de costa (adaptado de Teixeira, 2012)	7
Figura 2.3 - Classificação dos dispositivos quanto à sua orientação e/ou dimensão (adaptado de Marinheiro, 2013).....	8
Figura 2.4 - Classificação dos conversores de energia das ondas (adaptado de López et al., 2018) ...	9
Figura 2.5 - Processos de conversão da energia das ondas em energia elétrica (adaptado de Pecher e Kofoed, 2017)	10
Figura 2.6 - Esquema de um dispositivo de CAO (Pecher e Kofoed, 2017)	10
Figura 2.7 - Exemplo de PTO hidráulico (adaptado de Pecher e Kofoed, 2017)	11
Figura 2.8 – Ilustração do princípio de funcionamento de um aproveitamento de energia das ondas por galgamento (adaptado de Goulart <i>et al.</i> , 2016).....	12
Figura 2.9 - Esquema de um PTO de transmissão mecânica (adaptado de Pecher e Kofoed, 2017). ..	12
Figura 2.10 - Exemplo de um PTO linear (adaptado de Pecher e Kofoed, 2017)	13
Figura 3.1 - Vista superior do CECO	18
Figura 3.2 - Vista frontal do CECO.....	19
Figura 3.3 - Vista lateral do CECO.....	19
Figura 3.4 - Vista lateral do CECO em posição de funcionamento	19
Figura 3.5 - Perspetiva para fixação horizontal do dispositivo CECO	19
Figura 3.6 - Perspetiva para fixação vertical do dispositivo CECO	19
Figura 3.7 - Perspetiva para unidades CECO de grandes dimensões	19
Figura 3.8 - Esquema representativo do funcionamento do dispositivo quando atingido pela cava (à esquerda) e pela crista da onda (à direita), (adaptado de Marinheiro, 2013)	21
Figura 3.9 - Vista frontal do modelo físico (medidas em centímetros) (adaptado de Teixeira, 2012) ..	22
Figura 3.10 - Vista lateral do modelo físico (medidas em centímetros) (adaptado de (Teixeira, 2012))	22
Figura 3.11 - Vista superior do modelo físico (medidas em centímetros) (adaptado de (Teixeira, 2012)).	23
Figura 3.12 - Vista de frente (adaptado de Marinheiro,2013).	24
Figura 3.13 - Vista de frente (medidas em cm) (adaptado de Marinheiro,2013).	24
Figura 3.14 - Vista lateral (adaptado de Marinheiro,2013).	24
Figura 3.15 - Vista lateral (medidas em cm) (adaptado de Marinheiro,2013).	24

Figura 3.16 - Vista superior (adaptado de Marinheiro,2013).	25
Figura 3.17 - Vista superior (medidas em cm) (adaptado de Marinheiro,2013).	25
Figura 3.18 - Potência média anual por metro de onda durante 2005-2014 (adaptado de Ramos et al., 2018).	26
Figura 3.19 - Esquema representativo de uma possível solução para o ajuste do dispositivo CECO em função do nível de maré e direção de propagação da agitação marítima (adaptado de Marinheiro, 2013).	27
Figura 3.20 - Localização das áreas estudadas (adaptado de López, 2018)	28
Figura 3.21 - Matrizes com o recurso energia das ondas a diferentes profundidades de água para as Áreas 1, 2 e 3. Mapa de energia a cores (MWhm ⁻¹); Números (número de horas de ocorrência anuais) (adaptado de López et al., 2018).	29
Figura 3.22 - Matrizes de potência absorvida pelo CECO para diferentes profundidades de água (adaptado de Ramos et al., 2018).	30
Figura 3.23 - Distribuição média anual da CE ao longo da área em estudo (adaptado de Ramos (2018))	31
Figura 3.24 - Distribuição média anual da CEEff ao longo da área em estudo (adaptado de Ramos et al., 2018).	31
Figura 3.25 - Valores Mensais de Energia Capturada (MWh) para as Áreas 1,2 e 3 (adaptado de Ramos (2018))	33
Figura 3.26 - Valores mensais da Eficiência da Energia Capturada para Área 1, 2 e 3 (adaptado de Ramos (2018))	33
Figura 3.27 - Energia das ondas absorvida pelo CECO num ano médio para diferentes inclinações do PTO (adaptado de López et al., 2018)	34
Figura 4.1 - Sistema de geração de ondas do LH da FEUP.....	39
Figura 4.2 - Sala de controlo	40
Figura 4.3 - Esquema da instalação das sondas durante a fase de calibração das condições de agitação	41
Figura 4.4 - Sondas de níveis hidrodinâmicos (montadas em tripés).....	41
Figura 4.5 - MOT-DC-42-M-A-D e o respetivo cabo de ligação.....	44
Figura 4.6 - Motor com a caixa redutora de 10x (à esquerda) e motor de caixa de redutora de 24x (à direita).	45
Figura 4.7 – Board, microcomputador e router de ligação do Sistema de Monitorização do PTO.	46
Figura 4.8 - Interface da aplicação para computador.	47
Figura 4.9 - Board do sistema de monitorização do PTO.	47
Figura 4.10 - Síntese das diferentes geometrias para os flutuadores laterais modeladas (Rodríguez et al.,2018)	54
Figura 4.11 - Vista Frontal do CECO	55
Figura 4.12 - Vista Frontal do CECO (medidas em milímetros)	55

Figura 4.13 - Vista superior do CECO	56
Figura 4.14 - Vista superior do CECO (medidas em milímetros).....	56
Figura 4.15 - Vista lateral do CECO	56
Figura 4.16 - Vista lateral do CECO (medidas em milímetros).....	56
Figura 4.17 - Perspetiva do modelo físico construído	56
Figura 4.18 - Secção transversal dos módulos laterais móveis.....	57
Figura 4.19 - Molde de Madeira usado para a moldagem dos módulos laterais móveis	58
Figura 4.20 - Peças de acrílico antes de serem cortadas.....	58
Figura 4.21 - Desenho Auxiliar para construção dos MLMs	59
Figura 4.22 - Diferentes partes do módulo lateral móvel	60
Figura 4.23 - Módulos laterais móveis no final do processo de construção	61
Figura 4.24 - Vista frontal do elemento anelar estrutural e tirantes (medidas em milímetros)	61
Figura 4.25 - Vista lateral do elemento anelar estrutural e tirante (medidas em milímetros)	61
Figura 4.26 - Perspetiva do elemento anelar estrutural e tirantes.	62
Figura 4.27 - Placas de ajuste da inclinação do MLMs	62
Figura 4.28 – Equipamento de furação (à esquerda) e equipamento de corte (à direita)	63
Figura 4.29 - Barras constituintes da estrutura	64
Figura 4.30 - Soldagem da estrutura	65
Figura 4.31 - Esquema de encaixe dos parafusos.....	65
Figura 4.32 - Pormenor de encaixe dos parafusos de fixação das barras laterais.....	66
Figura 4.33 - Partes constituintes do elemento anelar estrutural.	67
Figura 4.34 - Correia sincronizadora instalada no superior tirante quadrado.....	67
Figura 4.35 - Representação da variação da altura da base (medidas em mm).....	68
Figura 4.36 - Sistema de compensação da altura na base do modelo.....	69
Figura 4.37 - Esquema do sistema de rotação na base do dispositivo	69
Figura 4.38 - Tubo PVC com a furação para os tirantes	70
Figura 4.39 - Esquema do sistema de fixação do corpo central fixo (vista frontal) (adaptado de Marinheiro, 2013).....	70
Figura 4.40 - Parte inferior do sistema de guiamento dos tirantes	71
Figura 4.41 - Sistema de guiamento dos tirantes inicial.	72
Figura 4.42 - Posicionamento dos dois discos com as roldanas e os tirantes inferiores.	72
Figura 4.43 - Nova solução de guiamento dos tirantes.	73
Figura 4.44 - Pormenor do guiamento do tirante superior.	73
Figura 4.45 - Corpo central fixo com elemento anelar estrutural e tirantes montados.	73

Figura 5.1 - Condições de agitação marítima vs. condições limite da instalação experimental para ondas regulares	77
Figura 5.2 - Condições de agitação marítima vs. condições limite da instalação experimental para ondas irregulares	77
Figura 5.3 - Esquema da Instalação experimental para a caracterização da força de amortecimento aplicada pelo sistema de reprodução do PTO (adaptado de Teixeira, 2012)	80
Figura 5.4 – Deslocamento do peso as segundo as componentes x, y e z obtido com o sistema Qualisys num ensaio de caracterização do sistema de reprodução do PTO.....	81
Figura 5.5 - Velocidades segundo as componentes x, y e z obtidos com o sistema Qualisys num ensaio de caracterização do sistema de reprodução do PTO.	81
Figura 5.6 - Acelerações segundo as componentes x, y e z obtidos com o sistema <i>Qualisys</i> num ensaio de caracterização do sistema de reprodução do PTO.	82
Figura 5.7 - Marcas refletoras aplicadas no CECO	85
Figura 5.8 - Janelas de Visualização da captura das três câmaras utilizadas	85
Figura 5.9 - Esquema da instalação das sondas, câmaras e modelo físico durante a fase de testes.....	86
Figura 5.10 - Estrutura em "L" ao lado do modelo com as marcas refletoras tapadas	86
Figura 5.11 - Resultado final de uma calibração do sistema Qualisys	87
Figura 5.12 - Variação temporal do resíduo médio das medições realizadas pelo Qualisys	87
Figura 5.13 – Sistema de eixos global e sistema de eixo local do dispositivo (a amarelo).....	88
Figura 5.14 – Exemplo do resultado da calibração das sondas	88
Figura 5.15 - Tabela com os diferentes fatores de correlação de uma calibração das quatro sondas	89
Figura 5.16 - Trecho de uma série temporal da elevação da superfície livre registada num teste com agitação irregular: $T_p = 13$ s; $H_s = 1.5$ m	89
Figura 5.17 - Trecho de uma série temporal da elevação da superfície livre registada num teste com agitação regular: $T = 13$ s; $H = 1.0$ m	89
Figura 5.18 - Espetros de energia para diferentes estados de agitação irregular	90
Figura 5.19 - Movimentos de um navio segundo os seus 6 graus de liberdade (adaptado de Santos, 2010)	91
Figura 5.20 - Trecho da série temporal dos movimentos do dispositivo CECO num teste com agitação irregular (valores de protótipo): $R = 100$ Ohms ; $i=45^\circ$; $H = 1.5$ m ; $T = 13$ s ..	92
Figura 5.21 - Trecho da série temporal dos movimentos do dispositivo CECO num teste com agitação regular (valores de protótipo): $R = 100$ Ohms ; $i=45^\circ$; $H = 1.0$ m ; $T = 13$ s	93
Figura 5.22 - Amplitude de avanço do dispositivo (valores de protótipo) para diferentes níveis de amortecimento do PTO e uma inclinação de 45° em testes realizados com agitação regular ($T = 10$ s e $H = 2$ m)	94

Figura 5.23 - Amplitude de avanço do dispositivo (valores de protótipo) para diferentes níveis de amortecimento do PTO e uma inclinação de 45° em testes realizados com agitação irregular ($T_p = 14.5$ s e $H_s = 2.5$ m).....	94
Figura 5.24 - Exemplo de uma série temporal de um teste de decaimento ($i = 45^\circ$; $R = 100$ Ohms) .	95
Figura 5.25 – Comparação da série temporal de um teste de decaimento para os dois cursos de tirante considerados ($i = 45^\circ$; $R = 100$ Ohms)	96
Figura 5.26 - Exemplo de séries temporais de testes de decaimento para uma inclinação do CECO de 45°.....	96
Figura 5.27 - Exemplo de uma série temporal da potência instantânea absorvida num teste realizado com agitação regular: $T = 10.0$ s; $H = 1.5$ m; $R = 100$ Ohms (valores no protótipo).....	98
Figura 5.28 - Exemplo de uma série temporal da potência instantânea absorvida num teste realizado com agitação irregular: $T_p = 10.0$ s; $H_s = 1.5$ m; $R = 100$ Ohms (valores no protótipo) ..	99
Figura 5.29 - Exemplo do desenvolvimento inicial de uma série temporal da potência instantânea absorvida num teste realizado com agitação regular ($T = 10.0$ s; $H = 1.5$ m; $R = 100$ Ohms (valores no protótipo)).	99
Figura 5.30 - Comparação da potência média útil absorvida pelo dispositivo para a inclinação de 30°.....	104
Figura 5.31 - Comparação da potência média útil absorvida pelo dispositivo para a inclinação de 45°.....	104
Figura 5.32 - Série temporal do movimento de avanço (em cima) e da velocidade de avanço (em baixo) do dispositivo CECO para uma inclinação de 45° e para o estado de agitação REG6 (valores no modelo).	106
Figura 5.33 - Série temporal da força de amortecimento (em cima) e da potência absorvida (em baixo) pelo dispositivo CECO para uma inclinação de 45° e para o estado de agitação REG6 (valores no modelo).	107
Figura 0.1 - Curva característica do Motor 10 para uma resistência externa mínima	125
Figura 0.2 - Curva característica do Motor 10 para uma resistência externa de 5.6 Ohms	125
Figura 0.3 - Curva característica do Motor 10 para uma resistência externa de 10 Ohms	125
Figura 0.4 - Curva característica do Motor 10 para uma resistência externa de 42 Ohms	126
Figura 0.5 - Curva característica do Motor 10 para uma resistência externa de 79.6 Ohms	126
Figura 0.6 - Curva característica do Motor 10 para uma resistência externa de 100 Ohms	126
Figura 0.7 - Curva característica do Motor 10 para uma resistência externa máxima	127
Figura 0.8 - Potência média das ondas mensal (entre 2005-2014) (adaptado de (Ramos <i>et al.</i> , 2018)	131

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Potencial regional teórico de potência das ondas (adaptado de Mork et al., 2010).....	5
Quadro 3.1 - Lista de todos as componentes do CECO (Teixeira, 2012)	18
Quadro 3.2 – Valores médios anuais de CE e CEE _{ff} para profundidades de funcionamento (30, 40 e 50 m) (adaptado de Ramos et al., 2018).....	32
Quadro 3.3 - Parâmetros das matrizes de potência para diferentes inclinações do dispositivo CECO (adaptado de López, 2018).....	34
Quadro 4.1 - Fases de desenvolvimento de WECs (adaptado de Heller, 2012).	37
Quadro 4.2 – Quadro síntese das características dos dois motores.	45
Quadro 4.3 - Exemplo de aplicação de alguns critérios de semelhança (adaptado de Taveira Pinto, 2011).	49
Quadro 4.4 - Fatores de escala obtidos a partir da semelhança de <i>Froude</i> (adaptado de Teixeira et al., 2012).	51
Quadro 4.5 - Comparação entre CECO40 e TURTLE40 (Rodríguez et al.,2018).....	55
Quadro 5.1 - Nome atribuído aos estados de agitação regulares.	78
Quadro 5.2 - Nome atribuído aos estados de agitação irregulares.	78
Quadro 5.3 - Quadro síntese das condições de teste estudadas.....	79
Quadro 5.4 - Regressões matemáticas obtidas a partir da caracterização do sistema de reprodução do PTO.....	83
Quadro 5.5 - Movimentos do dispositivo segundo os seus 6 graus de liberdade.	91
Quadro 5.6 - Potência teórica da onda para os estados de agitação irregulares usados nos ensaios realizados com a inclinação 45°.	98
Quadro 5.7 – Potências médias absorvidas pelo dispositivo para os diferentes estados de agitação irregular para uma inclinação de 30° do dispositivo.	100
Quadro 5.8 - Potências médias absorvidas pelo dispositivo para os diferentes estados de agitação irregular para uma inclinação de 30° do dispositivo (continuação).	101
Quadro 5.9 - Potências médias absorvidas pelo dispositivo para os diferentes estados de agitação regular para uma inclinação de 30° do dispositivo.	101
Quadro 5.10 - Potências médias absorvidas pelo dispositivo para os diferentes estados de agitação regular para uma inclinação de 30° do dispositivo (continuação).	102
Quadro 5.11 - Potências médias absorvidas pelo dispositivo para os diferentes estados de agitação irregular para uma inclinação de 45° do dispositivo.	102
Quadro 5.12 - Potências médias absorvidas pelo dispositivo para os diferentes estados de agitação regular para uma inclinação de 45° do dispositivo.	102
Quadro 5.13 - Potências médias absorvidas pelo dispositivo para os diferentes estados de agitação regular para uma inclinação de 45° do dispositivo (continuação).	103

Quadro 5.14 - Potências obtidas pelos dois métodos para estados de agitação regular e uma inclinação do dispositivo CECO igual 45°.....	107
Quadro 5.15 - Potências obtidas pelos dois métodos para estados de agitação regular e uma inclinação do dispositivo CECO igual 45° (continuação).....	108
Quadro 5.16 - L_{cap} do dispositivo CECO nos testes realizados com agitação irregular para a inclinação de 30°.....	109
Quadro 5.17 - L_{cap} do dispositivo CECO nos testes realizados com agitação regular para a inclinação de 30°.....	109
Quadro 5.18 - L_{cap} do dispositivo CECO nos testes realizados com agitação regular para a inclinação de 30° (continuação).....	110
Quadro 5.19 - L_{cap} do dispositivo nos testes realizados com agitação irregular para a inclinação de 45°.....	110
Quadro 5.20 - L_{cap} do dispositivo nos testes realizados com agitação regular para a inclinação de 45°.....	111
Quadro 5.21 - Comparação entre a L_{cap} de diversos WECs (valores retirados de Babarit, 2015)...	112
Quadro 0.1 - Lista das forças aplicadas para as resistências externas de Mínima, 5,6, 10, 42 e 79.6 Ohms na caracterização do Motor 10.....	123
Quadro 0.2 - Lista das forças aplicadas para as resistências externas de Máxima e 100 Ohms na caracterização do Motor 10	124
Quadro 0.3 - Lista das forças aplicadas para as resistências externas de Máxima e Mínima na caracterização do Motor 24	124
Quadro 0.4 - Potência teórica da onda para estados de agitação irregulares nos ensaios com inclinação 30°.....	128
Quadro 0.5 - Potência teórica da onda para estados de agitação regulares nos ensaios com inclinação 30°.....	128
Quadro 0.6 - Potência teórica da onda para estados de agitação regulares nos ensaios com inclinação 30° (continuação).....	129
Quadro 0.7 - Potência teórica da onda para estados de agitação irregulares nos ensaios com inclinação 45°.....	129
Quadro 0.8 - Potência teórica da onda para estados de agitação regulares nos ensaios com inclinação 45°.....	130

SÍMBOLOS E ACRÓNIMOS

Nesta secção é apresentada uma lista dos símbolos e abreviaturas utilizadas na realização da presente dissertação. Em alguns casos, o mesmo símbolo poderá apresentar significados diferentes, devido ao extenso número de fórmulas, variáveis e parâmetros que foram utilizados. No entanto, cada símbolo está, normalmente, associado a um determinado assunto, sendo fácil a distinção do seu significado, tendo em conta o contexto em que se apresenta.

LETRAS LATINAS MAIÚSCULAS

A - amplitude da onda [m]

C - celeridade [m/s]

C_0 - celeridade em profundidade infinita [m/s]

C_g - celeridade do grupo de ondas [m/s]

E_c - energia cinética da onda [J]

E_p - energia potencial da onda [J]

E_t - energia total da onda [J]

$\bar{E}$ - energia específica da onda [J/m²]

$\hat{F}_i$ - forças de inércia convectiva [N]

$\hat{F}_g$ - forças gravíticas [N]

$\hat{F}_\mu$ - forças de viscosidade [N]

$\hat{F}_\sigma$ - forças de tensão superficial [N]

$\hat{F}_e$ - forças de elasticidade [N]

$\hat{F}_{pr}$ - forças de pressão [N]

F_a - força de amortecimento do sistema de reprodução do PTO [N]

H - altura de onda [m]

$\bar{H}$ - altura de onda média do registo [m]

$H_{1/3}$ - altura de onda do registo com a probabilidade de ser excedida de 1/3 [m]

$\bar{H}_{1/3}$ - altura média do terço superior do registo, quando ordenadas por altura [m]

$H_{máx}$ - altura de onda máxima [m]

H_s - altura de onda significativa [m]

L - comprimento de onda [m]

L_0 - comprimento de onda em profundidade infinita [m]

$\bar{P}$ - potência média da onda por unidade de largura de crista [W/m]

$S(f)$ - densidade da energia [por variantes]

S_t - número de Strouhal [-]

T - período de onda [s]

$\bar{T}$ - período médio do registo [s]

$T_{1/3}$ - período de onda com a probabilidade de ser excedida de 1/3 [s]

$\bar{T}_{1/3}$ - média do terço superior dos períodos do registo, quando ordenados por duração [s]

T_E - período de energia [s]

$T_{máx}$ - período de onda máximo [s]

T_p - período de onda de pico

U - velocidade do escoamento [m/s]

LETRAS LATINAS MINÚSCULAS

a_x – aceleração das partículas fluídas na direção x [m/s²]

a_z – aceleração das partículas fluídas na direção z [m/s²]

d – profundidade da água [m]

f – frequência de onda [s⁻¹]

f_p – frequência de pico [s⁻¹]

g – aceleração gravítica [m/s²]

k – número de onda [-]

m – massa do fluído [Kg]

m_i – momento espectral de ordem i [variável] n – constante empírica de Elias, P.

t – tempo [s]

u – velocidade horizontal das partículas fluídas [m/s]

v – velocidade vertical das partículas fluídas [m/s]

x – posição na horizontal de um ponto da onda [m]

z – posição na vertical de um ponto da onda [m]

LETRAS GREGAS MAIÚSCULAS

Δp – diferencial de pressão entre a crista e cava [Pa]

LETRAS GREGAS MINÚSCULAS

γ – fator de escala da massa volúmica [-]

λ – fator de escala [-]

ρ – massa volúmica da água [kg/m³]

ω – frequência angular [rad/s⁻¹]

ABREVIATURAS

AWS – Archimedes Wave Swing
CAO – Coluna de Água Oscilatória
CECO – Conversor de Energia Cinética das Ondas
EDA – Eletricidade dos Açores
EEM – Empresa de eletricidade da Madeira
FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
IHRH – Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos
INETI – Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
INPI – Instituto Nacional de Propriedade Industrial
IST – Instituto Superior Técnico
IV – Infravermelhos
JONSWAP – Join Sea Wave Project
LH – Laboratório de Hidráulica
LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia
MLM – módulo lateral móvel
MLMs – módulos laterais móveis
OWC – Oscillating Water Column
OWSC – Oscillating Wave Surge Converters
PA – Point-Absorber
PMMA - Polimetil-metacrilato
PTO – Power Take Off
RAO – Response Amplitude Operator
REN – Redes Energéticas Nacionais
SHRHA – Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente
TRL – Technology Readiness Level
UE – União Europeia
WEC – Wave Energy Converter
ZP – Zona Piloto

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENERGIAS RENOVÁVEIS

1.1.1. INTRODUÇÃO

Questões ambientais, económicas, sociais e políticas, aliadas à consciencialização do fim dos combustíveis fósseis levaram a um rápido desenvolvimento de várias fontes de geração de energia baseadas em recursos renováveis. Apesar de algumas tecnologias de extração dessa energia serem criticadas (questões paisagistas, intermitência, impactos na fauna e flora, etc.) o mercado e desenvolvimento deste tipo de energia continua a crescer.

Energia renovável é aquela que é gerada a partir de recursos naturais tais como, a luz solar, o vento, a biomassa, marés e o calor proveniente do interior da terra. Ao contrário da maioria das fontes de energia atuais (combustíveis fósseis), estes recursos são renováveis, isto é, que são restituídos naturalmente a uma taxa igual ou superior à do seu consumo.

Por um lado, pretende-se que o abastecimento de energia deva ser seguro, fiável e barato, por outro é imperioso mitigar o seu impacto no meio ambiente.

1.1.2. ENERGIA RENOVÁVEIS EM PORTUGAL

Nas últimas décadas, as alterações climáticas têm vindo a impulsionar uma série de desenvolvimentos no ramo das energias renováveis e, consecutivamente na redução de emissão de gases com efeito de estufa.

O governo português tem acompanhado esta estratégia de política comunitária de energia, criando medidas e impulsionando uma transformação do setor elétrico. Uma dessas transformações passa por um aumento gradual da geração elétrica renovável.

Como se sabe, as energias renováveis estão dependentes de fatores naturais como a pluviosidade, exposição solar, vento, etc. Estes fatores não são controláveis pelo que a produção de energia através dos mesmos se pode tornar irregular e até mesmo insuficiente para as necessidades energéticas do país. O ano de 2017, por exemplo, não foi um bom ano do ponto de vista da produção de eletricidade renovável devido à fraca pluviosidade que se fez sentir. Num ano seco como o de 2017 a eletricidade de origem hídrica teve uma contribuição abaixo da média e que foi de 7,4 TWh, a eólica gerou 12,1 TWh e das centrais a biomassa com 2,9 TWh. A eletricidade de origem solar apenas contribuiu com 0,9 TWh¹.

¹ Fonte: Redes Energéticas Nacionais (REN), Eletricidade dos Açores (EDA), Empresa de Eletricidade da Madeira (EEM)

Assim, existe a necessidade de um *mix* energético diversificado que permita garantir uma estabilidade na produção de energia elétrica.

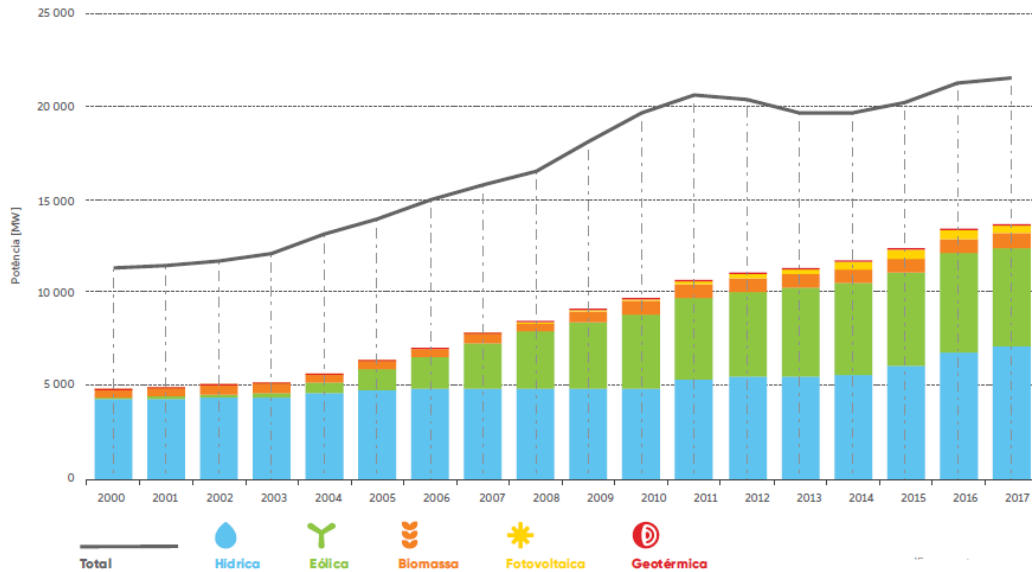


Figura 1.1 - Evolução da Potência Instalada do Parque electroprodutor português (adaptado de Associação Portuguesa de Energias Renováveis, 2018)

O parque electroprodutor português sofreu uma mudança de paradigma no que se refere à origem das principais fontes de abastecimento nas últimas duas décadas. A partir de 2004 verificou-se um acréscimo gradual da potência renovável instalada. Por sua vez, desde 2011, a potência fóssil tem vindo a apresentar uma redução. A penetração das fontes renováveis no *mix* elétrico Português ultrapassa já os 60% nos anos hidrológicos mais favoráveis. Contudo, é ainda necessário diversificar o *mix* para, nos anos mais secos, se conseguir manter o setor com níveis equiparáveis de descarbonização.

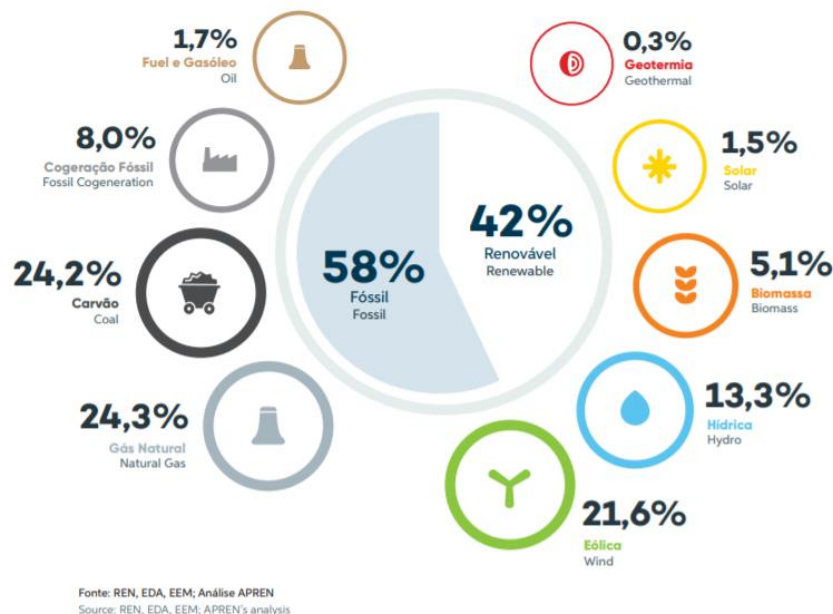


Figura 1.2 - Peso das diferentes fontes na produção de eletricidade em Portugal no ano 2017

No que trata à energia disponível nos oceanos, apesar do seu enorme potencial, os equipamentos para conversão desta energia renovável em eletricidade ainda se encontram numa fase muito embrionária. Portugal tem sido um país pioneiro na investigação e desenvolvimento deste tipo de tecnologias. Na Ilha do Pico, Açores, foi construída uma central com capacidade de 400 kW. Em Peniche, o *Waveroller*, outra tecnologia de conversão de energia das ondas, já tem desde 2012 três protótipos em teste em Portugal, cada um com uma potência de 100 kilowatts (kW) (Carlos *et al.*, [s.d.]).

Existe ainda a Zona Piloto Portuguesa (ZP), que engloba uma área de cerca de 320 km² e está situada perto de S. Pedro de Moel, entre a Figueira da Foz e a Nazaré. O objetivo desta zona é promover o desenvolvimento de energias marinhas, com especial ênfase na energia das ondas.

1.2. ENQUADRAMENTO DO TEMA E OBJETIVOS DO TRABALHO

Portugal possui bons recursos naturais para a exploração da energia das ondas, aliado a bons conhecimentos de investigação e desenvolvimento nesta área, o que permite o posicionamento privilegiado no mercado internacional de exploração desta fonte energética (Cunha e Onofrei, 2009). É natural que este seja um país pioneiro no desenvolvimento de tecnologias de conversão da energia das ondas. É assim criado o projeto OPWEC - Otimização de Conversores de Energia das Ondas, no qual se insere a presente dissertação.

O OPWEC tem como principal objetivo desenvolver e avaliar diferentes tecnologias para conversão da energia das ondas utilizando modelação física e numérica, bem como projetar sistemas de amarração eficientes para os dispositivos quando instalados perto da costa e ao largo (COMPETE 2020).

O presente trabalho pretende dar mais um passo no desenvolvimento do dispositivo CECO – Conversor da Energia Cinética das Ondas. O CECO é um conversor inovador, desenvolvido de forma a absorver, simultaneamente, a energia cinética e potencial da onda. A prova de conceito experimental foi realizada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), através da construção de dois modelos físicos e vários estudos numéricos que revelaram resultados promissores no potencial do dispositivo.

A essência deste trabalho prende-se na construção de um terceiro modelo físico do CECO, com base na informação adquirida através dos modelos numéricos validados pelos modelos físicos anteriores. Sendo o objetivo principal a otimização do CECO, o modelo construído é mais complexo, apresentando melhorias significativas a nível da geometria e outras componentes do dispositivo.

De forma a ratificar estas otimizações, o modelo construído será submetido a uma série de testes no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP. Nesses ensaios irão ainda ser registados diferentes parâmetros associados ao funcionamento do dispositivo de forma a que estes possam ser posteriormente utilizados para a calibração e validação de novos modelos numéricos.

Espera-se que com este trabalho o dispositivo CECO fique mais próximo da fase de protótipo, e evidentemente de uma futura aplicação real como fonte de energia renovável e sustentável.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está estruturada em 6 capítulos, nos quais são descritos todos os trabalhos realizados no decorrer da mesma.

O capítulo 2 apresenta uma breve introdução à história do aproveitamento da energia dos oceanos e as respetivas origens e potencial. Sucessivamente, são introduzidos os dispositivos conversores de energia das ondas e as diferentes formas de classificação e funcionamento dos mesmos.

A parte final do capítulo 2 dedica-se ao *Power Take-Off* (PTO) em dispositivos conversores de energia das ondas, sendo descritos os diversos tipos de PTOs existentes e as respetivas aplicações nos WECs existentes. É ainda descrito as várias estratégias de controlo aplicadas no PTO.

No capítulo 3 é feita a apresentação do dispositivo em estudo, o conversor da energia cinéticas das ondas – CECO, sendo feita uma descrição das diversas componentes que o constituem e o seu modo de funcionamento. Por fim, é feita uma análise crítica e síntese de trabalhos anteriores realizados acerca do dispositivo, que permitiram tirar conclusões e direcionar o estudo o trabalho aqui apresentado.

No capítulo 4 é abordado as diferentes fases de desenvolvimento tecnológico de um dispositivo conversor da energia das ondas, e segue-se uma descrição da instalação experimental utilizada para os objetivos da presente dissertação, sendo descritos os componentes mais importantes da mesma.

É também descrito com detalhe todo o processo construtivo do modelo físico, inclusive todos os pressupostos adotados durante a construção do mesmo, bem como a teoria por trás de cada decisão tomada.

2

SISTEMAS DE APROVEITAMENTO DE ENERGIA DAS ONDAS

2.1. ENQUADRAMENTO BREVE

Os oceanos são uma fonte de energia inesgotável, capaz de contribuir para a satisfação das crescentes necessidades de energia da humanidade. Face a esta potencialidade a exploração da energia dos oceanos têm vindo a ser estudada com particular interesse desde o século XX, motivada principalmente pela consciencialização do fim das energias fósseis.

A energia contida nos oceanos pode ter diversas origens, entre elas destacam-se a energia das marés, fruto da interação dos campos gravíticos da lua e do sol, a energia térmica dos oceanos, consequência direta da radiação solar incidente, a energia das correntes marítimas, cuja origem está nos gradientes de temperatura, salinidade e na ação das marés e, finalmente, a energia das ondas, que resulta do efeito do vento na superfície do oceano (Cruz e Sarmiento, 2004).

Segundo uma estimativa realizada por Motk (*et al.* 2010), o potencial teórico de energia das ondas é o apresentado no Quadro 2.1. É de referir que os valores apresentados excluem áreas com Potência Teórica da Onda inferior a 5 kW/m e zonas cobertas por gelo.

Quadro 2.1 - Potencial regional teórico de potência das ondas (adaptado de Motk et al., 2010)

Região	Potência das Ondas (GW)
Oeste e Norte da Europa	286
Mar Mediterrâneo e arquipélagos do Atlântico	148
América do Norte e Gronelândia	245
América Central	171
América do Sul	526
África	422
Ásia	547
Austrália, Nova Zelândia e Ilhas do Pacífico	637
Total	2985

A Figura 2.1 apresenta um mapa da distribuição global do recurso energia das ondas (excluindo considerações geográficas, técnicas ou económicas).

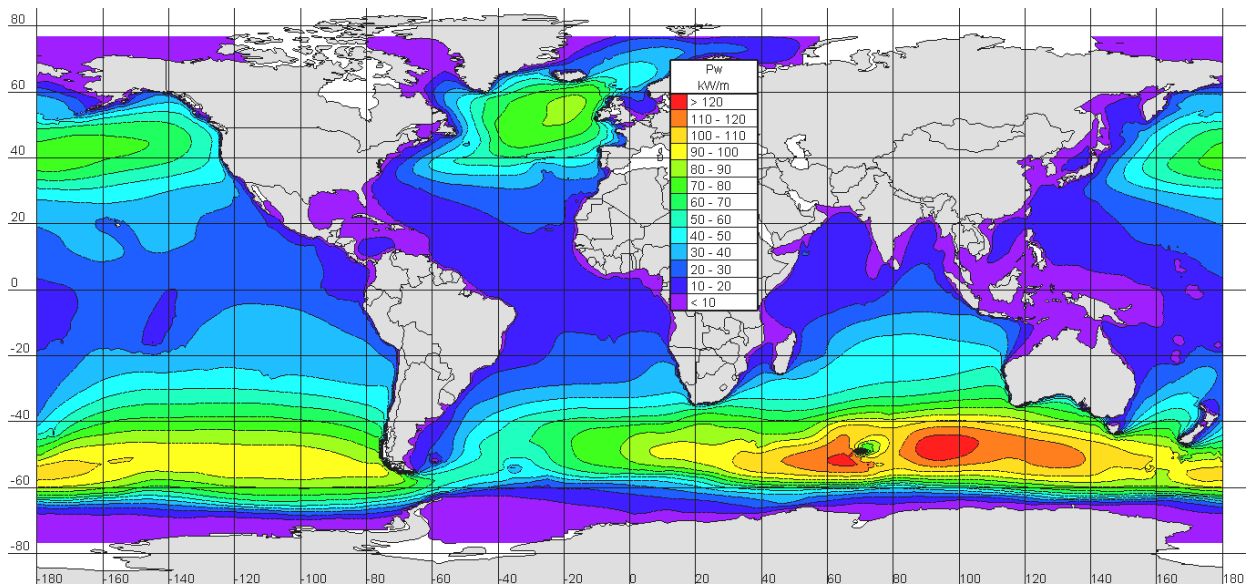


Figura 2.1 - Distribuição global da potência média anual de energia das ondas (Cornett, 2008)

Como se pode concluir pela análise do Quadro 2.1 e da Figura 2.1, a Ásia, América do Sul e a Austrália estão mais próximas de zonas com elevada potência energética das ondas. Os valores mais altos de potência de onda ocorrem ainda para a costa oeste dos continentes, isto é motivado principalmente pelo efeito de *Coriolis* (Motk *et al.* 2010).

2.2. CLASSIFICAÇÃO DOS DISPOSITIVOS DE APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS

2.2.1. INTRODUÇÃO

O crescente interesse pelas energias marinhas, e em particular a das ondas, resultou no aparecimento de inúmeras patentes para dispositivos conversores da energia das mesmas. Devido ao elevado número de dispositivos, com diferentes modos de funcionamento e características, surge a necessidade de se arranjar uma forma de classificar os dispositivos mediante certos critérios, como a distância à linha de costa, a sua dimensão e/ou orientação e ainda o seu modo de funcionamento.

2.2.2. CLASSIFICAÇÃO DOS DISPOSITIVOS

2.2.2.1. Distância à Costa

A classificação com base na distância à costa, como o próprio nome indica, tem em consideração a distância entre o local de instalação dos dispositivos e a linha de costa. Sendo, de forma consensual, consideradas três subcategorias:

- Dispositivos fixos na costa ou costeiros (*onshore* ou *shoreline*), isto é, que se encontram instalados na linha da costa;
- Dispositivos próximos da costa (*nearshore*), que se caracterizam por estarem instalados a uma distância média da linha de costa (geralmente entre o *onshore* e o *offshore*);

- Dispositivos afastados da costa (*offshore*), que se caracterizam por estarem a distâncias elevadas da costa.

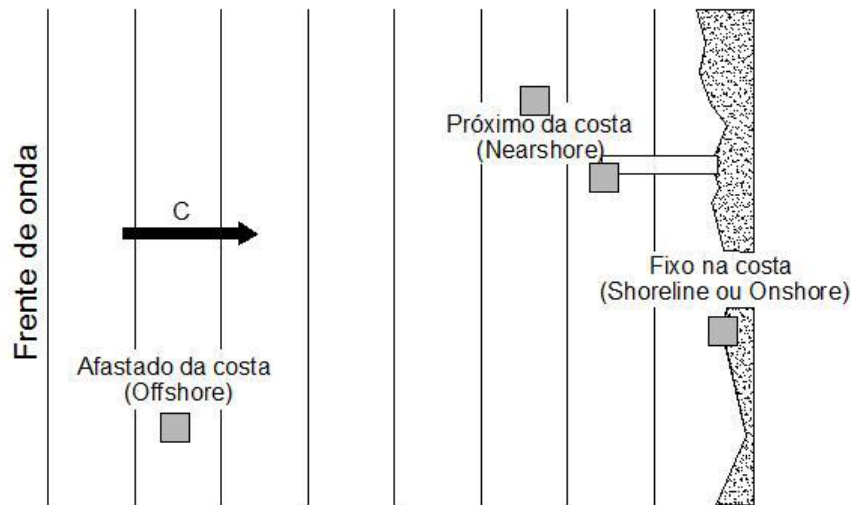


Figura 2.2 - Classificação dos dispositivos quanto à linha de costa (adaptado de Teixeira, 2012)

Devido ao atrito com o fundo do mar, geralmente as ondas irão perder energia com a aproximação à costa (com a exceção de alguns casos pontuais, onde fenómenos como a refração levam à concentração de energia em alguns locais da costa). Isto leva a concluir que, em geral, a disponibilidade energética é maior em alto mar e vai diminuindo progressivamente com a redução da profundidade de água, uma vez que esta determina a interação da onda com o fundo do mar.

No entanto, com o aumento da profundidade da água, também aumenta a dificuldade de instalação dos dispositivos e, evidentemente, o respetivo custo associado. Um dispositivo conversor da energia das ondas requer ligação à rede elétrica, custos de operação/manutenção e técnicas de fixação/amarração, que se tornam mais complexas mediante a distância à costa. Por esse motivo é crucial a realização de estudos de forma a chegar a um equilíbrio entre custo-benefício do conversor.

Assim, na seleção do local de implementação do dispositivo, procuram-se zonas onde existe uma concentração natural de energia o que permite mitigar as perdas de energia resultantes da diminuição da profundidade da água. É ainda vantajoso a instalação de dispositivos em estruturas artificiais já existentes, como quebramares, pois apesar de se poder considerar que estão ligados à costa, permitem um acesso a profundidades maiores (Cruz e Sarmento, 2004).

2.2.2.2. Dimensão e/ou Orientação do Dispositivo

Os dispositivos de aproveitamento da energia das ondas podem também ser classificados quanto à sua dimensão ou em relação à sua orientação em relação à linha de costa. As categorias usualmente consideradas são, Figura 2.3:

- Absorvedores pontuais, *Point absorbers* (PA);
- Absorvedores de grande dimensão, *Large-Absorbers*;
- Absorvedores múltiplos, *Multibody*;
- Atenuadores, *Attenuators*;
- Terminadores, *Terminators*.

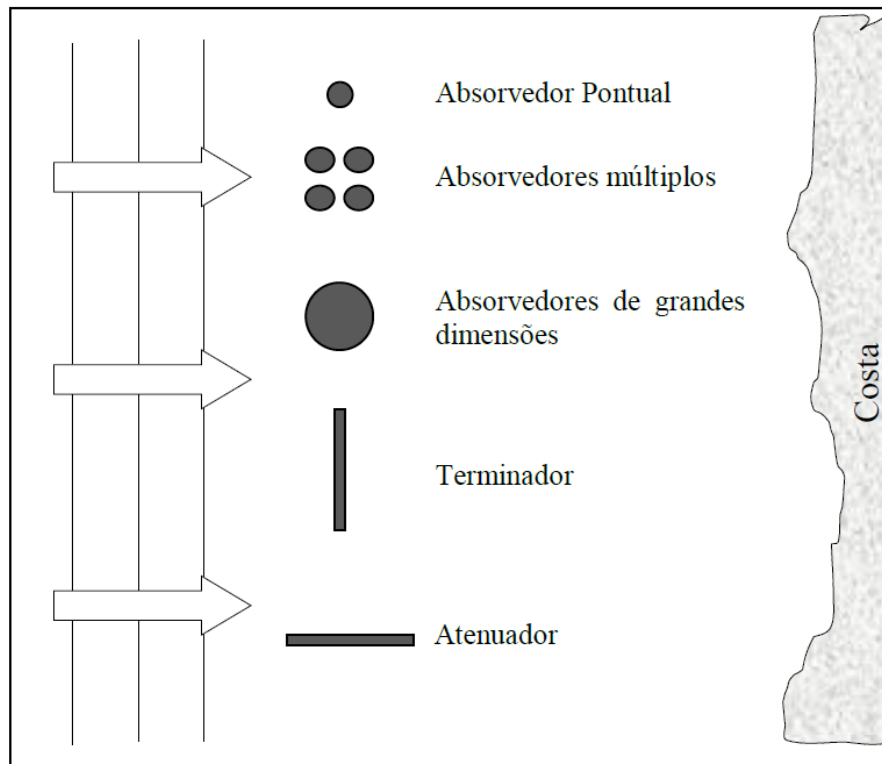


Figura 2.3 - Classificação dos dispositivos quanto à sua orientação e/ou dimensão (adaptado de Marinheiro, 2013)

Os absorvedores pontuais, tal como o próprio nome indica, são dispositivos de pequena dimensão relativamente ao comprimento de onda para os quais são projetados. No modo pontual de atuação, enquadra-se ainda os absorvedores de grandes dimensões que consistem basicamente num absorvedor pontual de maior dimensão, e os absorvedores múltiplos que resultam de um aglomerado de absorvedores pontuais que atuam na mesma localização e solidarizados a uma plataforma comum.

Os atenuadores e terminadores são dispositivos cuja maior dimensão é sensivelmente igual à do comprimento de onda para o qual foram projetados. A diferença entre estes dispositivos consiste na sua orientação relativamente ao movimento de propagação das ondas: os atenuadores são dispositivos em que a sua maior dimensão está orientada perpendicularmente à frente de onda, enquanto que os terminadores estão orientados paralelamente ao movimento de propagação da onda.

2.2.2.3. Modo de Funcionamento

A classificação dos dispositivos pode ainda ser feita relativamente ao seu modo de funcionamento, isto é, o modo como o dispositivo converte a energia das ondas em energia elétrica. Devido à variedade de tecnologias de conversão de energia das ondas, e o constante desenvolvimento de novos conceitos de conversão, existe uma grande gama de categorias de funcionamento. Mesmo não sendo uma lista muito exaustiva, Falcão (2010) engloba nessas categorias os principais conversores de energia das ondas existentes. A Figura 2.4 apresenta as categorias propostas por Falcão (2010).

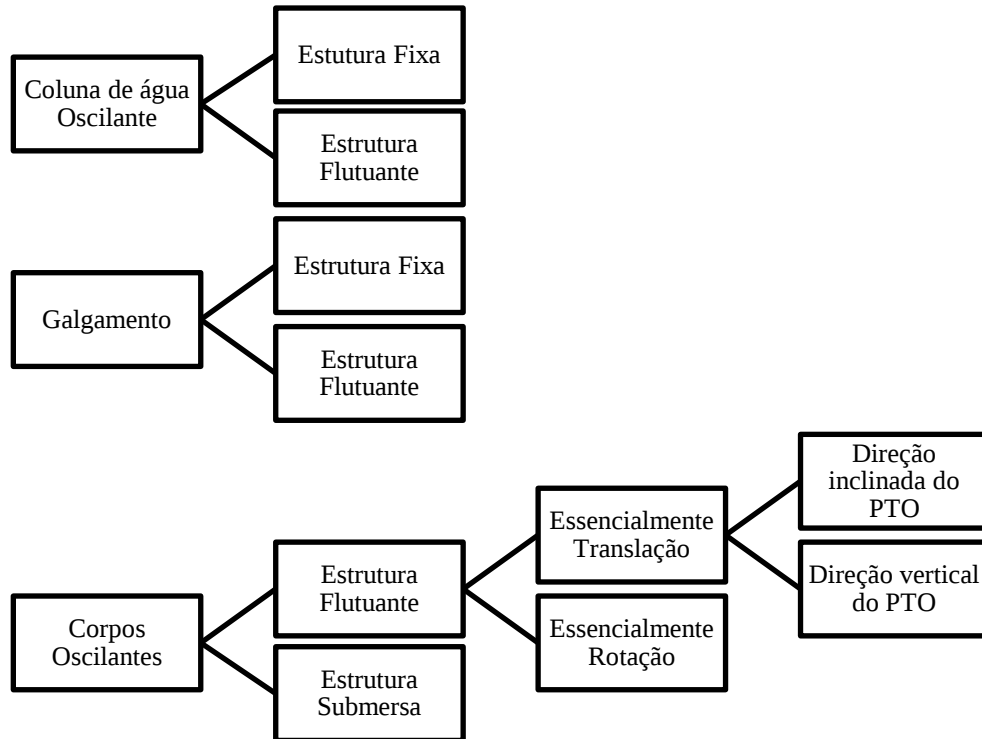


Figura 2.4 - Classificação dos conversores de energia das ondas (adaptado de López et al., 2018)

2.3. POWER TAKE-OFF

2.3.1. INTRODUÇÃO

O sistema de extração da energia da onda, ou *Power Take-Off* (PTO) como é vulgarmente designado na língua inglesa, consiste basicamente no mecanismo que transfere a energia absorvida pelo em energia elétrica.

Sendo o principal objetivo do conversor a produção de energia elétrica, o PTO é uma componente importante, uma vez que afeta a eficiência de captação da energia da onda, e ainda a sua massa e geometria final.

É de salientar ainda que o PTO representa uma parcela relevante no custo final do dispositivo e que as suas características poderão exigir diferentes tipos de manutenção, pois estes estão geralmente sujeitos a um desgaste intenso. Por outro lado a sua localização nem sempre é a mais acessível o que por si complica o processo de manutenção do mesmo, levando a aumentados custos de manutenção (Pecher e Kofoed, 2017).

A diversa gama de conversores de energia das ondas existentes, e os seus diferentes modos de funcionamento, levam à necessidade de diferentes tipos de sistemas PTO. A variedade de sistemas, aliada à dificuldade de reprodução a uma escala mais pequena dos mesmos implicam que o estudo dos sistemas PTO em modelos físicos para um dado conversor seja bastante complexo e por vezes nem sempre o mais adequado.

Como mencionando anteriormente, a cada dispositivo conversor de energia das ondas adequa-se um determinado sistema PTO. A Figura 2.5 seguinte esquematiza os principais processos de conversão da energia das ondas em energia elétrica.

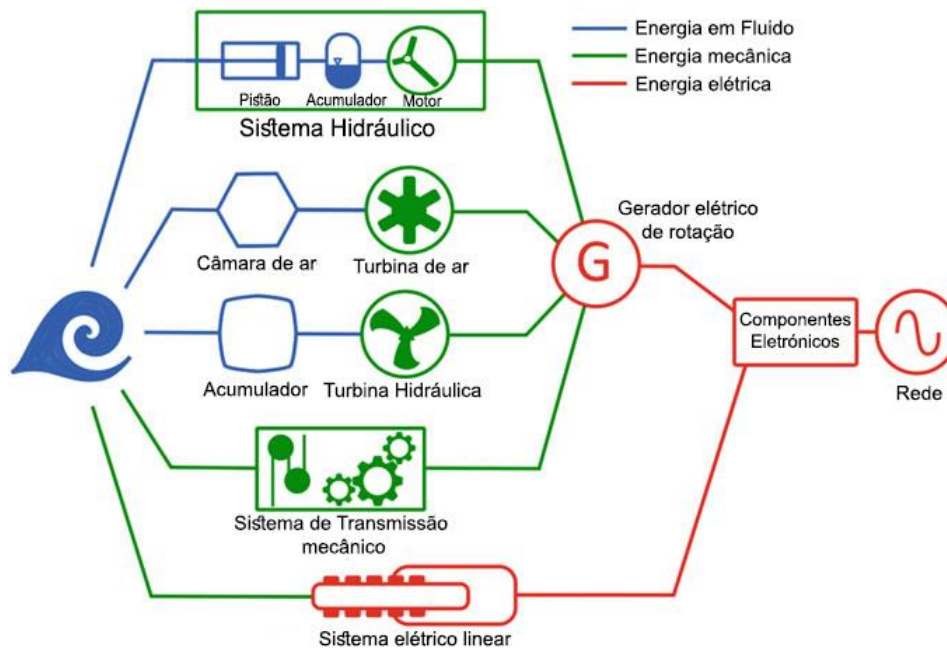


Figura 2.5 - Processos de conversão da energia das ondas em energia elétrica (adaptado de Pecher e Kofoed, 2017)

2.3.2. TIPOS DE POWER TAKE-OFF

2.3.2.1. Turbina de Ar

As turbinas de ar permitem converter uma corrente de ar em energia mecânica e são geralmente utilizadas em dispositivos do tipo coluna de água oscilantes. O seu funcionamento baseia-se na variação da pressão no interior da câmara provocada pela passagem das ondas. Esta oscilação da pressão do ar faz mover uma hélice que, por sua vez, se encontra ligada a um gerador que transforma este movimento em energia elétrica. Esta turbinas deverão permitir um funcionamento contínuo independentemente do sentido do movimento do ar, de forma a aproveitar tanto o movimento da massa de ar de entrada, como o de saída. As turbinas mais usuais num dispositivo de coluna de água oscilante, são as turbinas do tipo *Wells*. A Figura 2.6 apresenta o esquema de funcionamento de um sistema de conversão de energia das ondas de coluna de água oscilante.

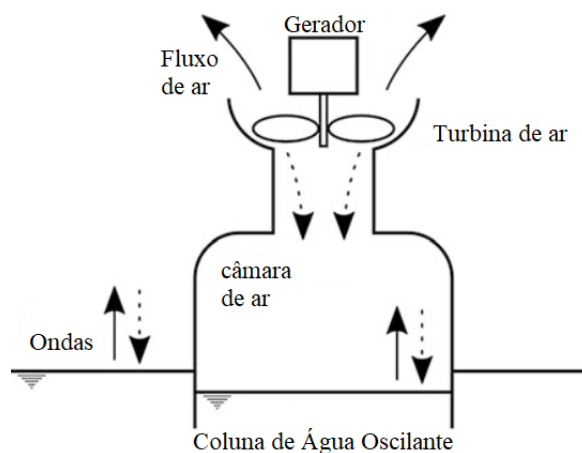


Figura 2.6 - Esquema de um dispositivo de CAO (Pecher e Kofoed, 2017)

2.3.2.2. Sistemas Hidráulicos

Os sistemas de conversão de energia hidráulicos tiram partido do movimento de um corpo que irá transmitir energia a um motor hidráulico, que por sua vez, a transmite a um motor elétrico.

Os PTOs hidráulicos tiram partido do movimento linear de um corpo (geralmente uma boia) e convertem-no num fluxo de fluido pressurizado. O fluxo de fluido pressurizado bidirecional que sai de cada um dos terminais do cilindro hidráulico passa por um conjunto de válvulas que convertem o fluxo bidirecional em um unidirecional. Este fluxo unidirecional é transmitido a um acumulador que armazena a energia hidráulica de forma a atenuar o fornecimento de altas pressões do fluido no sistema para que estas sejam fornecidas quando necessárias (Pecher e Kofoed, 2017). De seguida um motor hidráulico transforma a energia contida no fluxo hidráulico em energia rotacional que por sua vez é transmitida a gerador elétrico (So *et al.*, [s.d.]).

Na conversão da energia das ondas, devido a um funcionamento caracterizado por forças elevadas e velocidades reduzidas, são preferencialmente utilizados motores hidráulicos de pistões radiais, uma vez que em caso de tempestade estes previnem deslocamentos para os quais não foram dimensionados.

Os sistemas de PTO hidráulico são utilizados por diferentes tipos de conversores de energia das ondas já existentes, entre eles alguns absorvedores pontuais (*Wavestar*, *CPT*, *AquaBUOY*, *OPT*, *Wavebob*), atenuadores (*Pelamis*, *Dexadevice*) e terminadores (*Oyster*).

A Figura 2.7 apresenta o esquema base de um sistema de extração de energia das ondas hidráulico.

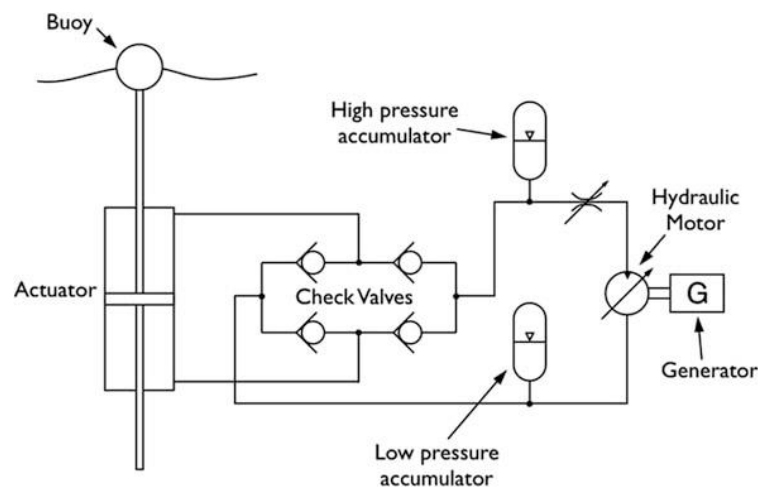


Figura 2.7 - Exemplo de PTO hidráulico (adaptado de Pecher e Kofoed, 2017)

2.3.2.3. Turbinas Hidráulicas

As turbinas hidráulicas são máquinas que tiram partido do movimento de um caudal de água (energia potencial e cinética) e o transformam num movimento de rotação que, por sua vez, é transmitido a um gerador.

Estes tipos de turbinas são geralmente utilizados em sistemas de aproveitamento da energia das ondas que funcionam por galgamento. Nestes sistemas a água que galga a estrutura é acumulada em reservatórios elevados em relação ao nível médio do mar e posteriormente descarregada por uma conduta forçada que parte da base do reservatório forçando a sua passagem por uma turbina de queda útil baixa. A Figura 2.8 apresenta o esquema de funcionamento de um sistema de aproveitamento de energia das ondas por galgamento.

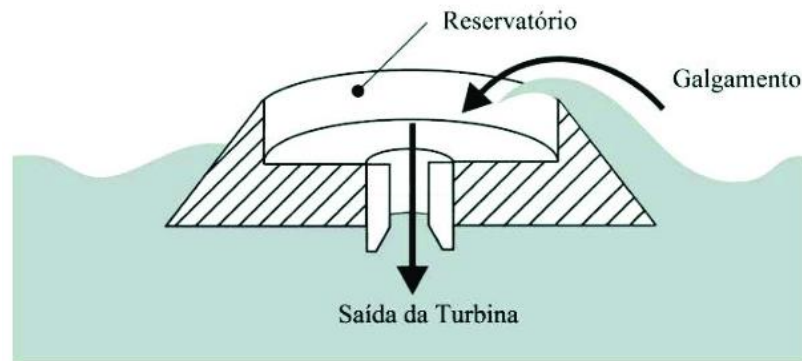


Figura 2.8 – Ilustração do princípio de funcionamento de um aproveitamento de energia das ondas por galgamento (adaptado de Goulart *et al.*, 2016)

2.3.2.4. Sistemas de Transmissão Mecânica

Num sistema de transmissão mecânica, a energia mecânica de um corpo oscilatório é transformada em energia elétrica por meio de um sistema de conversão mecânico. Este sistema de conversão mecânico é geralmente constituído por engrenagens, roldanas e cabos, que permitem converter os movimentos do corpo num movimento rotacional que é transmitido a um gerador elétrico que produz eletricidade (Pecher e Kofoed, 2017). Pode ainda ser integrado um volante de inércia de forma a acumular ou libertar energia provocando um output de potência mais equilibrado (Pecher e Kofoed, 2017).

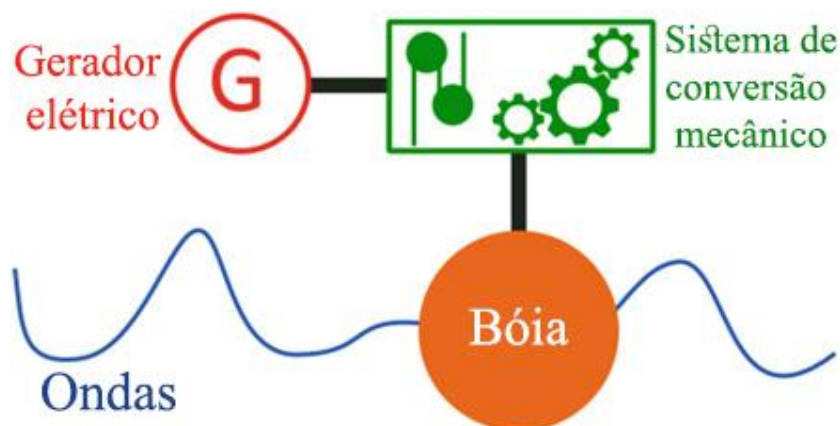


Figura 2.9 - Esquema de um PTO de transmissão mecânica (adaptado de Pecher e Kofoed, 2017)

Uma das vantagens deste tipo de PTO é a sua elevada eficiência, pois necessita apenas de três conversões de energia (energia das ondas para energia mecânica que por sua vez é transformada num movimento rotacional que é convertido em energia elétrica).

2.3.2.5.PTO Linear

A complexidade dos PTO hidráulicos ou das turbinas, resulta geralmente em maiores exigências de manutenção e em problemas de fiabilidade, o que se revela um grande problema que se deve mitigar nas estruturas *off-shore* (Curran *et al.*,1976).

Apesar de a possibilidade da utilização de geradores elétricos lineares para sistemas de aproveitamento da energia das ondas já ter sido idealizada há muito tempo, a aplicação dos ímanes eletromagnéticos levaria a máquinas demasiado caras, pesadas e ineficientes (Drew, Plummer e Sahinkaya, 2009). O recente desenvolvimento de novos materiais magnéticos, nomeadamente de ímanes permanentes voltou a tornar esta solução atrativa e por esse motivo tem vindo a ser objeto de estudo, pois estes permitem uma conversão direta da energia mecânica em energia elétrica.

Os geradores lineares tiram partido do movimento de translação de um corpo em relação a outro devido à ação das ondas. Este tipo de movimento representa uma situação adequada para a utilização de indução eletromagnética. A indução eletromagnética baseia-se num transmissor com ímanes de polaridade alternada, que ao deslocar-se de forma cíclica no interior de um estator com bobinas, induz corrente elétrica.

Este tipo de PTO merece especial atenção, pois embora não se encontrem ainda muito desenvolvidos, apresentam grandes potencialidades relativamente aos geradores convencionais, uma vez que nestes não existe a necessidade de transformar o movimento de translação num movimento de rotação, evitando assim caixas de engrenagens para ampliação desta última. Tornam-se ainda atrativos pois são adequados à gama de velocidades de translação que as ondas normalmente provocam nos dispositivos de aproveitamento de energia das ondas.

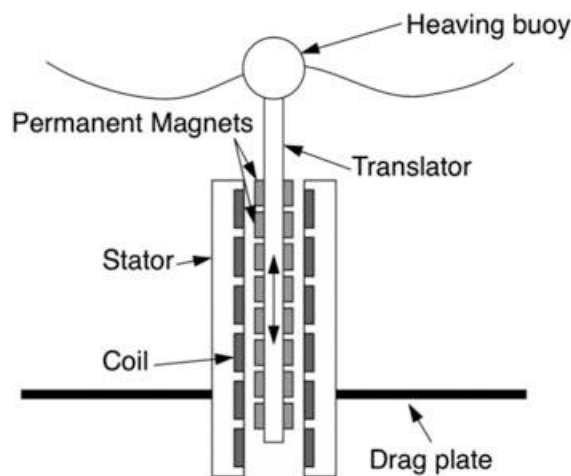


Figura 2.10 - Exemplo de um PTO linear (adaptado de Pecher e Kofoed, 2017)

2.3.3.CONTROLO

2.3.3.1.Introdução

A irregularidade da agitação marítima é um fator preponderante num conversor de energia das ondas.

Normalmente, para aumentar a absorção de energia das ondas, procura-se que o conversor funcione em ressonância, isto é, que a frequência excitadora resultante da agitação marítima seja igual ou o mais aproximada possível da frequência natural do sistema. O controlo consiste em adaptar o conversor de

energia para que funcione em ressonância na maior gama possível de frequências do espectro de ondas, ou pelo menos nas mais energéticas.

Como a agitação marítima é irregular e as características das ondas variam em diferentes escalas temporais, existe a necessidade de adaptação do dispositivo às ondas incidentes em cada momento, o que implica a necessidade de realizar ajustes constantes, que poderão ocorrer em períodos de minutos a horas (Pecher e Kofoed, 2017).

Importa referir que a frequência de ressonância natural do sistema depende de diversos fatores tais como, as características físicas do conversor de energia das e do sistema PTO aplicado.

A forma e massa do dispositivo são características físicas difíceis de alterar em função das ondas incidentes, pelo que um sistema desenvolvido com essa finalidade, embora possível, torna-se economicamente inviável, acrescentando complexidade desnecessária ao conversor. No entanto, é possível ajustar o comportamento do conversor, alterando a rigidez e/ou amortecimento do sistema. Estas variáveis são controláveis a partir do PTO, o que permite aumentar a sua eficiência na absorção da energia das ondas (Pecher e Kofoed, 2017).

No entanto, este ajuste do PTO, implica a existência de um sistema de controlo onde as ondas incidentes no conversor são monitorizadas continuamente. Este controlo no PTO introduz complexidade no sistema, o que por sua vez diminui a fiabilidade do mesmo e poderá provocar um acréscimo nos custos de manutenção. Assim sendo, uma estratégia de controlo adequada é essencial de forma a assegurar uma boa relação custo-eficiência do conversor (Pecher e Kofoed, 2017).

2.3.3.2. Estratégias de Controlo

Atualmente existem diversas estratégias de controlo com diferentes graus de complexidade técnica. A escolha de uma estratégia de controlo adequada ao sistema de aproveitamento de energia das ondas em estudo é essencial para assegurar uma boa relação custo-eficiência do conversor (Pecher e Kofoed, 2017).

Uma das estratégias mais utilizadas é o “*Passive Loading Control*”, que atua a nível do coeficiente de amortecimento do sistema. O coeficiente de amortecimento é definido como o quociente entre a força e a velocidade (Shek, *et al.* 2002) e pode ser calculado numericamente ou por ensaios experimentais em tanque de ondas. Esta estratégia de controlo consiste em ajustar o coeficiente de amortecimento do sistema PTO de acordo com a onda incidente, ou seja, cada onda irá sentir uma força diferente que dependerá da velocidade instantânea da parte móvel do conversor. Se o amortecimento for muito baixo, o oscilador vai se mover demasiado relativamente à onda. Da mesma forma, se o amortecimento for demasiado alto a amplitude do movimento vai ser limitada levando à perda de eficiência na extração de energia, pelo que é essencial adotar um coeficiente de amortecimento adequado. Se a frequência das ondas é a mesma que a frequência natural dos elementos móveis e o coeficiente de amortecimento tiver o valor correto, a eficiência da extração de energia será elevada (Shek *et al.*, 2002).

Outra estratégia de controlo consiste no “*Latching Control*”. Esta estratégia não-linear que consiste em fixar o dispositivo até que a força de excitação da onda esteja numa dada fase que maximize a absorção de energia. Este tipo de controlo requer um PTO que consiga reagir rapidamente a um dado comando e ainda um método de previsão do momento exato de libertação da parte móvel. Embora esta estratégia apresente resultados bastante satisfatórios para estados de agitação irregulares, torna-se difícil uma correta aplicação, uma vez que exige o conhecimento das características de futuras ondas, de forma a saber quando fixar e libertar o dispositivo, e algoritmos de previsão de ondas nem sempre são os mais corretos.

Existe ainda o “*Reactive Loading Control*”, em que se procura alargar a banda de frequência do conversor de energia das ondas na proximidade da sua frequência natural. Qualquer conversor possui inércia, que consiste na inércia intrínseca do dispositivo mais a inércia adicionada da água adjacente ao mesmo, e tem ainda associado um termo de rigidez. A inércia é a resistência à aceleração e a rigidez a resistência à deflexão. Com o “*Reactive Loading Control*” pretende-se maximizar a absorção de energia para todas as frequências através de ajustes dinâmicos da inércia, da rigidez e do amortecimento do oscilador.

3

DISPOSITIVO CECO

3.1. INTRODUÇÃO

O dispositivo CECO (Conversor de Energia Cinética das Ondas), registado no Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI), com o pedido de registo de Patente N°105015, destina-se, de acordo com o autor desta última, a converter a energia cinética e potencial do movimento longitudinal das ondas marítimas em energia elétrica.

O funcionamento deste tipo de conversor é possível tirando partido de dois princípios físicos básicos, nomeadamente, do facto de se criar dentro de água uma barreira ao avanço de uma outra força de água, essa barreira, devido à massa de água à sua retaguarda tenderá a manter-se imóvel e provocará a dissipação ou libertação de energia da força incidente (rebentação da onda), e ainda do princípio da conservação da quantidade de movimento, onde o movimento final é semelhante ao inicial sem prejuízo da massa intermédia permanecer imóvel (Ribeiro, 2012).

O dispositivo CECO conta até à data deste trabalho com dois modelos físicos (Teixeira (2012) e Marinheiro (2013)) e ainda com diversos estudos numéricos, onde são analisados a influência de parâmetros com a inclinação do PTO (López *et al.*, 2018), a profundidade de instalação (Ramos *et al.*, 2018), os efeitos da sazonalidade (Ramos *et al.*, 2017) e ainda uma avaliação do desempenho do CECO para ondas irregulares (Rodríguez, 2018).

O dispositivo CECO revela-se um sistema de aproveitamento da energia das ondas bastante promissor, tendo apresentado resultados bastante satisfatórios para a fase de desenvolvimento em que se encontra atualmente. Assim sendo, com o presente trabalho, pretende-se dar mais um passo no desenvolvimento do mesmo.

3.2. DESCRIÇÃO GERAL DO CECO

3.2.1. CONSTITUIÇÃO DO CECO

De acordo com o registo de patente, o CECO é essencialmente constituído pelos componentes listados no Quadro 3.1, destacando-se principalmente as seguintes partes:

- Dois módulos laterais móveis (MLMs);
- Corpo Central Fixo;
- Elemento anelar estrutural;
- Tirantes;
- Mecanismo cremalheira-engrenagem;

- Gerador;
- Estrutura de fixação.

Quadro 3.1 - Lista de todos as componentes do CECO (Teixeira, 2012)

Componente	Função	Legendas
Módulo lateral móvel	Barreira à propagação da onda	1
Superfície frontal de impacto	Zona de impacto da onda	1a
Mecanismo cremalheira-engrenagem	Conversão do movimento linear dos tirantes em rotativo	2
Gerador	Conversão do movimento rotativo em energia elétrica	3
Elemento anelar estrutural	Estrutural	4
Tirante central	Transmissor do movimento	5
Tirante superior	Orientador e estabilizador de movimento	6
Ligador superior	Solidarização dos dois módulos laterais	7
Corpo central fixo	Guiamento dos tirantes	8
Câmara com lastro (no corpo central fixo)	-	8a
Tirante lateral	Orientador e estabilizador de movimento	9
Conjunto mecânico elevador da velocidade de rotação	Aumento da velocidade de rotação transmitida pela cremalheira	10
Engrenagem	Absorver o movimento linear oblíquo	11
Cremalheira	Transmitir o movimento linear oblíquo	12
Fixador horizontal	Suporte do CECO	13
Boia de sustentação vertical	-	14
Suporte lateral	Estrutural	15
Tirante suplementar oblíquo fixo lateral	Estrutural	16

Sendo possível visualizar estes últimos nas Figura 3.1 a Figura 3.7.

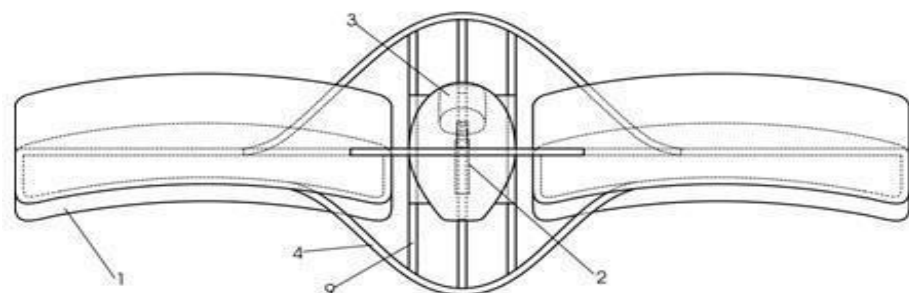


Figura 3.1 - Vista superior do CECO

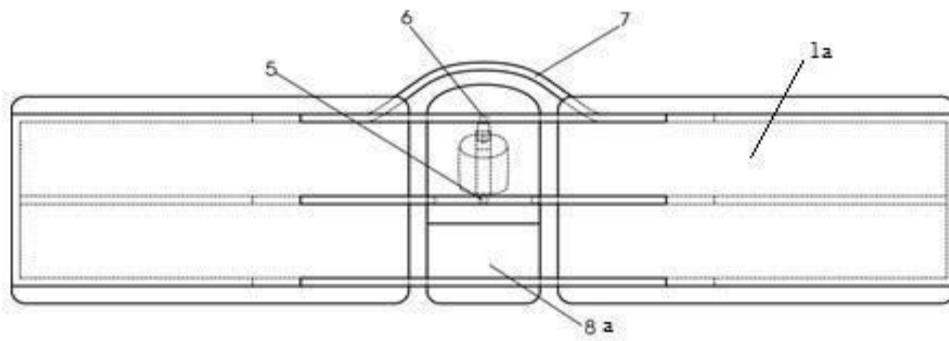


Figura 3.2 - Vista frontal do CECO

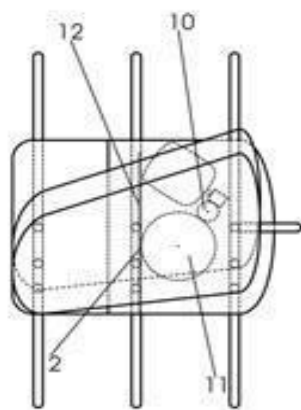


Figura 3.3 - Vista lateral do CECO

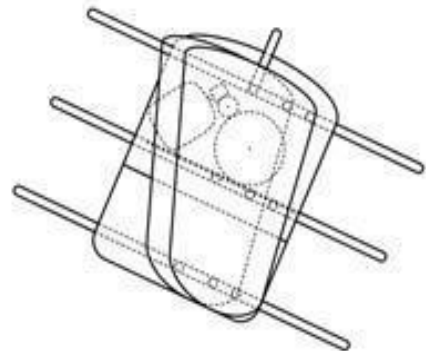


Figura 3.4 - Vista lateral do CECO em posição de funcionamento

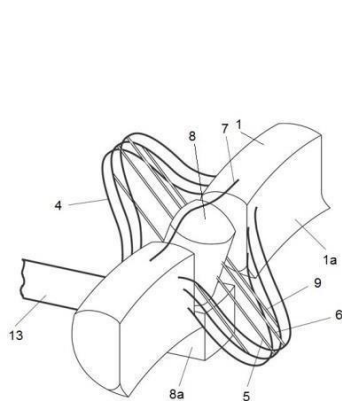


Figura 3.5 - Perspetiva para fixação horizontal do dispositivo CECO

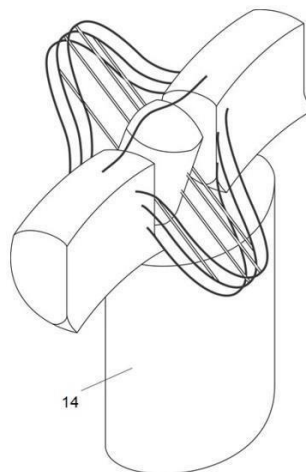


Figura 3.6 - Perspetiva para fixação vertical do dispositivo CECO

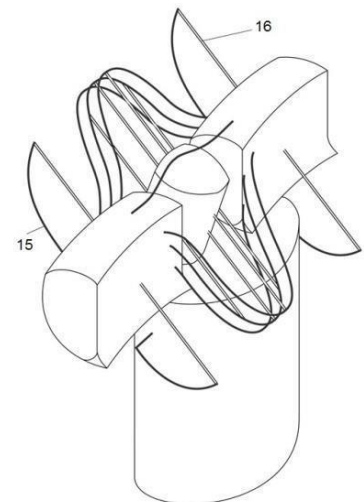


Figura 3.7 - Perspetiva para unidades CECO de grandes dimensões

3.2.2.DESCRICÃO DOS PRINCIPAIS COMPONENTES DO CECO

3.2.2.1.Módulos Laterais Móveis

Os módulos laterais móveis consistem em dois elementos flutuantes, idênticos a uma boia, instalados em cada lado do CECO. Estes módulos são caracterizados por terem uma superfície frontal de impacto vertical destinada a bloquear a propagação natural da onda, permitindo a absorção e sucessiva conversão da energia contida no movimento da mesma.

De acordo com a patente, ambos os módulos estão interligados por três elementos anelares estruturais, que lhes conferem resistência a fenómenos de torção, sendo ainda colocado no topo um elemento de solidarização, de forma a aumentar ainda mais a resistência à torção entre eles (vertical segundo o eixo horizontal).

É ainda crucial para um bom desempenho do dispositivo, que este módulo tenham a capacidade de ajuste do seu grau de submersão mediante as características do local de instalação, nomeadamente das ondas que irão incidir sobre os mesmos. Uma das formas que permitiram tal efeito nos modelos físicos desenvolvidos, foi a colocação de lastro no interior dos MLMs (Teixeira, 2012), o que apresenta o inconveniente de um grau de ajuste relativamente complexo nos modelos reais. Foi então idealizado um mecanismo de permita a submersão e emersão por entrada de água até que estes atinjam o peso pretendido, sendo ainda possível a total submersão dos mesmos para períodos de tempestade (Marinheiro, 2013).

3.2.2.2.Corpo Central Fixo

O corpo central fixo é um elemento estrutural que serve de apoio e fixação para todo o dispositivo. É ainda neste último que será instalado o sistema gerador de energia, constituído pela cremalheira, conjunto mecânico elevador da velocidade de rotação e do gerador.

No interior deste, encontram-se ainda as calhas de guiamento responsáveis por orientar e estabilizar o movimento dos tirantes.

A inclinação do movimento de translação dos tirantes relativamente à superfície da água está fortemente relacionada com os rendimentos do CECO, logo o corpo central fixo deverá possibilitar um possível ajuste desta última de forma a tirar o maior proveito das condições de agitação marítima locais.

A patente do dispositivo menciona ainda a possibilidade de existência de uma câmara de lastro, que poderá ser a opção para a colocação do gerador (Ribeiro, 2012).

3.2.2.3.Tirantes

O dispositivo CECO é constituído por três tirantes, dois destes são tirantes laterais, responsáveis pela função orientadora e de estabilização do movimento de translação, e o terceiro tirante (tirante central) destina-se a fazer movimentar o mecanismo cremalheira-engrenagem, onde, geralmente a cremalheira se encontra agregada no próprio tirante, e a engrenagem situada no corpo central fixo.

Conforme é possível observar pelas figuras apresentadas acima, a disposição triangular entre os três tirantes permite impedir rotações da parte móvel do CECO, permitindo assim um melhor rendimento do movimento de translação induzido pelas ondas.

3.2.3.MODO DE FUNCIONAMENTO DO CECO

Conforme referido anteriormente, o princípio fundamental do funcionamento do dispositivo CECO consiste no aproveitamento da energia cinética e potencial do movimento longitudinal das ondas marítimas de forma a produzir energia elétrica. Para tal, é colocada uma barreira (por intermédio dos módulos laterais móveis) que impede o avanço normal da onda. Esta barreira força uma dissipação da energia incidente, o que, com base no princípio da conservação da quantidade de movimento, é traduzido num movimento mecânico oblíquo, Figura 3.8.

Este movimento de translação oblíquo da parte móvel do dispositivo devido à ação das ondas incidentes, é transferido a uma engrenagem por parte de um tirante do tirante central. A engrenagem transforma o movimento de translação oblíquo do tirante central num movimento de rotação que após uma “multiplicação” por parte de um conjunto de rodas, vê a sua velocidade de rotação aumentada. Essa rotação ampliada é posteriormente transmitida ao gerador que por fim produz a energia elétrica.

Este conjunto de mecanismos responsáveis pelo aumento da velocidade de rotação é extremamente importante, uma vez que previne casos em que a velocidade de rotação seja insuficiente para ativar o gerador. Essa amplificação é realizada por um conjunto mecânico composto por rodas dentadas helicoidais de redução de diâmetro e por um pinhão, que ativará o gerador.

Os geradores têm ainda uma gama de condições ótimas de funcionamento, pelo que deve ser possível fazer um ajuste dessa mesma velocidade de rotação que é lhe é transmitida para que este funcione no seu rendimento máximo. Tal ajuste poderá ser feito através de uma caixa de velocidades automática que mediante o movimento de translação oblíquo faça o devido ajuste para garantir que o PTO esteja sempre no seu ponto de funcionamento ótimo (Rosa-Santos et al., 2015).

É ainda importante referir que o CECO possui um movimento de translação oblíquo ascendente seguido de um descendente, o que, de forma a tirar o máximo proveito do funcionamento do dispositivo, deve ser aproveitada tanto a translação ascendente como a descendente para produção de energia. Esta inversão de direção traduz-se em perdas de eficiência (Rosa-Santos et al., 2015). Uma solução para um sistema que permita traduzir ambos os movimentos de translação num movimento de rotação de apenas um sentido encontra-se já idealizada, pelo que deve ser estudado uma aplicação na parte do PTO do dispositivo.

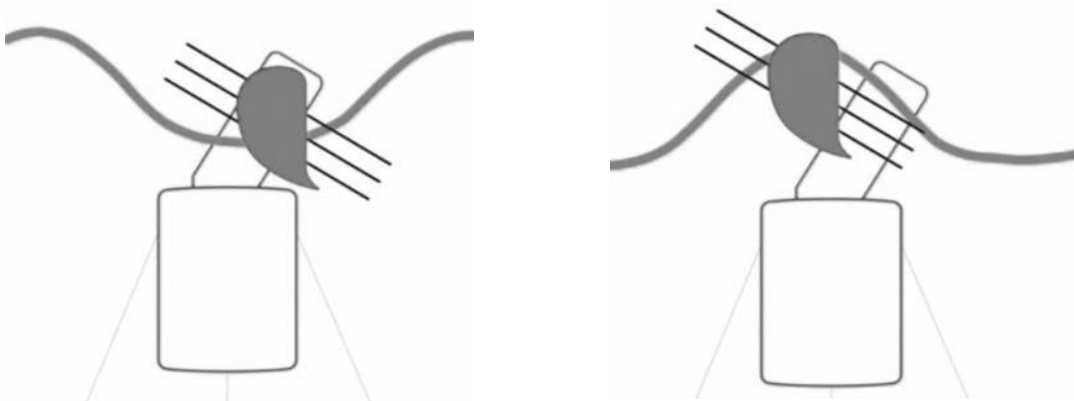


Figura 3.8 - Esquema representativo do funcionamento do dispositivo quando atingido pela cava (à esquerda) e pela crista da onda (à direita), (adaptado de Marinheiro, 2013)

3.3. ANÁLISE CRÍTICA E SÍNTESE DE TRABALHOS ANTERIORES

O estudo do dispositivo CECO teve início em 2012, no âmbito de uma dissertação de mestrado, onde se desenvolveu, construiu e testou um primeiro modelo físico, à escala geométrica 1/20, tendo em vista a validação do conceito (Teixeira, 2012).

Nesse trabalho, o autor, tomando por base as orientações descritas na patente, iniciou o plano daquilo que seria o seu modelo físico. Após uma análise crítica às características descritas na patente, Teixeira (2012), identificou algumas especificações que não coincidiam com a realidade, pelo que surgiu a necessidade de algumas alterações e simplificações.

As dificuldades encontradas por Teixeira, permitiram identificar um conjunto de aspetos sensíveis do modelo que deverão ser convenientemente estudados em possíveis desenvolvimentos do projeto (Teixeira, 2012), deixando pistas do rumo que o dispositivo CECO deverá tomar.

As Figura 3.9 a Figura 3.10, representam a vista frontal, lateral e superior com as respetivas dimensões, do modelo físico desenvolvido por Teixeira (2012).

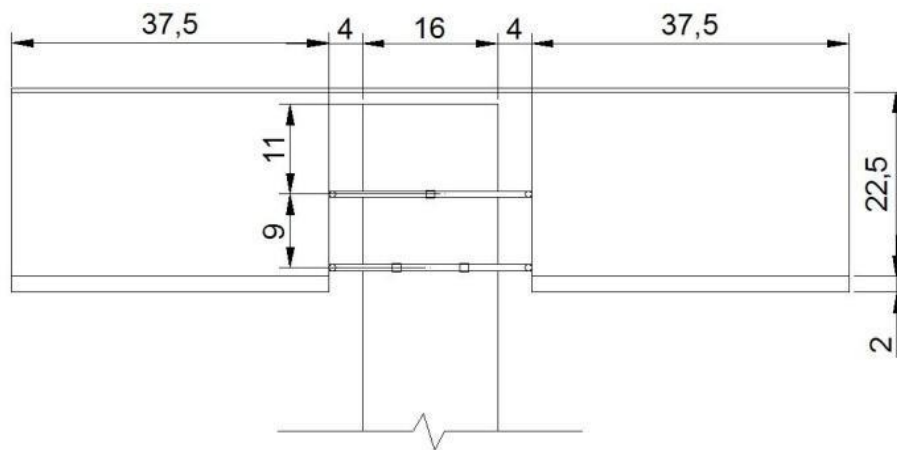


Figura 3.9 - Vista frontal do modelo físico (medidas em cm) (adaptado de Teixeira, 2012)

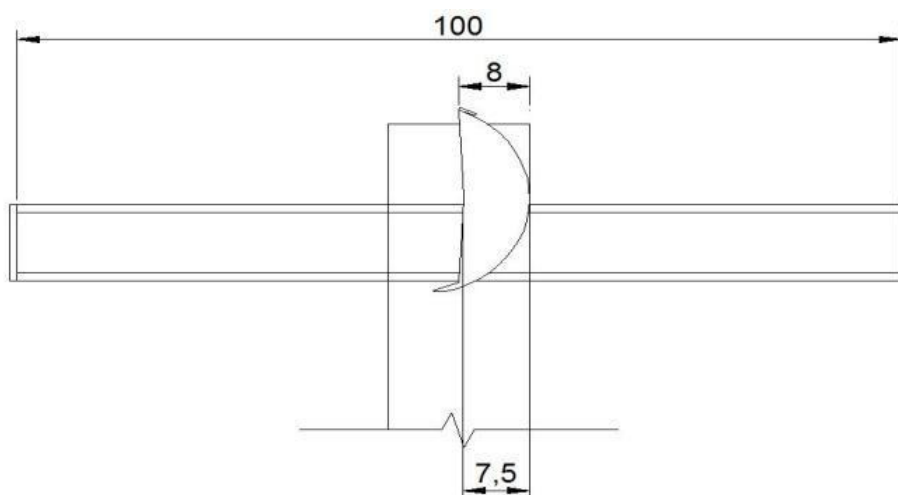


Figura 3.10 - Vista lateral do modelo físico (medidas em cm) (adaptado de (Teixeira, 2012))

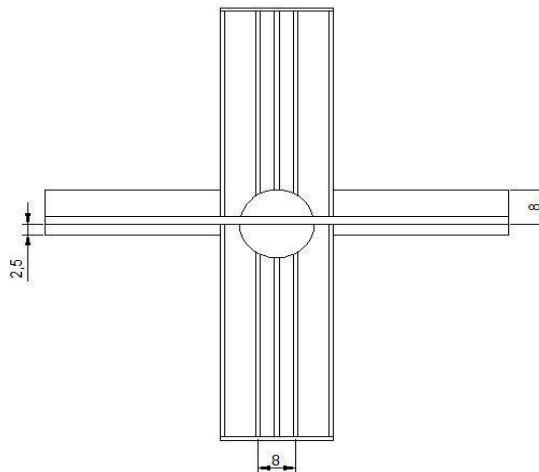


Figura 3.11 - Vista superior do modelo físico (medidas em cm) (adaptado de (Teixeira, 2012)).

Teixeira (2012), realizou testes no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica e Recurso Hídricos da FEUP, submetendo o modelo físico do dispositivo a agitação regular e irregular com diferentes características. Foram também estudadas diferentes inclinações do CECO de forma a perceber o modo como as mesmas afetariam o desempenho final do dispositivo. No plano de testes definido, foi analisado o desempenho do dispositivo para alturas de onda compreendidas entre 1 e 2,5 m, com períodos de 8, 10 e 12 s. As condições foram replicadas para uma inclinação do dispositivo CECO de 30 a 45°.

Com a conclusão dos seus ensaios, Teixeira (2012) frisou alguns aspetos que merecem especial destaque, nomeadamente: a estabilidade da base, e um bom sistema de guiamento dos tirantes. Uma boa solução para estes problemas permite evitar deslocamentos em outras direções que não a de produção de energia.

É ainda de realçar que mesmo tendo considerado um comprimento dos tirantes de cerca de três vezes superior ao considerado no registo de patente, verificou-se que ainda não seria o suficiente para ondas com uma altura superior a 4 metros.

No que concerne à amplitude do movimento de avanço do CECO, os resultados permitiram concluir que esta é significativamente influenciada pelo amortecimento introduzido pelo sistema de reprodução do PTO, nomeadamente, que esta diminuía com o aumento do amortecimento introduzido.

Outra das conclusões a que Teixeira chegou, foi que o sistema não era linear, pelo que não se poderia utilizar o *Response Amplitude Operator* (RAO) de forma a prever o comportamento para outras condições de agitação marítima.

Assim, após a análise dos resultados obtidos nos ensaios experimentais, Teixeira (2012), conclui que o dispositivo CECO se apresentava como um sistema de aproveitamento de energia das ondas viável para produção de energia renovável. Embora numa fase embrionária, os resultados foram satisfatórios para a fase em que se encontrava.

Procurando dar continuidade ao trabalho iniciado por Teixeira (2012), Marinheiro (2013) desenvolve um novo modelo, novamente no âmbito de uma dissertação de mestrado, procurando dar mais um passo na evolução do dispositivo CECO.

Apostando na construção de um modelo mais robusto, Marinheiro (2013), fez ainda alterações a nível da geometria dos módulos laterais móveis com vista a aumentar a eficiência do dispositivo. A principal alteração prende-se no aumento da dimensão vertical desses elementos instiga um aumento da área de contacto com a onda por unidade de largura do dispositivo (Marinheiro, 2013).

Na construção do segundo modelo físico foi novamente utilizada a escala geométrica 1/20 (Marinheiro, 2013), mas procurou-se que a geometria do novo modelo permitisse absorver uma maior parcela da energia disponível na coluna de água e minimizar os esforços de flexão aplicados no elemento superior que liga os dois módulos laterais móveis. Para isso, optou-se por modificar os módulos laterais móveis, aumentando a sua altura para 8.0 m e reduzindo a sua largura para 4.5 m (valores de protótipo). Outra das alterações introduzidas em relação ao registo de patente é, tal como em Teixeira (2012), o aumento do comprimento dos tirantes, uma vez que o comprimento especificado na patente revela-se insuficiente para um aproveitamento eficaz da energia da agitação marítima característica da costa oeste portuguesa. Assim sendo, Marinheiro (2013) adota um comprimento final de tirantes de 24 m para o seu protótipo. As Figura 3.12 a Figura 3.17 apresentam esquemas representativos do modelo construído por Marinheiro (2013).

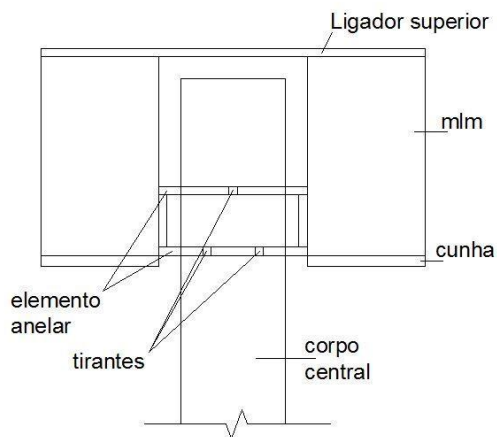


Figura 3.12 - Vista de frente (adaptado de Marinheiro 2013).

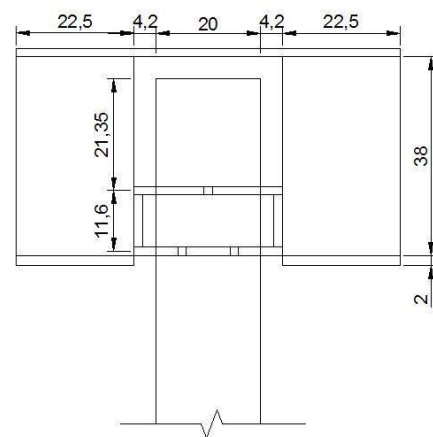


Figura 3.13 - Vista de frente (medidas em cm) (adaptado de Marinheiro 2013).

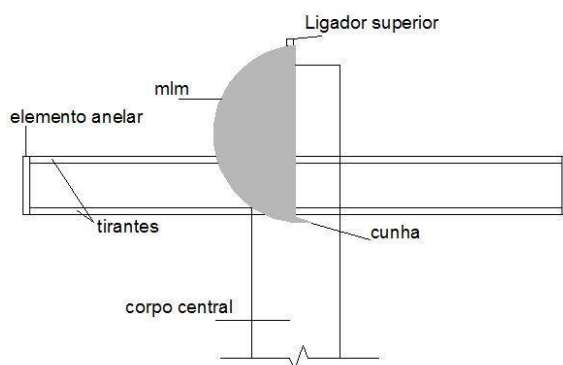


Figura 3.14 - Vista lateral (adaptado de Marinheiro 2013).

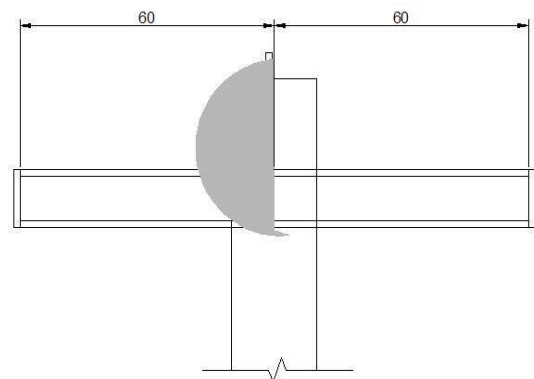


Figura 3.15 - Vista lateral (medidas em cm) (adaptado de Marinheiro 2013).

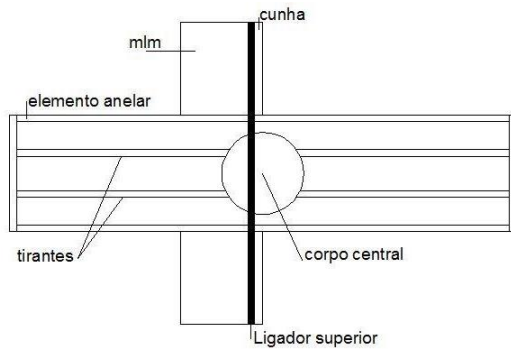


Figura 3.16 - Vista superior (adaptado de Marinheiro 2013).

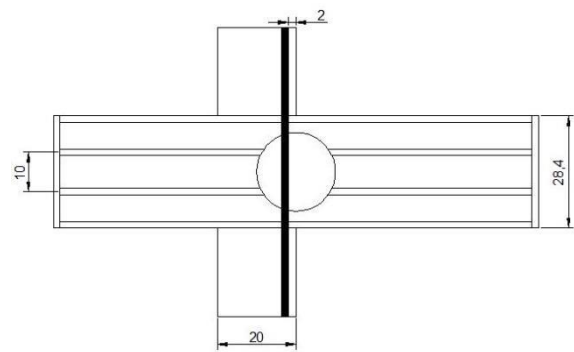


Figura 3.17 - Vista superior (medidas em cm) (adaptado de Marinheiro 2013).

Marinheiro (2013), estudou também a influência do grau de submersão dos módulos laterais móveis no comportamento global do dispositivo, tendo considerado os graus de submersão de 60 e 80%. Os graus de submersão considerados foram ensaiados para estados de agitação regular e irregular, com diferentes alturas e períodos de onda. À semelhança de Teixeira (2012) foram também considerados diferentes níveis de amortecimento e ângulos de inclinação do dispositivo.

Marinheiro conclui assim que, tratando-se de estados de agitação com períodos e alturas de onda mais elevados, se torna mais vantajoso para o funcionamento do CECO um grau de submersão dos MLMs de 80%.

Outra das conclusões a que Marinheiro (2013) chegou, foi que para uma inclinação do dispositivo de 45° é a mais adequada para períodos de onda curtos, perdendo vantagem para a inclinação de 30° nos períodos de onda maiores.

Em suma, o trabalho realizado por Marinheiro permitiu assim compreender melhor de que forma parâmetros como a inclinação do dispositivo, o grau de submersão, a geometria do conversor e ainda os diversos tipos de agitação marítima acabam por afetar o desempenho do CECO. Marinheiro valida ainda a hipótese de que a sua nova geometria dos módulos laterais móveis se revela mais vantajosa.

Depois de modelado o dispositivo, foi possível efetuar a calibração do modelo numérico com recurso aos resultados experimentais obtidos nos testes com os modelos físicos construídos anteriormente. Com o modelo calibrado torna-se relativamente fácil alterar as características geométricas do CECO e do seu PTO e/ou ainda as condições de teste, sendo assim possível caracterizar o seu desempenho para uma extensa gama de condições de operação, o que se revelou um passo essencial no desenvolvimento e otimização do CECO.

Tendo agora resultados experimentais obtidos a partir dos modelos físicos do CECO, Perdigão (2015), dá mais um passo no desenvolvimento do dispositivo avançando para a modelação numérica.

Para tal, Perdigão (2015), recorre ao pacote numérico “ANSYS Academic Research Offshore/Marine”. Este pacote numérico não está preparado para a simulação direta de dispositivos de conversão da energia das ondas, pelo que numa primeira fase foi necessário analisar a melhor forma de reproduzir o funcionamento do dispositivo CECO nesse *software*. Nesse trabalho, foram realizados alguns ajustes e simplificações que permitissem simular da forma o mais aproximada e realista possível o dispositivo CECO e o seu funcionamento.

Foi também estimado o recurso energia das ondas (valores médios) disponível na costa Atlântica da Península Ibérica, no período entre 2005 e 2014. Este estudo tirou partido do modelo espectral SWAN, que foi validado com dados adquiridos a partir de duas boias ondógrafo operadas pela autoridade portuária espanhola (Ramos *et al.*, 2018). Com essa validação efetuada, foi possível utilizar o modelo SWAN para fazer a caracterização mensal e anual da energia das ondas disponível na área em estudo.

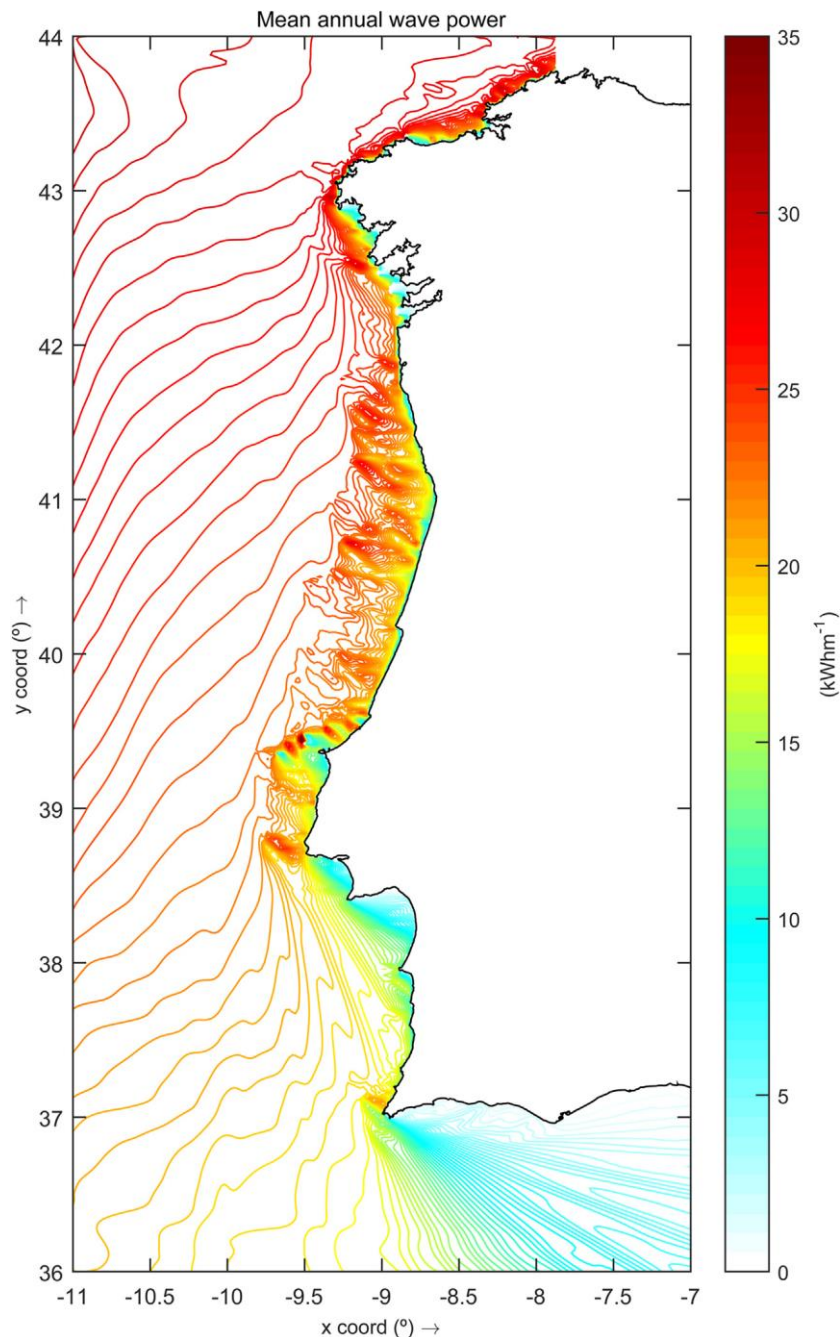


Figura 3.18 - Potência média anual por metro de onda durante 2005-2014 (adaptado de Ramos *et al.*, 2018).

Pela análise dos resultados obtidos, é possível observar que a distribuição espacial do recurso energia das ondas apresenta diferenças significativas ao longo da costa portuguesa. Na zona mais a norte, o

recurso médio por metro de frente de onda excede os 35 kWhm^{-1} . Em contrapartida, na zona mais a sul, verificou-se que o recurso disponível é significativamente inferior, com valores médios entre 15 e 20 kWhm^{-1} .

Numa análise mensal², foi possível concluir que existem diferenças consideráveis durante os períodos de Verão e de Inverno. Os períodos mais energéticos são, como seria de esperar, nas regiões a Norte durante o Inverno, onde se alcançam valores na ordem dos 60 kWhm^{-1} . Nos períodos de Verão, a distribuição é relativamente homogênea ao longo de toda a costa, com valores a rondar os 15 kWhm^{-1} (Ramos *et al.*, 2018).

É, ainda, importante a análise da forma como a sazonalidade afeta a direção de propagação das ondas. Os resultados numéricos mostram que durante o Verão a direção das ondas predominante é a Oeste-Este, enquanto que no Inverno passa a ser a direção Noroeste. Dado que o funcionamento do CECO é unidirecional, torna-se evidente a importância da existência de um mecanismo que permita que este dispositivo se ajuste à direção das ondas incidentes, de forma a tirar o maior partido da energia das mesmas.

Outra questão importante é a influência da variação da maré no funcionamento do dispositivo CECO que, para a costa portuguesa, apresenta valores bastante significativos (na ordem dos 4 m). Na versão atual do dispositivo, o seu corpo central fixo, os tirantes e os módulos laterais móveis, são elementos interligados entre si. Sendo o corpo central fixo, a subida e descida do nível médio da água do mar condiciona o curso de funcionamento útil dos tirantes, uma vez que a posição dos elementos flutuantes será sempre determinada pelo nível da superfície livre da água.

Uma solução que visa corrigir as situações descritas consiste na utilização de um corpo cilíndrico, idêntico ao do corpo central fixo, mas com secção ligeiramente inferior, que sirva de guia ao corpo central. Este último terá uma boia que o permita flutuar e acompanhar as variações de nível da maré. Como se trata de dois corpos cilíndricos, o corpo exterior (central) poderá rodar ligeira e livremente sobre o eixo fixo, que será o corpo central interior, por forma a alinhar-se com a direção de propagação da agitação. Para que este alinhamento seja perfeito e automático, é necessária a aplicação de uma espécie de barbatana (ou leme) na parte traseira do corpo central, Figura 3.19 (Marinheiro, 2013).

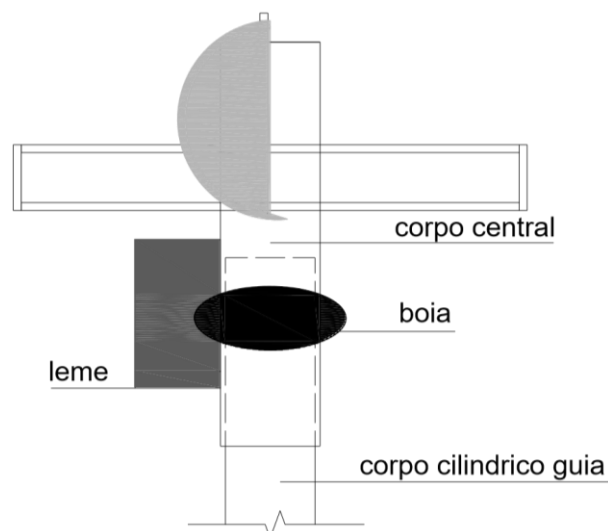


Figura 3.19 - Esquema representativo de uma possível solução para o ajuste do dispositivo CECO em função do nível de maré e direção de propagação da agitação marítima (adaptado de Marinheiro, 2013).

² A potência média mensal por metro de onda encontra-se presente numa figura em anexo.

O recurso energia das ondas foi também analisado em três áreas distintas da costa portuguesa (norte, centro e sul). Para este propósito, as condições de agitação marítima computadas pelo SWAN (entre 2005 e 2014) foram utilizadas para construir as matrizes omnidirecionais de energia das ondas que, para os diferentes estados de mar (caracterizados em termos de altura de onda significativa, H_{m0} , e período de onda de pico, T_p), apresentam o número de horas de ocorrência anual e a energia da onda (López *et al.*, 2018). A Figura 3.20 apresenta a localização das áreas estudadas.

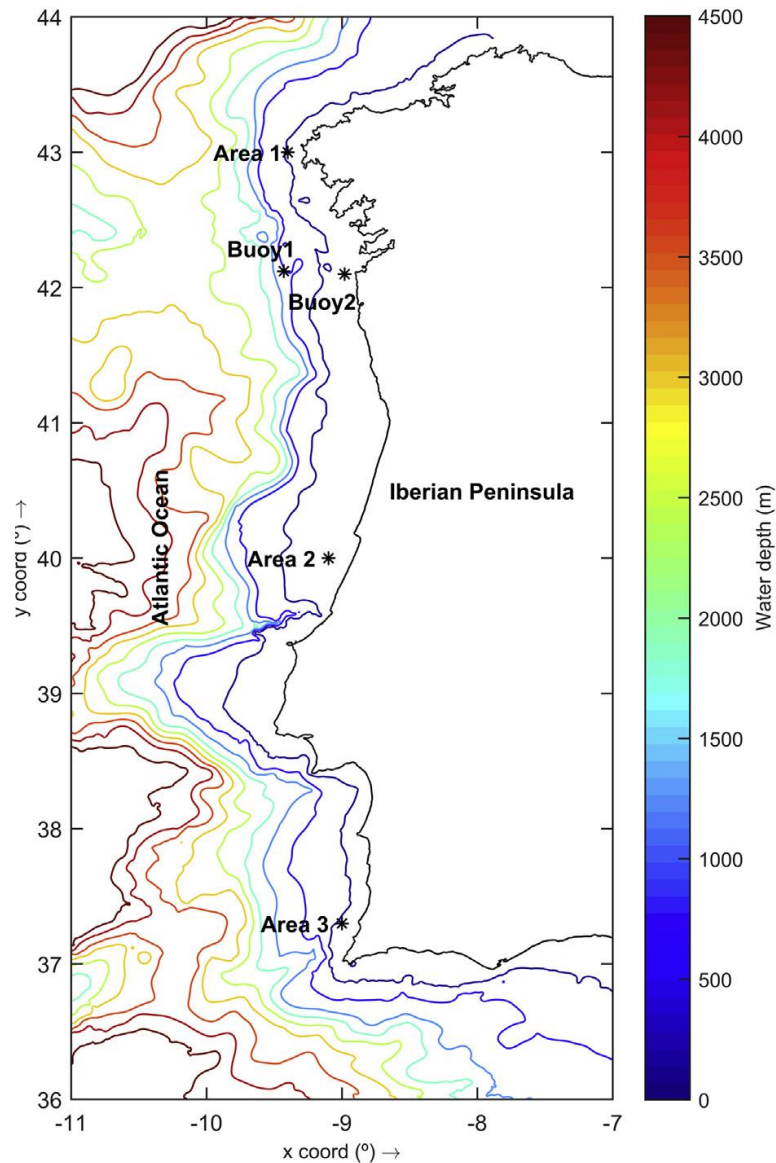


Figura 3.20 - Localização das áreas estudadas (adaptado de López, 2018).

As matrizes omnidirecionais do recurso energia das ondas foram definidas para os cenários mensais e anuais (para as localizações previamente referidas), e para as três profundidades de água já referidas (30, 40 e 50 m). A Figura 3.21 mostra as matrizes referidas para um cenário anual médio em cada uma das localizações assinaladas no mapa da Figura 3.20 (Área 1, 2 e 3).

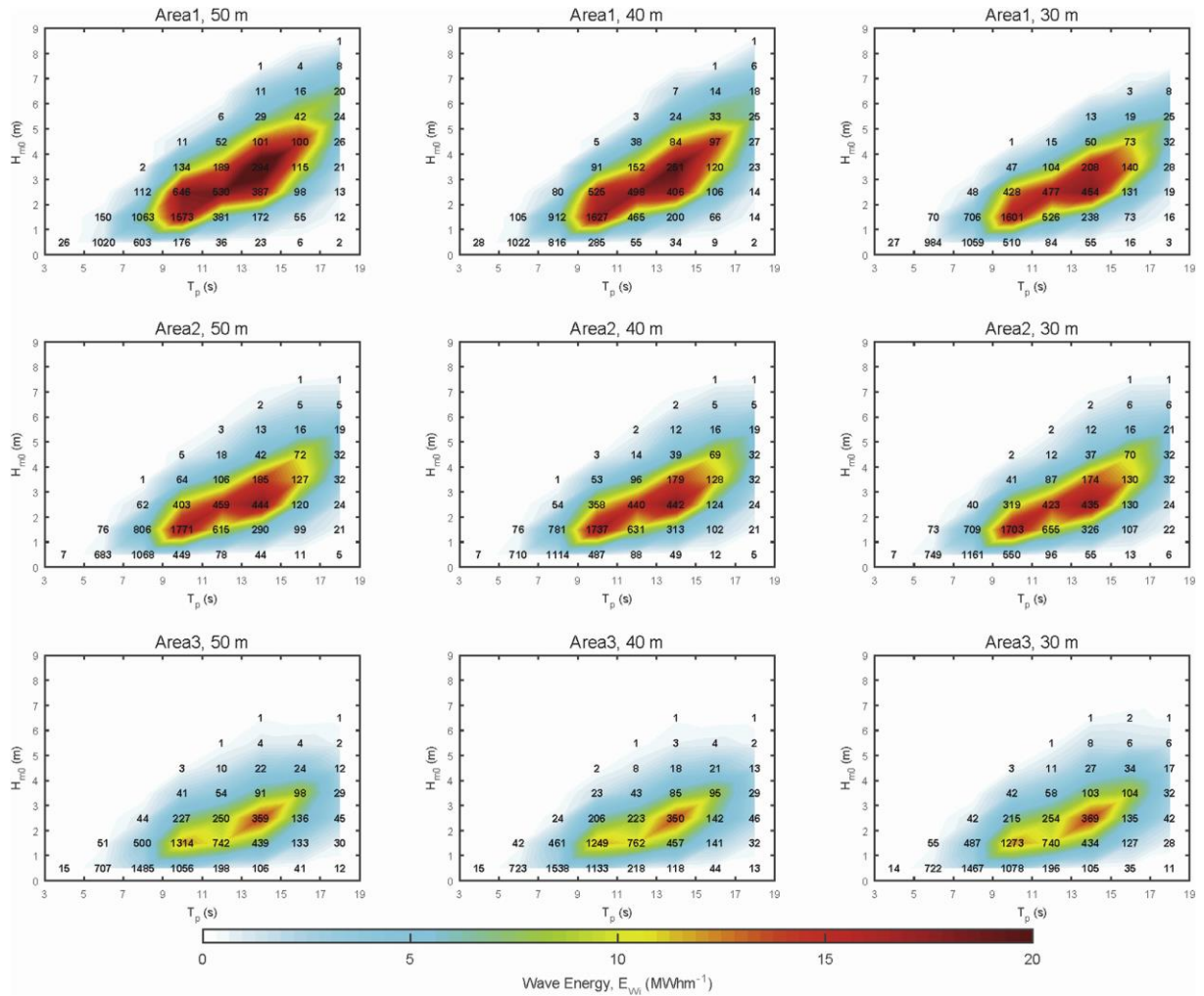


Figura 3.21 - Matrizes com o recurso energia das ondas a diferentes profundidades de água para as Áreas 1, 2 e 3. Mapa de energia a cores (MWhm^{-1}); Números (número de horas de ocorrência anuais) (adaptado de López *et al.*, 2018).

A Figura 3.21 mostra que na região norte (área 1) a maior parte da energia está associada a alturas de onda significativa entre 1.5 e 5.0 m e a períodos de onda de pico na ordem dos 9 a 16 s, com alguns estados de mar a alcançar valores de 20 MWh por metro de frente de onda.

No entanto, para a área mais a sul (área 3), a energia disponível desce consideravelmente, estando os estados de mar mais energéticos concentrados em alturas de onda significativa na ordem dos 1 a 3 m, e períodos de pico de 11 a 15 s.

Foi ainda possível concluir que a profundidade de água tem uma influência não desprezável na energia das ondas disponível. O caso mais evidente é nas regiões a norte, onde a energia disponível diminuiu aproximadamente 10% com a diminuição da profundidade de 50 para 30 m (Ramos *et al.*, 2018).

Nos testes experimentais realizados por Teixeira (2012) e Marinheiro (2013), a profundidade de água de funcionamento do dispositivo CECO foi considerada igual a 16 m. Esta profundidade é considerada baixa e poderá conduzir a sobrecargas na estrutura originadas pela rebentação das ondas (Pérez-collazo *et al.*, 2015).

A influência da profundidade da água no desempenho dispositivo CECO foi estudada por Ramos *et al.*, 2018. Para profundidades de 30, 40 e 50 m, e um dispositivo CECO com 45° de inclinação, foram simulados 57 estados de agitação marítima irregular (por combinação de diferentes valores de altura de onda significativa, H_{m0} , e períodos de pico, T_p), assumindo uma forma espectral JONSWAP. A partir dos resultados obtidos, foram construídas as matrizes de potência absorvida pelo dispositivo, para as três profundidades consideradas, Figura 3.22.

Em termos de profundidade de água, para os três valores considerados, as simulações numéricas não mostraram uma influência significativa na potência absorvida pelo CECO, sendo apenas de salientar um pequeno decréscimo com o aumento da profundidade. Como era de esperar, os resultados obtidos mostram que a energia absorvida aumenta com a altura de onda significativa (H_{m0}). Verificou-se ainda que o desempenho do dispositivo CECO era melhor para os períodos de onda de pico entre os 10 e os 13 s. Possivelmente, o período natural de oscilação do CECO deverá estar compreendido entre esses valores, originando-se assim ressonância.

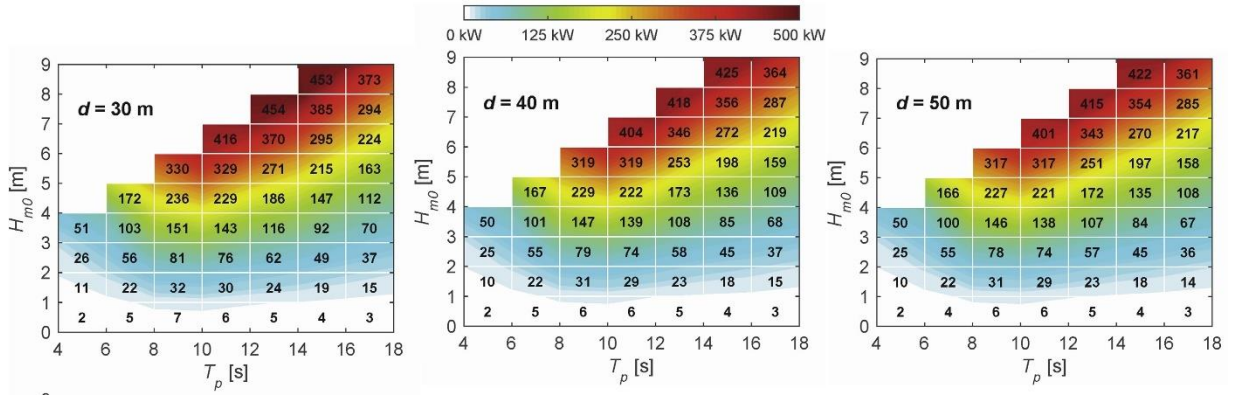


Figura 3.22 - Matrizes de potência absorvida pelo CECO para diferentes profundidades de água (adaptado de Ramos *et al.*, 2018).

O desempenho do dispositivo CECO foi analisado com base em dois parâmetros, a Energia Capturada (CE) e a Eficiência na Captura da Energia (CEE_{ff}), que são calculados com as expressões (3.1) e (3.2), respetivamente. Combinando a informação das matrizes de potência absorvida pelo CECO, Figura 3.22, e as matrizes relativas ao recurso energia das ondas torna-se assim possível analisar as potencialidades do dispositivo CECO ao longo da costa oeste Portuguesa.

$$CE = \sum_{j=1}^{Nbp} \sum_{i=1}^H P_i H_i \quad (3.1)$$

$$CEE_{ff} = \frac{\sum_{j=1}^{Nbp} \sum_{i=1}^H P_i H_i}{\sum_{j=1}^{Nbp} \sum_{i=1}^H J_i h_i CW_{CECO}} \quad (3.2)$$

As Figura 3.23 e Figura 3.24 apresentam os valores médios anuais do parâmetro Captura de Energia e Eficiência na Captura de Energia ao longo da costa Atlântica da Península Ibérica para diferentes profundidades de água.

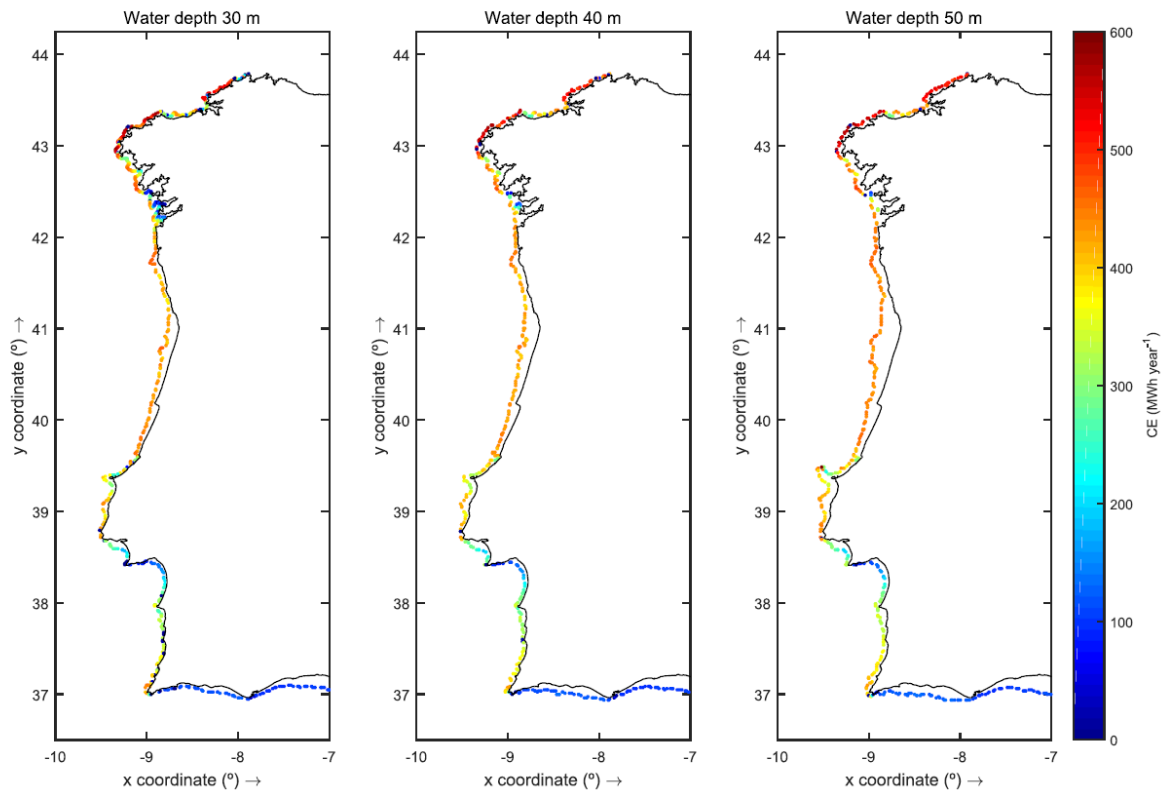


Figura 3.23 - Distribuição média anual da CE ao longo da área em estudo (adaptado de Ramos (2018))

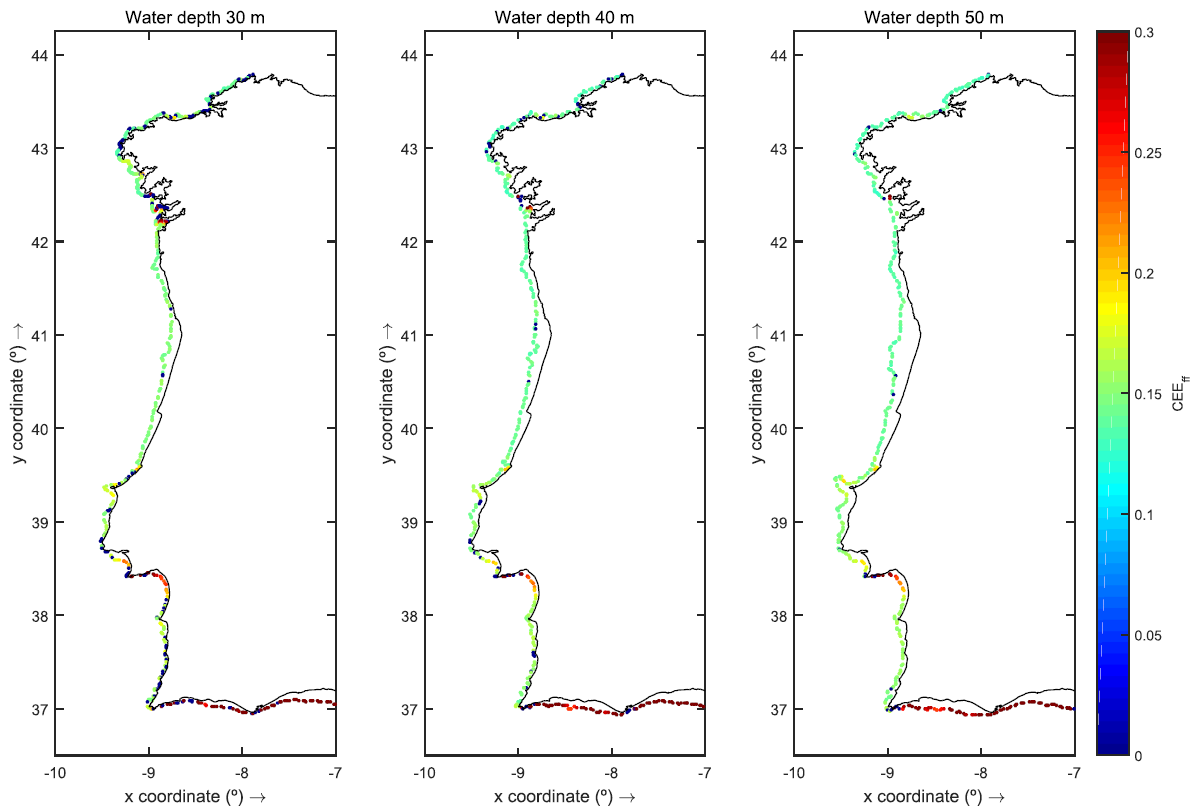


Figura 3.24 - Distribuição média anual da CEEff ao longo da área em estudo (adaptado de Ramos *et al.*, 2018).

O desempenho do dispositivo CECO para as condições de agitação marítima simuladas foi promissor, chegando a alcançar valores anuais de energia capturada de 600 MWh e uma eficiência de captura de cerca de 45%.

Quadro 3.2 – Valores médios anuais de CE e CEE_{ff} para profundidades de funcionamento (30, 40 e 50 m)
(adaptado de Ramos *et al.*, 2018)

Profundidade da água (m)	CE (MWh)	CEE _{ff} (%)
30	281	20.91
40	307	19.13
50	336	18.69

Foi ainda possível retirar as seguintes conclusões:

- Para o cenário anual, a energia capturada aumenta (de 9% para 17%) com a altura de água;
- Os estados de agitação marítima mais energéticos encontrados a maiores profundidades de água compensam o desempenho mais baixo do CECO nessas profundidades;
- Os valores médios anuais do parâmetro eficiência na captura da energia (CEE_{ff}) diminuem com o aumento da profundidade de água;
- A energia capturada total é mais elevada no inverno;

A eficiência na captura de energia é mais alta no verão que no inverno, aumentando de norte para sul. Pode, assim, concluir-se que o dispositivo CECO funciona melhor para condições de agitação marítima pouco ou moderadamente energéticas.

A Figura 3.25 apresenta os valores médios mensais da Energia Capturada pelo CECO, para diferentes profundidades nas três áreas assinaladas na Figura 3.20.

A Figura 3.26 apresenta os valores médios mensais da Eficiência na Captura da Energia pelo CECO, para diferentes profundidades de água nas três zonas referidas anteriormente.

Os resultados apresentados por Ramos *et al.* (2018) provam, uma vez mais, que a energia produzida pelo dispositivo CECO é extremamente sensível às características das ondas incidentes, nomeadamente à sua altura de onda significava e período de pico. Foi ainda possível concluir que a versão atual do dispositivo apresenta melhor desempenho (maiores eficiências de captura) para condições de agitação marítima intermédias, típicas dos meses de Verão e das localizações mais a sul da área em estudo. Estes resultados devem-se, possivelmente, ao facto do dispositivo CECO atual apresentar um período natural na ordem dos 8 a 10 s, que é próximo do período das ondas mais frequentes e com maior conteúdo energético nessas áreas e períodos do ano.

Assim, uma das possíveis melhorias no desempenho do dispositivo passa por alterar a sua geometria e características, de forma a ajustar o seu período natural às condições de agitação marítima típicas do trecho mais a Norte da costa Atlântica da Península Ibérica, pois é aí que se encontra o maior potencial energético. Esse ajuste poderá passar pela modificação da geometria dos módulos laterais móveis, ou da direção do seu movimento (inclinação do PTO), de forma a alterar o período natural do CECO.

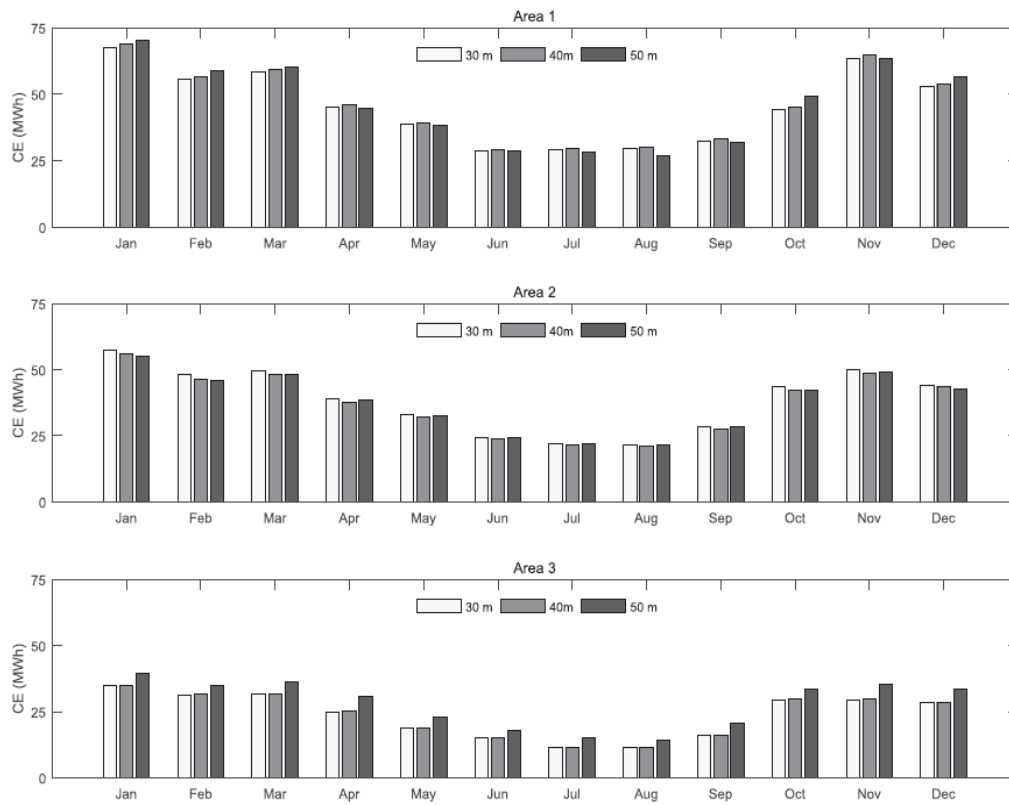


Figura 3.25 - Valores Mensais de Energia Capturada (MWh) para as Áreas 1,2 e 3 (adaptado de Ramos (2018)).

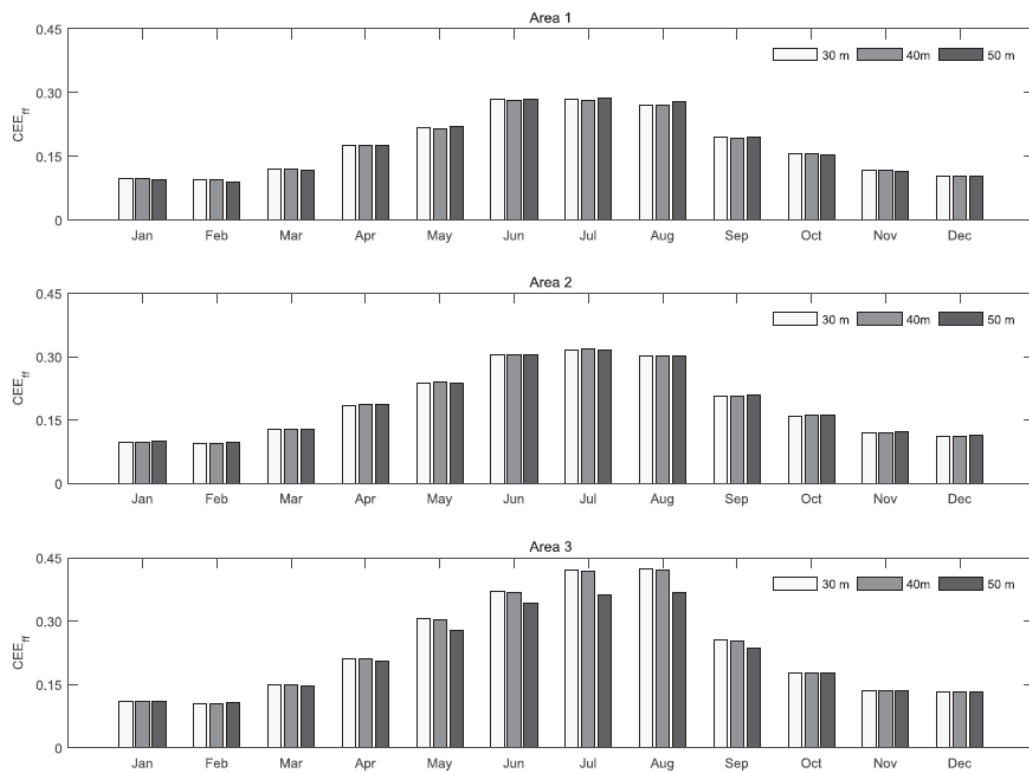


Fig. 13. Monthly values of CEE_f (MWh) for Areas 1, 2 and 3.

Figura 3.26 - Valores mensais da Eficiência da Energia Capturada para Área 1, 2 e 3 (adaptado de Ramos (2018)).

A influência da alteração da inclinação do dispositivo no seu desempenho foi estudada em detalhe por López *et al.* (2018). Esse estudo analisou a forma como a inclinação do movimento de translação dos módulos laterais móveis do CECO afetaria a potência absorvida para diferentes estados de agitação marítima. Foram assim simulados, para um período de 10 anos, os estados de agitação marítima na costa oeste da Península Ibérica (incluindo a zona piloto de São Pedro de Moel). Com esse trabalho, foi possível concluir que o valor máximo de energia absorvida acontecia para uma inclinação de 30° (com um valor de 692 kW) seguido por 45, 15, 60 e 75°, Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Parâmetros das matrizes de potência para diferentes inclinações do dispositivo CECO (adaptado de López, 2018).

Inclinação do dispositivo (°)	Potência máxima absorvida (kW)	Potência média absorvida (kW)	Desvio padrão da potência absorvida (kW)
15	306	79.8	78.1
30	692	185.4	191.6
45	454	150.5	136.1
60	237	83.3	69.4
75	146	48.7	40.9

A caracterização dos estados de agitação marítima ao longo da costa Atlântica da Península Ibérica, no período compreendido entre 01 de janeiro de 2005 e 31 de dezembro de 2014, foi realizada utilizando o modelo espectral SWAN, validado com registos reais de boias ondógrafo. Este trabalho permitiu assim quantificar a energia das ondas ao largo da costa em estudo, bem como a sua variação anual. Posteriormente, combinando as matrizes do recurso energia das ondas ao longo da costa com a matriz de potência do CECO, foi possível estimar a energia absorvida num ano médio (Figura 3.27), assim como a eficiência do dispositivo.

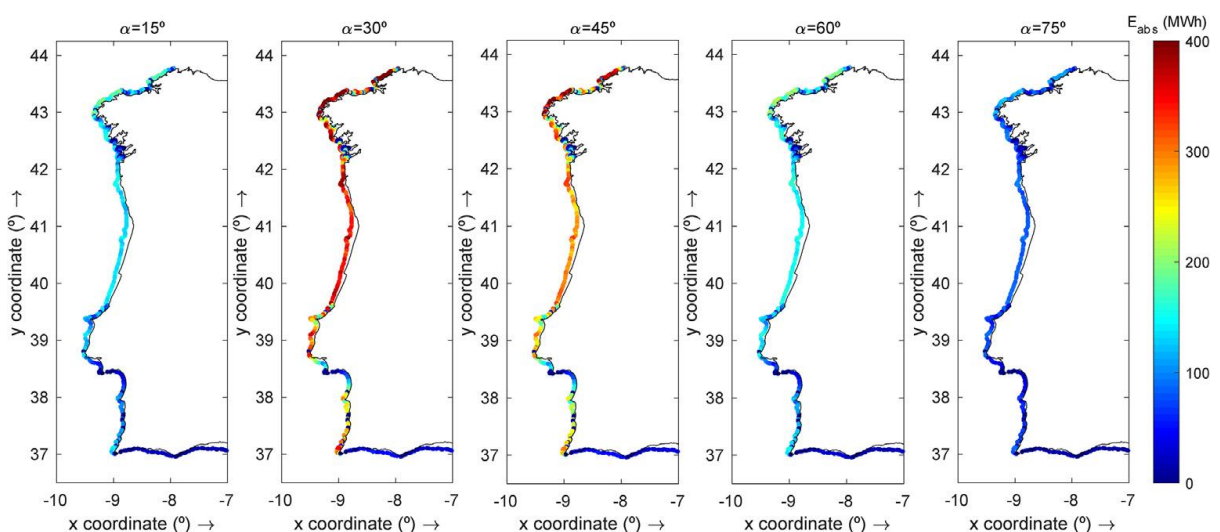


Figura 3.27 - Energia das ondas absorvida pelo CECO num ano médio para diferentes inclinações do PTO (adaptado de López *et al.*, 2018).

Analisando a Figura 3.27, é possível concluir que as inclinações com as potências médias absorvidas mais altas (30° e 45°, Quadro 3.3) são também aquelas que apresentam os valores de energia absorvida mais elevados. Por outro lado, em geral, a costa a norte de Lisboa é aquela que apresenta os valores mais elevados de energia absorvida.

4

INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

4.1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de um conversor de energia das ondas compreende várias fases. Uma abordagem possível é a que está baseada nos *Technology Readiness Level* (TRL), que apesar de ter sido direcionada inicialmente para dispositivos flutuantes, pode ser aplicável a qualquer outro tipo de WEC, com efeito, esse faseamento proporciona uma boa base de trabalho e um guia para mitigar os riscos técnicos e económicos que estão sempre associados a este tipo de projetos (Heller, 2012; Holmes e Nielsen, 2010). As fases do plano de desenvolvimento de WECs, associadas a diferentes níveis de TRL encontram-se sintetizadas no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Fases de desenvolvimento de WECs (adaptado de Heller, 2012).

Fase 1 (Validação do conceito)	Fase 2 (Projeto do modelo)	Fase 3 (Validação das componentes)	Fase 4 (Protótipo do dispositivo)	Fase 5 (Demonstração do protótipo)
▪ Conceito inicial / Invenção / Patente; ▪ Modelo à escala 1:25-100; ▪ Testes com ondas regulares e irregulares; ▪ Otimização e configuração da geometria do dispositivo; ▪ Desenvolvimento de modelos matemáticos; ▪ Primeira estimativa de desempenho do dispositivo para condições de mar realistas.	▪ Aumento da escala para 1:10-25; ▪ Maior número de parâmetros físicos medidos e condições de teste; ▪ Início dos testes com <i>Power Take Off</i> (PTO) realistas; ▪ Testes de sobrevivência.	▪ Finalização dos testes em laboratório e início de testes em mar num local calmo; ▪ Escala 1:3-10; ▪ Testes PTO prolongados; ▪ Os estudos numéricos devem passar de modelação no domínio da frequência para domínio de tempo.	▪ Devem estar disponíveis os dados realistas de desempenho, juntamente com os custos de fabricação e instalação; ▪ Escala 1:1-2; ▪ Ligação à rede não é essencial no início, mas deve ser considerada no final.	▪ Construção do WEC à escala 1:1 (Caso já esteja a esta escala na Fase 4 é apenas colocado no local para o qual foi projetado); ▪ Ligação à rede e venda de energia.

É assim perceptível que o desenvolvimento do dispositivo conversor, neste caso o CECO, é um processo gradual, em que se vai aumentando progressivamente as dimensões e a complexidade do mesmo. Após a construção de modelos físicos a diferentes escalas e a respetiva submissão a testes experimentais, é possível, a partir das conclusões retiradas, definir alterações de forma a que na fase final, o protótipo seja o mais desenvolvido e otimizado possível.

Para a realização de um estudo experimental de um dispositivo conversor da energia das ondas é necessário dispor de instalações e equipamentos que permitam uma correta reprodução das condições do caso em estudo. Sendo de especial importância para o presente trabalho, o tanque de ondas, o sistema de geração de ondas, o sistema de aquisição dos dados de agitação marítima, o sistema de medição de movimentos e o sistema de simulação do PTO.

A modelação física assume assim um papel crucial no desenvolvimento de um dispositivo conversor. Através da aplicação desta ferramenta é possível realizar uma análise comportamental do modelo, permitindo colmatar falhas e identificar possíveis melhorias para que o dispositivo seja otimizado nas fases seguintes. De forma a que os resultados obtidos no modelo físico possam ser extrapolados para o protótipo corretamente, é necessário garantir que as principais variáveis envolvidas se encontrem bem reproduzidas no modelo. Isto é alcançável utilizando critérios de semelhança, que garantam que a relação entre as variáveis geométricas, cinemáticas e dinâmicas do modelo e do protótipo sejam iguais a uma constante.

4.2. TANQUE DE ONDAS

Os ensaios do modelo físico do CECO foram realizados no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP, que apresenta 28 m de comprimento, 12 m de largura e 1,2 m de altura, tendo ainda na parte central um fosso com 4,5 m de comprimento, 2 m de largura e 1,5 m de profundidade.

A qualidade e a fiabilidade dos resultados dos ensaios no modelo físico é extremamente dependente do rigor com que são reproduzidas as condições de agitação marítima pretendidas. Devido às dimensões do tanque, este é propício a fenómenos de reflexão causados pelo sistema de geração de ondas e nas fronteiras do mesmo. Em condições reais, isto é, no local hipotético de implantação do CECO no mar, poderão ser inexistentes fenómenos de reflexão pelo que, de forma a garantir que as características de agitação irregular incidentes sejam iguais às pretendidas, torna-se importante mitigar as reflexões na instalação experimental.

Assim, para absorção das ondas geradas e controlo das reflexões induzidas pelas fronteiras físicas existentes, o tanque de ondas possui na extremidade oposta ao sistema de geração uma praia dissipadora composta por material granular. Esta praia consiste num talude rugoso que provoca a rebentação das ondas promovendo a dissipação de grande parte da sua energia. O sistema de geração integra também um módulo de absorção ativa das reflexões ao nível das pás do sistema de geração.

4.3. SISTEMA DE GERAÇÃO DE ONDAS

O tanque de ondas está equipado com um sistema de geração de ondas do tipo pistão desenvolvido pela HR Wallingford, UK, que permite reproduzir à escala as condições de agitação marítima pretendidas. O sistema permite gerar agitação com características irregulares de crista longa a 2D e de crista curta a 3D e ainda estados de agitação bidirecionais, regulares e irregulares com ondas de crista longa (2D). Para as simulações com estados de agitação marítima irregulares, o sistema permite ao utilizador a definição

do espectro pretendido, sendo possível que as ondas geradas estejam em conformidade com o espectro da JONSWAP, de *Pierson-Moskowitz* ou de qualquer outra forma espectral definida.

O sistema de geração é constituído por 16 pás independentes com 0.75 m de largura que funcionam a partir de servomotores elétricos operados a partir de uma caixa de engrenagem. Os servomotores são controlados por *drives* digitais inteligentes. Cada *drive* garante precisão no posicionamento e funcionamento das pás através do controlo do ganho e amortecimento do servomotor (Wallingford, 2018). O sistema pode funcionar com profundidades de água até 1.0 m e gerar ondas com alturas e frequências limitadas pela profundidade de água do tanque, a capacidade de geração do próprio sistema e dos limites físicos de rebentação da onda.

O sistema utiliza um software próprio, o *HR WaveMaker*, que é controlado remotamente a partir de um computador localizado na sala de controlo, Figura 4.2.

Para além da praia dissipadora previamente mencionada, o sistema de geração integra também um sistema de absorção ativa de reflexões, o *Dynamic Wave Absorption System*, desenvolvido também pela *HR Wallingford*. Este sistema tem como objetivo evitar que as ondas refletidas pelo modelo em estudo ou pelas fronteiras físicas do tanque de ondas que se propagam em direção ao sistema de geração, sejam de novo refletidas nas pás do sistema, causando a re-reflexão das ondas originalmente geradas. Este fenómeno deve ser evitado uma vez que estas re-reflexões podem sobrepor às ondas que estão a ser geradas originando ondas maiores que as pretendidas no interior do tanque (Rosa-Santos, 2010).

O funcionamento do sistema de absorção ativa consiste na medição em tempo real da elevação da superfície livre da água em cada uma das pás do sistema de geração, de modo a que este, faça um reajuste da posição da pá (posição equivalente da pá). Essa posição representa a posição que essa pá deveria ocupar para produzir a altura de água medida, se não existisse reflexão.



Figura 4.1 - Sistema de geração de ondas do LH da FEUP.

A Figura 4.2 apresenta o computador de controlo do sistema de aquisição de agitação marítima, o computador de controlo do sistema de geração e ainda o computador do sistema de aquisição de movimentos (respetivamente, da esquerda para a direita).



Figura 4.2 - Sala de controlo do tanque de ondas da SHRHA da FEUP.

4.4.SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE AGITAÇÃO MARÍTIMA

O sistema de aquisição de agitação marítima permite, por um lado, confirmar se o sistema de geração marítima está a reproduzir ondas com a altura pretendida, mas também avaliar a elevação da superfície livre da água em qualquer ponto do modelo físico.

A medição das condições de agitação é feita por um software de aquisição de dados, o *HR WaveData*, que permite a aquisição da diferença de potencial em sondas hidrodinâmicas instaladas na zona de teste, que convertem essa diferença em níveis instantâneos da elevação da superfície livre da água.

As sondas de níveis hidrodinâmicos são do tipo resistivo e são constituídas por um par de condutores (duas hastes de aço muito finas) instaladas em tripés que são colocados de forma a que a sonda fique parcialmente submersa. Para a medição da altura instantânea da superfície livre da água, faz-se circular entre os fios condutores das sondas uma pequena corrente elétrica, cuja diferença de potencial varia linearmente com a altura da água em cada instante no ponto onde está instalado.

De forma a que os resultados obtidos nos ensaios sejam os mais corretos possíveis, é importante que as sondas se encontrem corretamente calibradas tendo sido feita uma calibração diariamente no início de cada conjunto de testes.

O sistema de aquisição de agitação é também utilizado para garantir que o sistema de geração está a reproduzir ondas com a altura pretendida, permitindo, caso isso não se verifique, fazer um ajuste através de um coeficiente designado de fator de ganho, f_g .

Numa fase inicial do trabalho, onde se efetuou a calibração das condições de agitação³, foram dispostas cinco sondas de níveis hidrodinâmicos em posições estratégicas de forma a fazer uma boa caracterização

³ Procedimento descrito no capítulo 5.

da agitação marítima no tanque. A Figura 4.3 apresenta o esquema da localização das cinco sondas utilizadas durante a fase de calibração das condições de agitação.

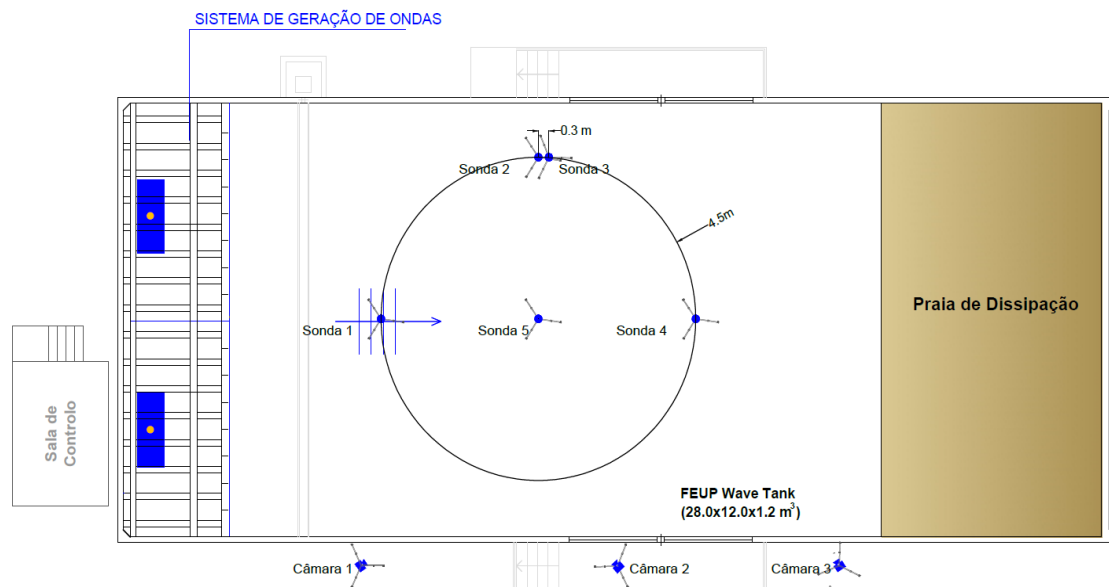


Figura 4.3 - Esquema da instalação das sondas durante a fase de calibração das condições de agitação.

Concluída a fase de calibração das condições de agitação marítima, a Sonda 5 foi removida de forma a permitir a instalação do modelo do dispositivo CECO na posição da mesma. Com este procedimento é assim possível ter valores de controlo dos níveis de agitação no local de implementação do CECO.

O utilizador deve ainda definir a frequência de aquisição pretendida para as leituras das sondas. No caso em estudo a frequência de aquisição utilizada foi de 40 Hz (valores de modelo).



Figura 4.4 - Sondas de níveis hidrodinâmicos (montadas em tripés).

4.5. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE MOVIMENTOS

O sistema utilizado para a aquisição dos movimentos do dispositivo CECO foi o sistema *Qualisys – Motion Capture System*. Este sistema permite medir os movimentos de corpos segundo seis graus de liberdade (três translações e três rotações). A medição é efetuada à distância através de tecnologia de deteção ótica, não havendo necessidade de contacto direto do sistema com o dispositivo.

Entre os vários componentes do sistema, destacam-se, essencialmente, as câmaras de infravermelhos, as marcas refletoras e um computador que controla todo o sistema através de um software específico (*Qualisys Track Manager*) que permite a aquisição, registo e processamento dos dados.

O modo de funcionamento do sistema de aquisição de movimentos *Qualisys* consiste na emissão de *flashes* de luz infravermelha por parte das câmaras digitais especiais, que são refletidos pelas marcas ou alvos refletores instalados no corpo. Essa reflexão é novamente capturada por sensores nas câmaras, permitindo assim a determinação do deslocamento da marca refletora em relação à posição inicial. A frequência de emissão dos *flashes* é definida pelo utilizador e a esta está associada ao número de posições dos refletores registadas pelo sistema.

A disposição das câmaras deve permitir a visualização, em qualquer momento do ensaio, de todas as marcas refletoras posicionadas estrategicamente no dispositivo CECO por pelo menos duas das câmaras. É por isso fundamental que o ‘volume de medição’ formado pela sobreposição de duas ou mais câmaras, seja o suficiente para capturar todo e qualquer movimento do dispositivo.

O sistema *Qualisys*, à semelhança das sondas de níveis hidrodinâmicos, deve ser calibrado antes da sua primeira utilização. A calibração é realizada no *software* próprio do sistema, o *Qualisys Track Manager* (QTM), e consiste na colocação de uma estrutura de referência em forma de “L” (eixo dos *xx* correspondente ao lado maior do “L” e o eixo dos *yy* ao lado menor) com quatro marcas refletoras dentro do volume de medição, numa posição fixa, e uma estrutura móvel, em forma de “T”, com duas marcas refletoras, que é movimentada dentro do volume de medição em todas as direções, procurando-se cobrir o maior volume possível. A qualidade da calibração está diretamente relacionada com o número de direções e posições da estrutura móvel “T”, sendo fundamental adquirir pontos de calibração em todo o volume de medição, dando especial ênfase às zonas de movimentação do dispositivo, procurando-se mover a estrutura em forma de “T” de forma aleatória, evitando movimentos cíclicos ou periódicos. A um tempo de calibração maior está normalmente associado um resíduo médio inferior.

Durante a calibração, o *software* QTM, define um sistema global de eixos, segundo a posição e orientação da estrutura fixa “L”, que poderá ser movido e rodado para outra posição específica dentro do volume de medição após a calibração.

No final desta calibração é verificado o resíduo médio que lhe foi associado. Para o caso em estudo, o resíduo foi considerado aceitável caso fosse inferior a 0.6 mm, validando-se assim a calibração.

De forma a garantir a qualidade das medições, o sistema *Qualisys* deve ser calibrado antes de cada uma das sessões de testes e quando há uma alteração na posição de uma das câmaras.

É ainda importante referir que o sistema é bastante sensível a qualquer outro tipo de reflexões, pelo que na fase de calibração, deve-se ter em conta o número de marcas refletoras que cada câmara constituinte do sistema está a captar, devendo apenas ser captadas as seis marcas das estruturas de calibração (4 da estrutura em “L” e duas da estrutura móvel “T”). No caso no tanque de ondas do laboratório da FEUP, as câmaras do *Qualisys* eram sensíveis à luz solar que entra pela cobertura, que originavam captações indesejáveis no ensaio. Assim, o *software* QTM, dispõe de uma ferramenta “máscaras” que permite “ignorar” as zonas do volume de medição definidas no *software*.

Finalizado o processo de calibração do *Qualisys*, o *software* determina a posição relativa de cada uma das câmaras e posteriormente, por triangulação, a posição, velocidade e aceleração das marcas refletoras em cada instante.

Quando as marcas refletoras estão dispostas no mesmo corpo, com posições fixas entre si, o sistema *Qualisys* permite a definição de um corpo rígido. Para tal, o corpo rígido tem que estar definido por três ou mais marcas refletoras, sendo recomendado o uso de pelo menos quatro (Santos, 2010).

A definição do corpo rígido traduz a forma como o sistema de medição de movimentos analisa e distingue essas marcas dentro do volume útil de medição. Para tal, o *software* QTM permite caracterizar os movimentos de um só corpo rígido segundo os seus seis tipos de movimento de translação e de rotação em vez de se obterem dados da posição espacial de cada uma das marcas refletoras.

As marcas refletoras constituintes do corpo rígido devem cumprir algumas condições de forma a permitir uma correta definição do mesmo, nomeadamente:

- As quatro marcas refletoras recomendadas deverão estar acopladas no corpo rígido de forma a que pelo menos uma delas esteja num plano vertical distinto das restantes, de forma a que o sistema consiga definir corretamente o referencial local;
- As marcas refletoras constituintes do corpo rígido não podem sofrer qualquer deslocamento relativo entre elas ao longo dos testes experimentais, para que não sejam alteradas as características de referenciação do corpo;
- Não deve haver mais do que um plano de simetria vertical na disposição das marcas, para que o *software* consiga detetar corretamente a orientação do corpo.

O corpo rígido tem obrigatoriamente de se encontrar numa posição estática durante a sua aquisição. Após essa fase o *software* QTM permite a definição de um sistema de eixos local, que pode ser posicionado em qualquer ponto do volume de medição. O referencial local tem como objetivo efetuar uma melhor caracterização dos deslocamentos do dispositivo.

4.6. SISTEMA DE REPRODUÇÃO DO PTO

Os sistemas de extração de energia (*Power Take-Off* – PTO) normalmente utilizados no protótipo, na maior parte dos casos, não se encontram disponíveis à escala do modelo físico. Assim, conforme foi referido anteriormente, a definição do sistema PTO a utilizar no modelo físico não é uma tarefa fácil e linear.

Embora no presente trabalho se tenha equacionado a possibilidade de utilizar um gerador elétrico de uma mini eólica, preparado para funcionar com bons rendimentos a baixa rotação, tal não foi possível uma vez que os mesmos não se encontravam preparados para funcionar em ambientes que há o risco de haver contacto com água.

A solução encontrada consistiu na utilização de um motor elétrico a funcionar como gerador, capaz de introduzir no sistema diferentes níveis de amortecimento, através da modificação de uma resistência externa. O sistema de reprodução do PTO adotado é, portanto, um sistema de transmissão mecânica, onde o movimento de translação da parte móvel do CECO é transmitido ao motor por parte de uma cremalheira e uma polia.

Numa primeira fase optou-se pelo motor “MOT-DC-42-M-A-D”, comercializado pela *Igus* (Figura 4.5). A escolha deste motor teve em consideração a potência que é possível extrair do mesmo, a sua caixa redutora, e ainda as suas boas propriedades de resistência à água (IP41).



Figura 4.5 - MOT-DC-42-M-A-D e o respetivo cabo de ligação.

No entanto, após uma primeira análise e testes iniciais⁴, constatou-se que o motor apresentava uma resistência interna muito elevada que não se adequava às condições de funcionamento do dispositivo CECO. Através desses testes iniciais calculou-se, ainda, o coeficiente de amortecimento que o motor induziria no CECO para as duas situações limite: circuito aberto (resistência mínima) e circuito fechado (resistência máxima). Com esse cálculo pretendia-se determinar a gama de coeficientes de amortecimento que seria possível simular e, ainda, se o coeficiente de amortecimento ótimo do PTO estava compreendido nessa gama. Os valores obtidos para o protótipo foram de 23 kN.s/m (para o circuito aberto) e de 1078 kN.s/m (para o circuito fechado).

De acordo com os estudos numéricos realizados (Rodriguez, 2018), o coeficiente de amortecimento ótimo para a nova geometria do CECO rondaria os 12 kN.s/m (no protótipo), o que inviabiliza o motor com caixa de redutora de 24 vezes.

Surgiu, assim, a necessidade de alterar o motor anteriormente selecionado, tendo-se suspeitado que a elevada resistência interna do mesmo se pudesse dever à razão da caixa redutora ou ainda a algum tipo de vedante interno devido à resistência contra a água (IP41).

O novo motor, “MOT-AE-B-024-001-037-F-A-AAAA”, também comercializado pela *Igus*, apresenta uma caixa redutora de 10 vezes, e não possui qualquer tipo de proteção externa contra a água, apesar da sua construção compacta e sem aberturas. Foram também realizados testes de caracterização para os dois extremos, tendo-se obtido valores para o coeficiente de amortecimento entre 2.2 e 151 kN.s/m (circuito aberto e fechado, respetivamente).

Fica assim evidente que este segundo motor é mais adequado aos testes pretendidos. O Quadro 4.2 sintetiza algumas principais características dos motores referidos. Os coeficientes de amortecimento apresentados poderão possuir alguma incerteza, uma vez que o processo de caracterização (explicado na seção 5.3) foi realizado manualmente e, apesar da repetição de cada um dos ensaios (quatro vezes), poderão existir alguns erros.

⁴ Resultados dos testes presentes nos anexos.

Quadro 4.2 – Quadro síntese das características dos dois motores.

Motor	MOT-DC-42-M-A-D	MOT-AE-B-024-001-037-F-A-AAAA
Voltagem máxima [V]	24	24
Corrente nominal [A]	2.3	0.5
Resistência Interna [Ω]	3.0	29.2
Rácio de Engrenagens [i]	24	10
Peso [kg]	0.580	0.207
Classe de Proteção	IP41	s/ proteção
Coeficiente de amortecimento mínimo	23 kN.s/m	2.2 kN.s/m
Coeficiente de amortecimento máximo	1078 kN.s/m	151 kN.s/m

A Figura 4.6 apresenta os dois motores que foram caracterizados no presente estudo em modelo físico.



Figura 4.6 - Motor com a caixa redutora de 10x (à esquerda) e motor de caixa de redutora de 24x (à direita).

4.7.SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DO PTO

O sistema de monitorização do PTO tem como função medir de forma direta a potência instantânea produzida pelo sistema utilizado na reprodução do PTO (motor elétrico) no modelo físico.

Para o efeito, com o apoio do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da FEUP, foi desenvolvido um sistema que permite medir em tempo real a diferença de potencial (ddp) entre os dois polos do motor elétrico. Com os registos obtidos é depois possível estimar a potência elétrica produzida pelo modelo do dispositivo CECO.

O sistema de monitorização desenvolvido é composto por vários componentes, representados na Figura 4.7, de onde se destaca um router, uma *board* de ligação do motor e um microcomputador de processamento da informação.



Figura 4.7 – *Board*, microcomputador e router de ligação do Sistema de Monitorização do PTO.

O movimento de rotação induzido no motor pelo sistema cremalheira-engrenagem, faz com que o motor funcione como gerador. A corrente elétrica gerada que entra no circuito fechado, depois de repartida pelos divisores de tensão, passa pelo modo de aquisição de dados que mede instantaneamente os valores, tendo por base a frequência de aquisição pré-selecionada⁵. A ferramenta de monitorização do PTO desenvolvida dispõe de uma aplicação para computador que permite visualizar e registar as leituras instantâneas da diferença de potencial durante os testes experimentais, Figura 4.8. Esta aplicação permite a criação de um ficheiro em formato texto “.txt” com as diferenças de potencial registadas ao longo do ensaio.

Um aspeto que foi ainda considerado durante o desenvolvimento deste sistema, foi a importância da sincronização entre o Qualisys e o sistema de monitorização do PTO, isto é, que o início do registo dos valores da diferença de potencial e da captura do Qualisys fosse simultâneo. Tal foi possível tirando partido da possibilidade de utilização de um *external trigger* e de um cabo de controlo que liga na câmara do sistema de aquisição de movimentos.

Assim, o cabo de *trigger in* das câmaras foi ligado à *board*. Estando todos estes sistemas interligados, é possível controlar tanto a monitorização do sistema PTO, como a aquisição de movimentos através da aplicação para computador desenvolvida, Figura 4.8.

⁵ A frequência de aquisição utilizada foi de 40 Hz (40 registos por segundo) de forma a coincidir com a frequência de aquisição das sondas de níveis hidrodinâmicos e do sistema de medição de movimentos.

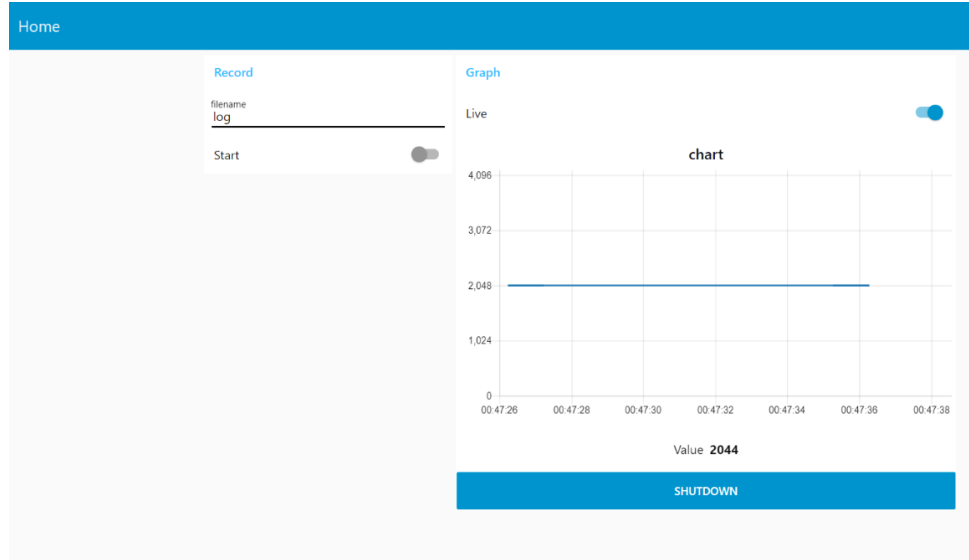


Figura 4.8 - Interface da aplicação para computador.

Os valores da ddp registados pelo sistema de monitorização do PTO necessitam de uma conversão para a unidade Volt, através de,

$$ddp (V) = \frac{1911 - N}{78.5} \quad (4.1)$$

em que N representa o valor registado pelo sistema de monitorização do PTO.

O sistema de monitorização do PTO permite ainda alterar a resistência externa associada ao motor, sendo assim possível testar o funcionamento do CECO para diferentes coeficientes de amortecimento do PTO. As resistências são ligadas na parte inferior da *board*, através de dois fios que ligam a mesma (em série) ao motor e ao sistema de monitorização do PTO. A Figura 4.9 apresenta a *board* de ligação e algumas das resistências utilizadas.



Figura 4.9 - *Board* do sistema de monitorização do PTO.

4.8.MODELAÇÃO FÍSICA

4.8.1.INTRODUÇÃO

Conforme referido anteriormente, no desenvolvimento de um dispositivo conversor da energia das ondas, é importante que sejam desenvolvidos modelos físicos pois permitem uma boa percepção dos fenómenos a que o protótipo estará sujeito, possibilitando colmatar falhas e apontar possíveis otimizações para o mesmo, sem que ao mesmo tempo lhe esteja associado o elevado custo de construção do protótipo.

A complexidade dos fenómenos hidráulicos envolvidos dificultam a obtenção de soluções teóricas analíticas (Taveira Pinto, 2011). Para obter essas soluções teóricas são necessárias simplificações do meio físico, no que diz respeito, por exemplo à geometria, e das equações que regem os fenómenos hidráulicos.

É então recorrente a utilização de modelos físicos reduzidos para simular fenómenos reais que acontecem no protótipo. Um modelo físico é uma reprodução, normalmente a uma escala reduzida e simplificada, de um protótipo que permite reproduzir tanto os aspetos lineares como os não lineares dos diversos fenómenos hidráulicos, evitando as simplificações da modelação numérica, que simplificam a morfologia do meio e as equações fundamentais, por supressão ou linearização dos termos não lineares (Taveira Pinto, 2011).

De forma a assegurar que as características do protótipo são devidamente reproduzidas no modelo físico, recorre-se às condições de semelhança. A semelhança entre um protótipo e um modelo obtém-se quando todas as relações possíveis entre as variáveis geométricas, cinemáticas e dinâmicas do modelo e do protótipo são iguais a uma constante. Contudo, na prática, muito dificilmente se consegue obter uma semelhança perfeita entre o modelo e o protótipo, optando-se por reproduzir no modelo apenas as ações com mais interesse para o caso em estudo.

Podem ainda surgir diferenças consideráveis entre os parâmetros do modelo e o protótipo devido a efeitos de modelo, escala ou erros de medição. Os efeitos de modelo têm origem numa reprodução incorreta das características do protótipo, tais como a geometria, caudal ou forma de geração das ondas e ainda das propriedades do fluido utilizado. Os efeitos de escala surgem devido à incapacidade de manter constante os rácios das forças mais relevantes entre o modelo e o protótipo. Por fim, os erros de medição resultam de diferentes técnicas de aquisição de dados no modelo e no protótipo (Heller, 2011).

Assim, para que os resultados de um modelo físico sejam fiáveis, é necessário assegurar que as características do protótipo são devidamente reproduzidas, e que os efeitos de escala e de laboratoriais são de pequena magnitude e não influenciam, de forma significativa, a qualidade desses resultados (Santos, 2010), sendo um desafio por si só ter a sensibilidade para perceber se esses efeitos irão afetar quantitativamente e/ou qualitativamente os resultados obtidos a partir do modelo físico.

4.8.2.CRITÉRIOS DE SEMELHANÇA

A construção de um modelo físico tem sempre como pressuposto fundamental que este se irá comportar de forma similar ao protótipo que se pretende reproduzir. Quando todas as relações possíveis entre as variáveis geométricas, cinemáticas e dinâmicas são iguais a uma constante, diz-se que a semelhança é completa. No entanto, satisfazer algumas pode implicar desrespeitar outras, pelo que, em caso de incompatibilidade, se devem selecionar os critérios de semelhança associados às forças dominantes e com mais relevância para o modelo em estudo e ignorar as restantes.

No domínio da engenharia costeira e portuária os critérios de semelhança são impostos pelas relações físicas entre as grandezas intervenientes nos fenómenos em estudo e tomam a forma de quocientes adimensionais. Esses quocientes adimensionais, são estabelecidos no contexto do presente trabalho com base em considerações dinâmicas, ou seja, a partir da 2ª Lei de *Newton* (Rosa-Santos, 2010).

No domínio da mecânica dos fluidos, a segunda lei de *Newton* pode tomar a seguinte forma,

$$m \frac{dU}{dt} = \sum_{k=1}^n F_{k,f} \Rightarrow \widehat{F}_l = \widehat{F}_g + \widehat{F}_\mu + \widehat{F}_\sigma + \widehat{F}_e + \widehat{F}_{pr}$$

em que m representa a massa do elemento (neste caso o fluido), U a velocidade, t a variável tempo, $F_{k,f}$ qualquer uma das n forças externas a atuar nesse elemento, $\widehat{F}_l$ as forças de inércia, $\widehat{F}_g$ as forças devidas à aceleração da gravidade, $\widehat{F}_\mu$ as forças de viscosidade, $\widehat{F}_\sigma$ as forças de tensão superficial, $\widehat{F}_e$ as forças elásticas e $\widehat{F}_{pr}$ as forças de pressão.

“Uma vez que as forças de inércia estão sempre presentes em problemas que envolvem escoamentos, é possível relacionar estas forças com uma das restantes forças a atuar sobre o fluido, de forma a definir quocientes adimensionais, que traduzem a influência relativa dessas duas forças na situação de escoamento em estudo” (Rosa-Santos, 2010). Mediante a natureza das forças em equação, é possível obter diferentes quocientes, que traduzem propriedades importantes do escoamento. **O Erro! A origem d a referência não foi encontrada.** apresenta alguns desses quocientes (também designados de números índices), e a respetiva aplicação.

Quadro 4.3 - Exemplo de aplicação de alguns critérios de semelhança (adaptado de Taveira Pinto, 2011).

Semelhança	Aplicação
<i>Froude (Fr)</i>	Escoamento com superfície livre onde as forças de inércia são importantes face às forças gravíticas
<i>Reynolds (Re)</i>	Escoamento onde há predominância de forças viscosas
<i>Weber (We)</i>	Escoamento onde há predominância de forças de tensão superficial
<i>Cauchy (Ca)</i>	Quando as forças de compressibilidade são relevantes
<i>Euler (Eu)</i>	Forças de pressão
<i>Strouhal (St)</i>	Forças oscilatórias. Escoamentos não permanentes e oscilatórios.

As expressões que dão origem a cada um dos números índice são as seguintes,

$$Fr = \sqrt{\frac{F_i}{F_g}} = \frac{V^2}{gL} \quad (4.2)$$

$$Re = \frac{F_i}{F_\mu} = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (4.3)$$

$$We = \frac{F_i}{F_\sigma} = \frac{\rho V^2 L}{\sigma} \quad (4.4)$$

$$Ca = \frac{F_i}{F_e} = \frac{\rho V^2}{\varepsilon} \quad (4.5)$$

$$Eu = \frac{F_i}{F_{pr}} = \frac{p}{\rho V^2} \quad (4.6)$$

em que V representa a velocidade de escoamento, L uma dimensão característica, g a aceleração da gravidade, ρ a massa volúmica do fluido, μ o coeficiente de viscosidade dinâmica, ν o coeficiente de viscosidade cinemática, σ a tensão superficial, ε o módulo de elasticidade de volume, p a pressão e t um tempo característico.

As forças de inércia podem ainda estar associadas a dois tipos de aceleração: a aceleração temporal e a aceleração convectiva. O número índice que traduz o quociente entre as forças de inércia associadas a essas acelerações é designado de número de *Strouhal*, e é dado por:

$$St = \frac{L}{V \cdot t} \quad (4.7)$$

em que t representa um tempo característico

Assim, impondo que os quocientes referidos sejam iguais no modelo e no protótipo, é possível obter um critério (ou lei) de semelhança. O número índice a utilizar deve ter em atenção as características das forças que se pretendem estudar no modelo físico.

A relação de grandezas entre o protótipo e o modelo é estabelecida por fatores de escala, que são dados pelo quociente entre o valor dessa mesma grandeza no protótipo e no modelo. Cada grandeza física tem associada o seu próprio fator de escala que é calculado a partir de igualdades impostas pelos números índice.

$$\lambda_x = \frac{X_m}{X_p} \quad (4.8)$$

em que λ_x representa o fator de escala de uma grandeza X , X_m o valor dessa grandeza no modelo e X_p o valor da grandeza no protótipo.

A hidrodinâmica de estruturas flutuantes é geralmente governada pelas forças provocadas pela ação da gravidade, pelo que, no dimensionamento do modelo físico do dispositivo em estudo, foi utilizado o critério de semelhança de *Froude*. Assim, o modelo físico deve assegurar que a relação entre as forças de inércia e as forças gravíticas se mantém constante quando o protótipo é transferido para as dimensões de modelo, sendo necessário garantir que o número de *Froude* é igual no protótipo e no modelo e que os vários fatores de escala são estabelecidos de acordo com essa lei de semelhança.

No Quadro 4.4 apresentam-se alguns fatores de escala obtidos a partir do critério de semelhança de *Froude*.

Quadro 4.4 - Fatores de escala obtidos a partir da semelhança de *Froude* (adaptado de Teixeira et al., 2012).

Caraterísticas	Unidades	Fator de escala
Comprimento (geométrico)	m	λ_l
Área	m ²	λ_l^2
Volume	m ³	λ_l^3
Tempo Cinemático	s	$\lambda_l^{1/2}$
Frequência	s ⁻¹	$\lambda_l^{-1/2}$
Deslocamento	m	λ_l
Massa	kg	λ_l^3
Velocidade	m/s	$\lambda_l^{1/2}$
Aceleração	m/s ²	1
Momento Linear	kg.m/s	$\gamma \lambda_l^{3.5}$
Impulso	N.s	$\gamma \lambda_l^{3.5}$
Potência	J/s (W)	$\gamma \lambda_l^{3.5}$
Força	N	$\gamma \lambda_l^3$
Peso	N	$\gamma \lambda_l^3$
Energia	J	$\gamma \lambda_l^4$
Massa Volúmica	Kg/ m ³	γ
Peso Volúmico	N/ m ³	γ
Coeficiente de Atrito	-	1

Os ensaios experimentais em tanque de ondas são, geralmente, realizados utilizando água doce como fluido. No entanto, o protótipo é concebido para operar no mar, ou seja, em água salgada, que apresenta uma massa volúmica distinta da água doce. Torna-se assim necessário efetuar uma correção entre os valores de protótipo e do modelo de forma a obter resultados o mais realista possíveis. Essa correção consiste na multiplicação dos fatores de escala dependentes da massa volúmica da água por um fator corretivo, γ , que resulta do quociente entre a massa volúmica da água doce e da água salgada. Este já representa por si só um fator de escala, e toma, um valor de aproximadamente 0.976.

$$\gamma = \frac{1000 \text{ kg/m}^3}{1025 \text{ kg/m}^3} = 0.976 \quad (4.9)$$

Para uma semelhança mais completa, que permitisse extrapolar resultados de uma forma mais realistas, seria ainda importante considerar os efeitos resultantes das forças viscosas o modelo. Para a correta reprodução das forças viscosas é utilizado o critério de semelhança de *Reynolds* que não é compatível,

de um ponto de vista prático, compatibilizar com o critério de *Froude*, levando a uma reprodução incorreta dos fenómenos relacionados com a viscosidade. A forma habitual de resolver esta incompatibilidade de escalas no ensaio, consiste em assegurar que o escoamento é turbulento (no protótipo e no modelo), pois assim, as forças produzidas pela agitação no protótipo poderão ser reproduzidas apenas com base no número de *Froude* (Taveira Pinto, 2011).

4.9. MODELO FÍSICO DO CECO

4.9.1. INTRODUÇÃO

O principal objetivo da presente dissertação, conforme referido anteriormente, é dar mais um passo no desenvolvimento do dispositivo conversor de energia das ondas CECO.

O estudo do funcionamento do dispositivo CECO iniciou-se com a construção de um modelo físico ainda rudimentar por parte de Teixeira (2012) que mostrou que o conceito de funcionamento associado ao dispositivo era viável pois apresentou resultados promissores. Pretendendo dar continuidade ao trabalho, Marinheiro (2013) desenvolve um estudo de otimização do dispositivo, construindo um segundo modelo físico com alterações efetuadas, essencialmente, a nível da geometria dos módulos laterais móveis, do comprimento dos tirantes e de alguns dos mecanismos e componentes internos do dispositivo.

Os resultados experimentais obtidos com os modelos físicos contruídos tanto por Teixeira (2012) como por Marinheiro (2013) permitiram validar modelos numéricos que são ferramentas cruciais no desenvolvimento de qualquer WEC. É no trabalho desenvolvido nesses estudos numéricos que se fundamenta a presente dissertação. As melhorias implementadas no novo modelo físico desenvolvido resultam de conclusões retiradas não só a partir dos estudos numéricos previamente realizados, mas também da experiência adquirida pela construção e testes dos modelos físicos antecessores.

Neste trabalho, pretende-se dar mais um passo no desenvolvimento do dispositivo CECO. Assim, foi construído um terceiro modelo físico à escala geométrica 1/25. As modificações introduzidas no novo modelo tiveram sempre em conta o princípio de funcionamento base registado na patente do CECO. Assim, algumas restrições de design foram desde logo impostas, nomeadamente, manter os dois flutuadores laterais interligados por um elemento anelar estrutural, assentes sobre um corpo central fixo.

O novo modelo físico construído compreendeu essencialmente alterações a nível da geometria dos módulos laterais móveis, no comprimento e guiamento dos tirantes, no sistema de reprodução do PTO e em alguns dos mecanismos e componentes internos do CECO. O dispositivo foi posteriormente testado no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da SHRHA da FEUP.

4.9.2. ESCALA GEOMÉTRICA

Na definição da escala de um modelo físico, devem ser atendidos vários fatores, tais como: os efeitos de escala, o tamanho da instalação experimental, os limites do sistema de geração de ondas e ainda as características dos equipamentos de medição, tendo sempre em consideração os fatores económicos e operacionais. Foi ainda necessário ter em consideração as condições de teste planeadas para este estudo, nomeadamente no que diz respeito aos parâmetros, altura de onda, H , período de onda, T , e grau de inclinação do dispositivo, i .

Nos modelos físicos construídos anteriormente, tanto Teixeira (2012), como Marinheiro (2013) adotaram uma escala geométrica de 1/20 para os seus dispositivos. No entanto, a geometria definida

para o presente trabalho impossibilitou a adoção dessa mesma escala. Isto devem-se ao comprimento definido para os tirantes, pois estes, devido ao movimento de translação resultante da excitação das ondas, acabariam por colidir com o fundo do tanque de ondas para inclinações do dispositivo iguais ou superiores a 45°. Assim optou-se por adotar uma escala de 1/25 de forma a compatibilizar o modelo com as profundidades de águas permitidas no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP.

No estudo do desempenho de um qualquer dispositivo conversor de energia das ondas, é fundamental a avaliação da energia produzida e dos rendimentos para diferentes condições de teste. Torna-se assim necessária a medição da potência instantânea produzida pelo modelo físico.

Conforme referido anteriormente, o fator de escala da grandeza potência, para o critério de semelhança de *Froude*, é dado por $\gamma \lambda_l^{3.5}$. Assim, facilmente se percebe que quanto menor for a escala geométrica, menor será a energia produzida no modelo. É importante que a potência não tome valores demasiado pequenos, uma vez que tal dificultaria a obtenção de medições rigorosas, aumentando assim os erros de medição.

4.9.3.DIMENSÕES DO MODELO

A patente do dispositivo CECO não define concretamente as dimensões que o dispositivo deverá tomar, indicando apenas valores de referência: 2,5 m de altura e 4,5 de largura para os módulos laterais móveis (valores de protótipo).

No primeiro modelo físico construído (Teixeira, 2012), foram adotadas as dimensões representadas nas Figura 3.9 a Figura 3.11. Este primeiro modelo caracterizava-se por apresentar módulos laterais móveis mais largos de forma a absorver a energia da onda na zona de superfície livre.

Marinheiro (2013) construiu um modelo melhorado, onde modifica a geometria dos MLMs de forma a que estes permitam uma absorção de energia da onda em profundidade, na coluna de água. Assim, os módulos aumentam a altura para 8 m e diminuem a largura para 4,5 m (valores de protótipo). A geometria do dispositivo desenvolvido por Marinheiro (2013) encontra-se representada na Figura 3.13, Figura 3.15 e Figura 3.17.

Num dispositivo conversor de energia das ondas, é importante que o período de ressonância do sistema seja coincidente com o período de ondas mais frequente, e mais energéticas no local de implementação do mesmo. A frequência ressonante de um dispositivo é dependente das características físicas do mesmo, nomeadamente a massa e a geometria. Assim, é possível fazer coincidir ou pelo menos aproximar a frequência ressonante do dispositivo com a frequência das ondas alterando a geometria dos módulos laterais móveis. Por exemplo, o dispositivo CECO anterior (Marinheiro, 2013) apresentava o seu desempenho máximo (larguras de captura relativos até 34%) para estados de agitação com períodos de onda em volta de 8 s que correspondiam ao período de vibração natural do sistema.

De forma a garantir que o CECO irá funcionar em ressonância numa maior gama de condições de agitação, é desde logo importante fazer uma correta caracterização dos estados de agitação marítima no local de implementação. Assim, para o presente trabalho será estudado uma possível implementação na costa norte portuguesa.

Segundo Ramos et.al., (2018), mostraram que a maior parte da energia das ondas na costa Atlântica da Península Ibérica se encontra associada a alturas de onda significativas (H_s) compreendidas entre 1,5 a 5 m, e a períodos de onda (T_p) na ordem dos 9 a 16 s.

Para a costa norte portuguesa a média de ocorrência anual de alturas de ondas significativas de 1 a 2 m com períodos compreendidos entre 9 a 11 s é de aproximadamente 19% (1703 horas por ano), Figura

3.21. Com base nestes pressupostos foram realizadas simulações numéricas para otimização da geometria do CECO.

A nova geometria dos módulos resulta de um estudo realizado pelo Professor Cláudio A. Rodríguez. Por meio da modelação numérica usando modelos baseados no método dos elementos fronteira foi estudado o desempenho de dispositivos CECO para diferentes geometrias para os módulos laterais móveis. Nessa análise foi ainda tido em conta o nível de amortecimento do PTO, tendo-se realizado uma análise para um nível de amortecimento de referência (média entre o amortecimento do PTO ótimo na frequência natural e o amortecimento ótimo no período de pico do espectro de agitação marítima).

No estudo realizado foi ainda proposto um índice que representa o limite teórico de desempenho do dispositivo. Esse índice foi concebido para que seja possível fazer uma análise onde o desempenho do dispositivo estaria dependente, unicamente, dos aspetos geométricos e hidrodinâmicos dos módulos laterais móveis do CECO. Por este motivo, o índice assume que o amortecimento do PTO era o amortecimento ótimo para qualquer frequência de onda.

Determinar o período natural de movimento do CECO não é uma tarefa simples e linear. Este depende de fatores como a massa e a geometria do dispositivo, e ainda da inclinação do movimento de translação dos módulos laterais móveis. De forma a simplificar o processo de ajuste da frequência natural do sistema, foram tidos em conta algumas considerações que permitem aproximar o período da onda do período natural do sistema. Por exemplo, para aumentar o período natural de arfagem (*heave*) de um corpo oscilatório deve-se aumentar o volume submerso e/ou a área do plano de água.

Assim, devem ser incluídas formas com estas características no processo de otimização. A Figura 4.10 apresenta algumas das geometrias modeladas e testadas por Rodriguez et al. 2018.

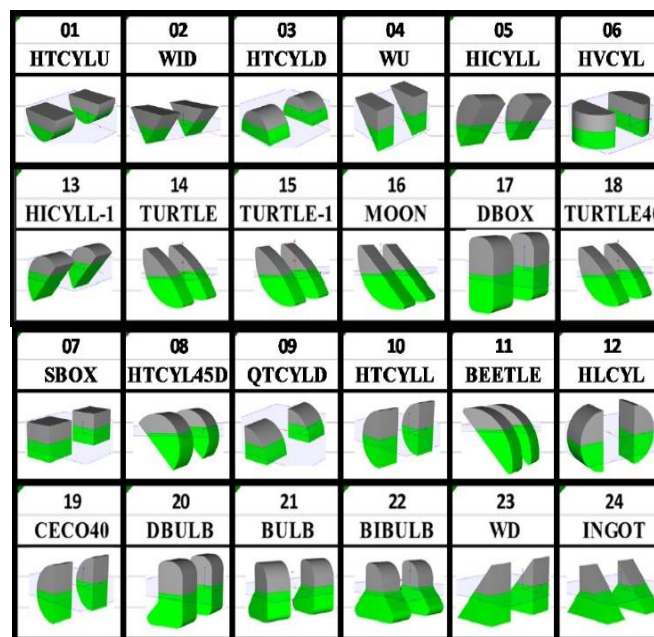


Figura 4.10 - Síntese das diferentes geometrias para os flutuadores laterais modeladas (Rodríguez et al.,2018).

A geometria adotada neste trabalho resultou da ponderação de diversos fatores. Para cada uma das geometrias apresentadas na Figura 4.10, foi calculado o período natural de oscilação, a eficiência hidrodinâmica (relação entre a energia de onda incidente e a energia absorvida pelo dispositivo) e a amplitude significativa de resposta do sistema (que representa a média do terço superior da amplitude pico-a-pico dos movimentos de translação do CECO).

No estudo desenvolvido por Rodriguez et.al.2018 a geometria adotada no modelo físico de Marinheiro (2013), designada por CECO40 na Figura 4.10, apresentou um bom desempenho em comparação com as restantes formas, apresentando uma eficiência hidrodinâmica de cerca de 30%. Como seria de esperar, as geometrias com o melhor desempenho para os estados de agitação marítima simulados foram aquelas em que o período natural rondava o período das ondas ($T_p=10$ s). Em algumas das geometrias analisadas, foram alcançadas eficiências hidrodinâmicas de aproximadamente 50%, no entanto estas geometrias revelaram-se desapropriadas uma vez que a estas estariam associadas grandes amplitudes de movimento por parte do sistema (módulos laterais móveis do CECO). Para estas amplitudes ocorrerem, para além dos inconvenientes práticos (exigiria um comprimento de tirantes exageradamente grande), também seria necessário um estado de agitação marítima com alturas de onda na ordem dos 12 m, o que não se verifica para a costa Portuguesa.

Assim, para o modelo físico a construir, optou-se pela geometria “TURTLE40”. Esta escolha revelou-se a mais equilibrada, apresentando uma eficiência hidráulica de 30.5%, uma largura de captura de 26% e uma amplitude significativa de reposta do sistema de aproximadamente 4 m. O Quadro 4.5 sintetiza alguns dos parâmetros modelados para as geometrias referidas.

Quadro 4.5 - Comparação entre CECO40 e TURTLE40 (Rodríguez et al.,2018).

Parâmetros	CECO 40	TURTLE40
Período Natural [s]	7.89	7.68
Potência média máxima [kW]	30	31
Largura de Captura relativa [%]	24.0%	25.9%
Eficiência Hidrodinâmica [%]	29.3%	30.5%
Amplitude significativa de resposta do sistema [m]	5.43	4.3

Da Figura 4.11 à Figura 4.16 apresenta-se os esquemas representativos, com legenda e medidas (em mm), do modelo físico a construir:

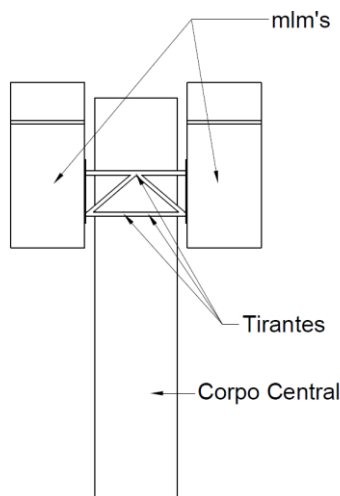


Figura 4.11 - Vista Frontal do CECO.

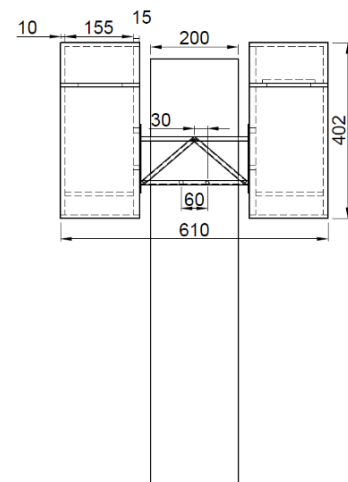


Figura 4.12 - Vista Frontal do CECO (medidas em milímetros).

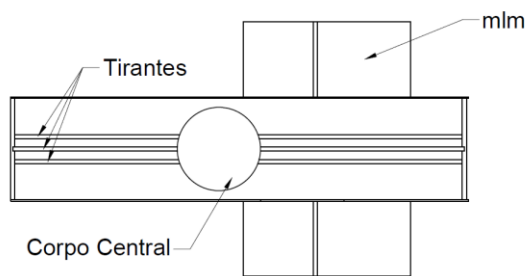


Figura 4.13 - Vista superior do CECO.

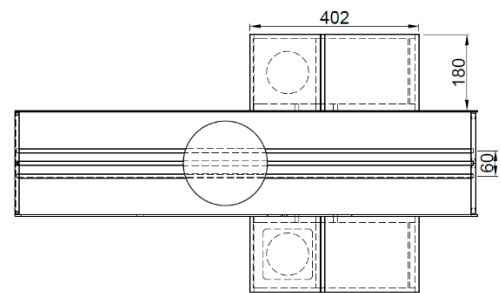


Figura 4.14 - Vista superior do CECO (medidas em milímetros).

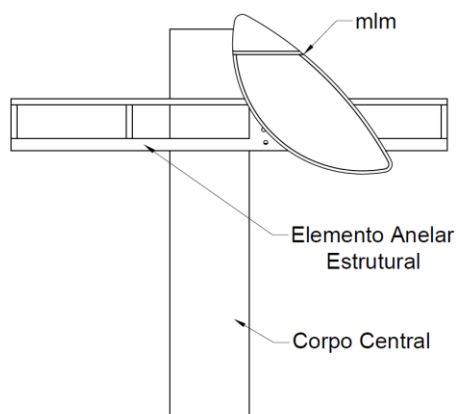


Figura 4.15 - Vista lateral do CECO.

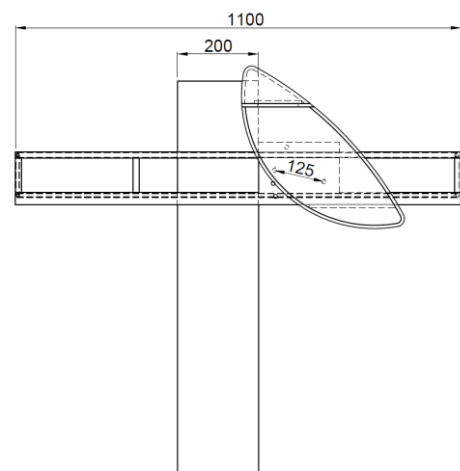


Figura 4.16 - Vista lateral do CECO (medidas em milímetros).

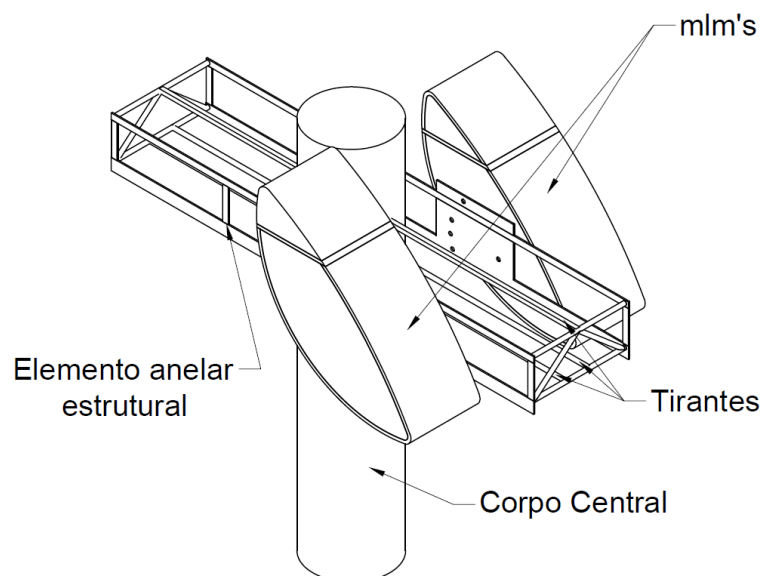


Figura 4.17 - Perspetiva do modelo físico construído.

4.9.4.CONSTRUÇÃO DO MODELO FÍSICO

4.9.4.1.Introdução

A construção do modelo físico em questão teve desde logo algumas restrições que condicionaram o dispositivo. No estudo numérico realizado, a geometria foi testada para um grau de submersão de 50%, ao qual correspondia uma massa máxima da parte móvel do dispositivo de 298.27 t. Esta atribuição de uma massa de 298.27 t para o protótipo, determina, pelo fator de escala obtido com base na semelhança de *Froude*, uma massa máxima de 18,62 kg para o modelo físico. Esta condicionante teve influência em todas as componentes constituintes do modelo físico, particularmente na escolha dos materiais a utilizar e ainda numa solução que permitisse ajustar o grau de submersão dos flutuadores laterais (que está associado ao peso dos mesmos).

4.9.4.2.Módulos Laterais Móveis

Conforme referido anteriormente, a geometria definida para os módulos laterais móveis resulta de um estudo numérico realizado com vista a aumentar a eficiência do dispositivo CECO as dimensões e geometria a construir encontram-se representadas na Figura 4.18.

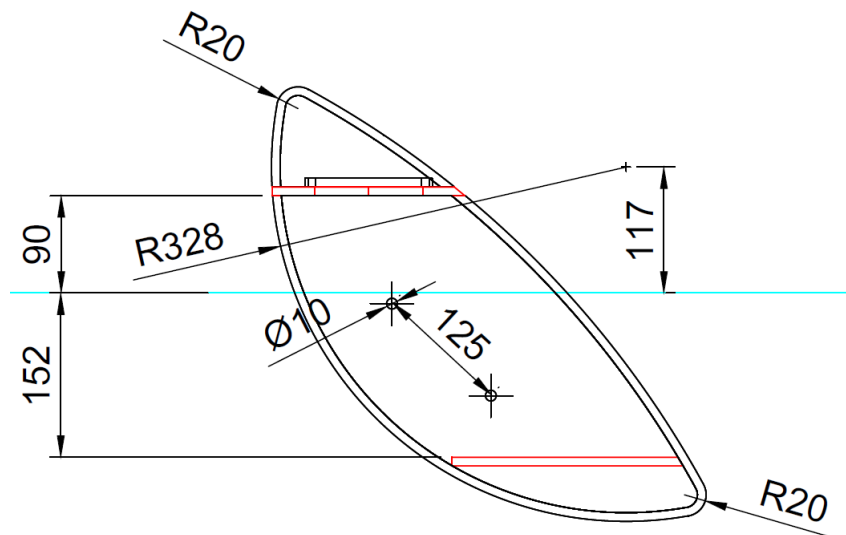


Figura 4.18 - Secção transversal dos módulos laterais móveis.

Sendo o principal objetivo desta dissertação dar mais um passo no desenvolvimento do CECO, foi necessário apostar na construção de um modelo físico de qualidade. Ao contrário dos modelos físicos anteriores, a geometria adotada era de difícil recriação na oficina do Laboratório de Hidráulica da FEUP. A forma de contornar esta questão, garantindo uma boa qualidade das peças, consistiu na construção dos módulos em acrílico numa empresa especializada.

O acrílico (também designado de polimetil-metacrilato ou PMMA) é um material termoplástico rígido, transparente e incolor. Como qualquer termoplástico, quando o material atinge uma dada temperatura, este torna-se viscoso, permitindo a moldagem do mesmo, sem que se percam as suas propriedades mecânicas. Assim, recorreu-se a uma empresa externa, a Acriluz, que se dedica à comercialização e transformação de acrílicos.

O processo de construção dos módulos começou com a construção de uns moldes em madeira com a geometria pretendida, nos quais foram posteriormente moldadas as placas de acrílico. Para a construção dos moldes de madeira, foi desenhada a secção transversal apresentada na Figura 4.18 em duas tábuas de madeira. Consecutivamente procedeu-se ao corte dessas mesmas tábuas que foram posteriormente solidarizadas com uma placa de madeira ao longo do seu contorno. O molde final é apresentado na Figura 4.19.



Figura 4.19 - Molde de Madeira usado para a moldagem dos módulos laterais móveis.

De seguida, foram colocadas placas de acrílico com a espessura pretendida (8 mm) num forno aquecido a uma temperatura de 170° até que as mesmas ficassem maleáveis. Posteriormente, as placas ainda quentes são colocadas em torno do molde de madeira e sucessivamente pressionadas contra o mesmo por meio de um pano de tecido que é apertado em todo o seu contorno. As placas ficam nesta posição até que a sua temperatura baixe e voltem a tornar-se rígidas.

Para cada um dos moldes finais foram moldadas 2 peças, uma que constituiria a parte inferior do módulo lateral móvel, e outra que seria a tampa superior. Isto acontece devido à dificuldade de comprimir toda a peça ao mesmo tempo. Outro fator importante tido em conta na moldagem desta peça, foi a curva superior e inferior do flutuador, que apresentava um raio bastante pequeno (20 mm). Teve que se ter especial atenção a este pormenor uma vez que o acrílico tenderia a fissurar devido às tensões exercidas neste local durante a moldagem. A Figura 4.20 apresenta as quatro peças moldadas para a fabricação dos flutuadores antes, de serem cortadas para as respetivas dimensões.

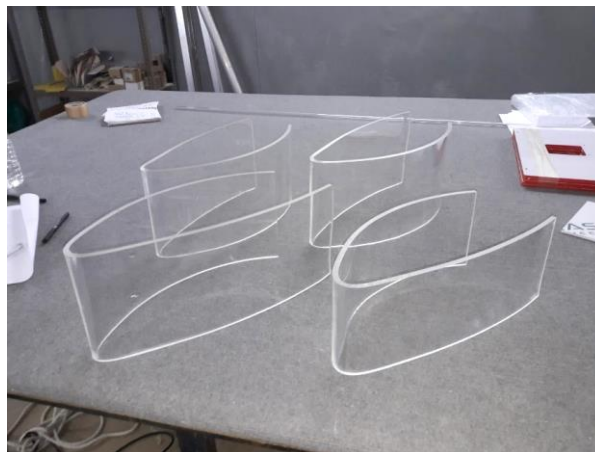


Figura 4.20 - Peças de acrílico antes de serem cortadas.

Após o corte das peças anteriormente referidas, procedeu-se à construção da parte lateral de cada um dos flutuadores. A parte interior (que estará em contacto com o elemento anelar estrutural) terá uma espessura de 15 mm, enquanto que a exterior apenas terá 10 mm (Figura 4.12). Foi assim desenhada a secção transversal do MLM numa placa de 15 mm e noutra de 10 mm (um para cada um dos MLMs), com o intuito de auxiliar no corte do acrílico para as dimensões pretendidas. Como a empresa não dispunha de equipamento de corte laser, foi impresso um desenho à escala 1:1 da secção transversal do flutuador de forma a auxiliar o corte e devido posicionamento de todas as componentes do módulo lateral móvel. A Figura 4.21 apresenta a sobreposição de uma das peças com o desenho.

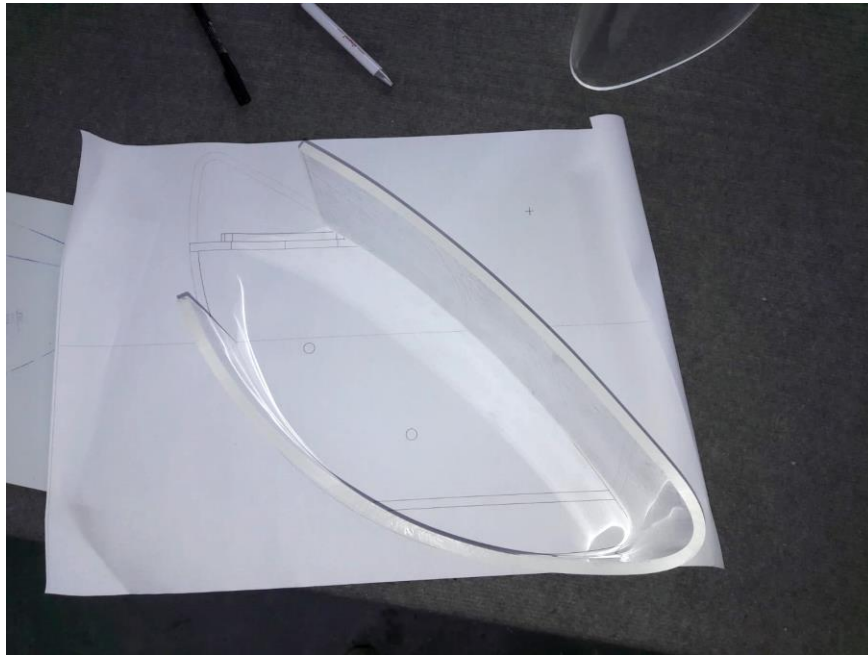


Figura 4.21 - Desenho Auxiliar para construção dos MLMs.

Cortadas as peças laterais dos MLMs, procedeu-se a colagem de todas as componentes. Sendo crucial a estanquidade total dos flutuadores, foi utilizada uma cola especial para a junção das paredes laterais com a parte frontal.

Na parede lateral interna do flutuador foram previamente feitos dois orifícios com um encaixe especial destinados à colocação de dois parafusos de 6 mm de diâmetro. Após a colocação dos parafusos nos devidos encaixes, procedeu-se à vedação dos orifícios com a “cola veda”. Estes parafusos têm como função a fixação dos MLMs ao elemento anelar estrutural do CECO.

No projeto do CECO foi ainda idealizada a possibilidade de ajuste da massa dos flutuadores. Para tal, pensou-se na colocação de uma plataforma inferior no interior do MLM, que seria acessível a partir de uma tampa na parte superior do MLM. Assim, houve a necessidade criar acesso a esta tampa, tendo-se construído o flutuador com uma parte superior amovível. Esta parte amovível pode ser desmontada através de quatro parafusos de rosca colocados nas partes laterais que apertam em duas cunhas solidarizadas com a parte inferior do flutuador. A Figura 4.22 apresenta as diferentes partes constituintes do módulo lateral móvel.

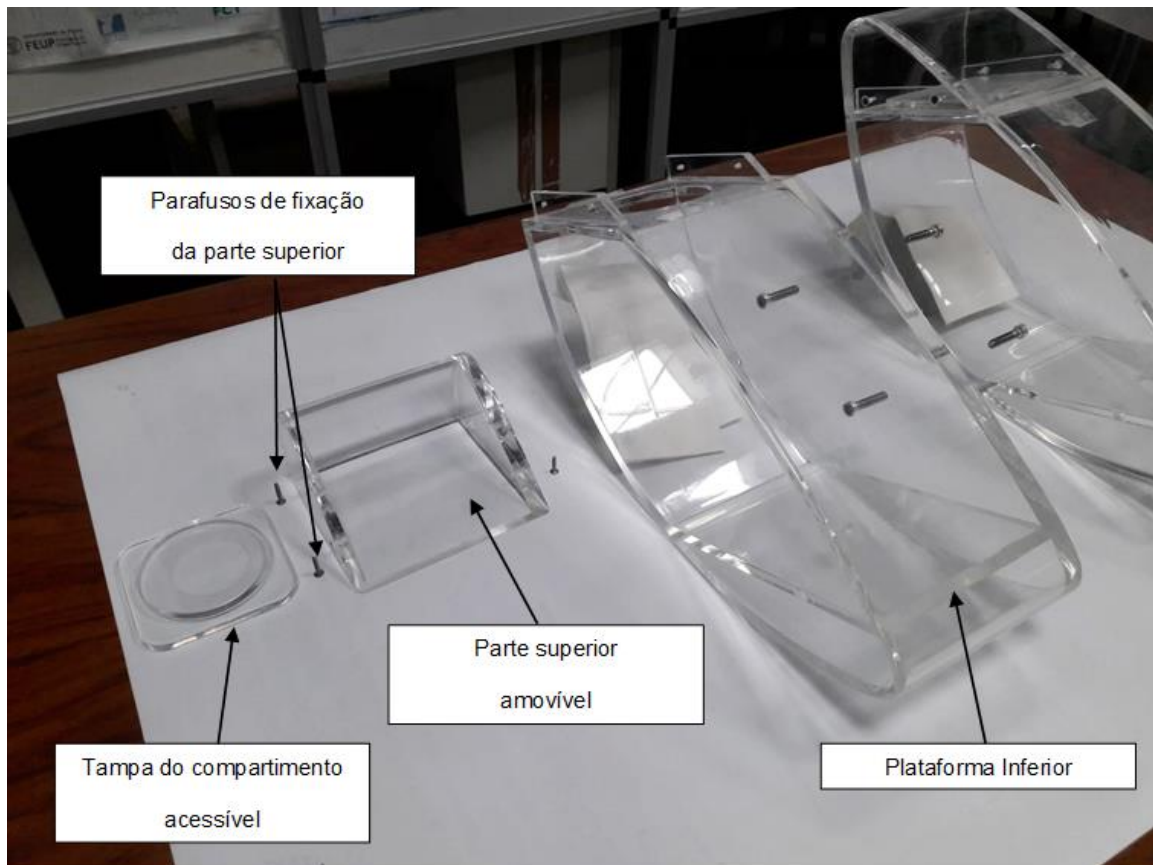


Figura 4.22 - Diferentes partes do módulo lateral móvel.

O orifício de acesso ao compartimento interno do flutuador, tem uma forma circular e apresenta 10 cm de diâmetro

Tanto a colocação da plataforma inferior do compartimento e a respetiva parte superior e tampa como a posição exata dos parafusos de fixação, foi realizada com o auxílio do desenho à escala 1:1 referido anteriormente.

No centro da plataforma inferior foi deixado um pequeno orifício circular. Este orifício permite, em caso de necessidade, o acesso à parte inferior do flutuador, caso seja necessário, por exemplo, um acréscimo de massa no mesmo. Foi ainda útil devido às particularidades da cola utilizada que necessita de exposição ao ar para secar devidamente, permitindo um melhor isolamento e estanquidade dos compartimentos internos do flutuador.

Uma das vantagens da utilização de PMMA é a transparência do material, sendo por isso fácil detetar qualquer infiltração de água no interior dos flutuadores. O resultado final dos módulos laterais móveis encontra-se representado na Figura 4.23



Figura 4.23 - Módulos laterais móveis no final do processo de construção.

4.9.4.3. Elemento anelar estrutural e tirantes

O elemento anelar estrutural solidariza os três tirantes e os módulos laterais móveis. Este é constituído por duas barras de aço inoxidável chatas nas laterais ligadas entre si por tubos de aço inox com 10 mm de diâmetro. De forma a conferir maior rigidez à estrutura, foi ainda colocado um elemento transversal com 20 mm de largura a meio do vão das barras laterais. As dimensões da peça são apresentadas em detalhe na Figura 4.24 e Figura 4.25

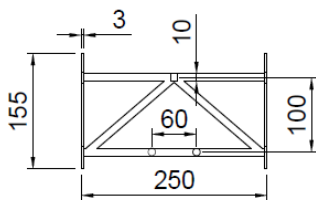


Figura 4.24 - Vista frontal do elemento anelar estrutural e tirantes (medidas em milímetros).

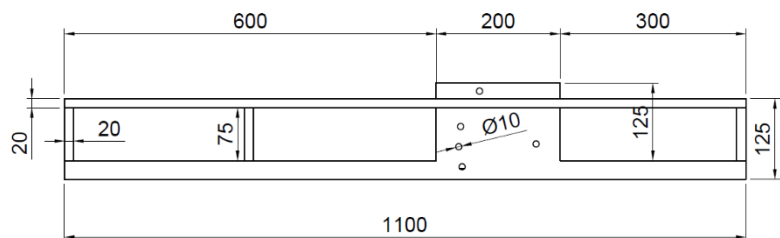


Figura 4.25 - Vista lateral do elemento anelar estrutural e tirante (medidas em milímetros).

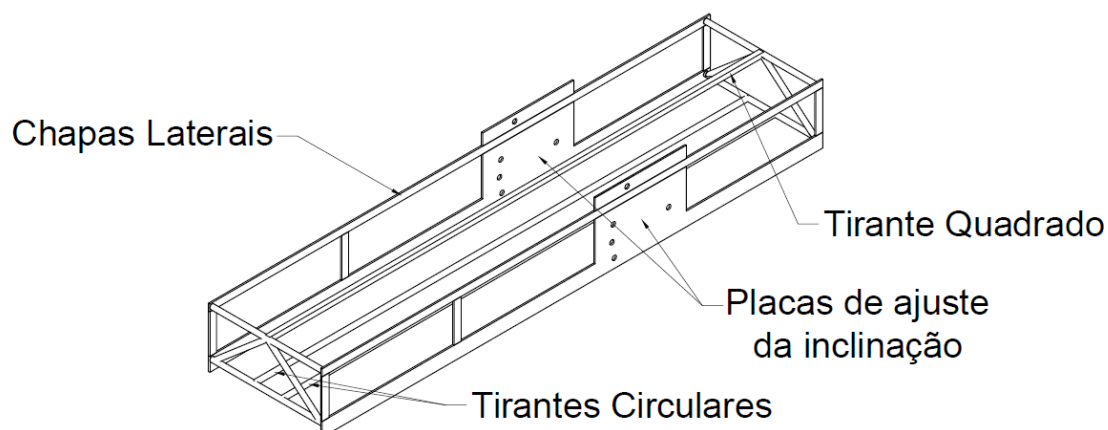


Figura 4.26 - Perspetiva do elemento anelar estrutural e tirantes.

Um aspeto importante associado ao funcionamento do dispositivo CECO é a necessidade de adaptação dos módulos laterais móveis para que a sua superfície frontal (que oferece resistência à onda) tenha sempre a mesma posição relativamente à superfície livre da água. Para tal foram aplicadas duas placas de aço (uma em cada lado) que fazem a solidarização dos MLMs com a estrutura anelar. Estas placas têm um conjunto de furos estrategicamente posicionados que permitem a rotação dos MLMs em torno de um outro furo. Os ângulos de inclinação do dispositivo adotados para estes furos foram 0° , 30° , 45° e 60° (que coincidem com os ângulos existentes da base que dá suporte ao conjunto, permitindo a compensação da rotação desta).

A Figura 4.27 mostra as placas referidas antes da solidarização das mesmas com a restante placa lateral.



Figura 4.27 - Placas de ajuste da inclinação do MLMs.

A construção da estrutura metálica de suporte iniciou-se pelo corte e furação das placas de inox representadas na Figura 4.27. As placas têm 125 mm de altura, 200 mm de largura e 4 mm de espessura. De forma a fazer a furação dos orifícios de ajuste de inclinação na correta posição, foi novamente impressa uma secção lateral do elemento anelar estrutural à escala 1:1. Sobre pôs-se o desenho na placa e marcou-se o centro de cada um dos orifícios a efetuar. De seguida foi utilizado o berbequim apresentado na Figura 4.28 com uma broca de 10 mm de diâmetro e perfurou-se cada uma das marcas realizadas.

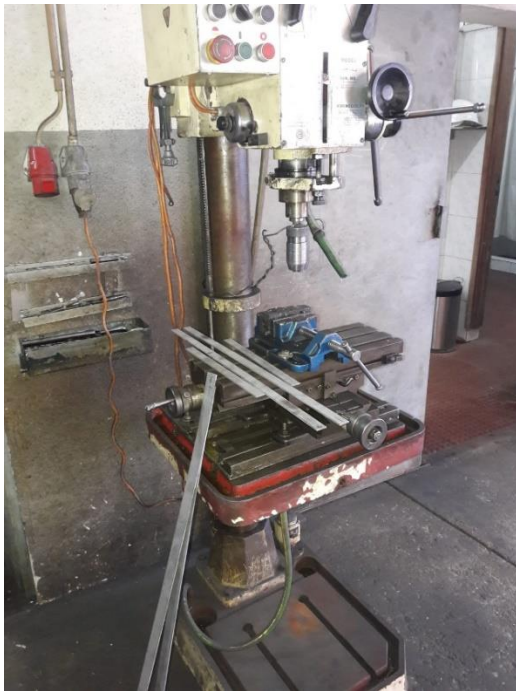


Figura 4.28 – Equipamento de furação (à esquerda) e equipamento de corte (à direita).

Concluídas as placas de fixação e ajuste da inclinação dos MLMs, procedeu-se ao corte das restantes barras que constituíram a seção lateral da estrutura. Para a construção da estrutura foram adquiridas duas barras de aço inox, uma com 20 mm de altura e outra com 30 mm (ambas com 3 mm de espessura). As barras vêm do fabricante com 7 metros de comprimento pelo que houve a necessidade de se cortar as mesmas para as dimensões pretendidas. Para tal foi utilizado o equipamento de corte representado na Figura 4.28 que utiliza uma serra elétrica destinada ao corte de aço. A barra inferior (que ficaria por baixo das placas de fixação e que tem de altura 30 mm) foi cortada logo na totalidade do seu comprimento (1.1 m). No entanto, para a barra superior (barra com 20 mm de altura), houve a necessidade de se cortar duas barras de forma a encaixar a placa de fixação. Assim foi cortada uma barra com 600 mm e outra com 300 mm. Foram ainda cortadas três barras com 20 mm de altura e 75 mm de comprimento de forma a solidarizar a barra superior com a barra inferior. As barras cortadas e as placas de fixação encontram-se representadas na Figura 4.29.

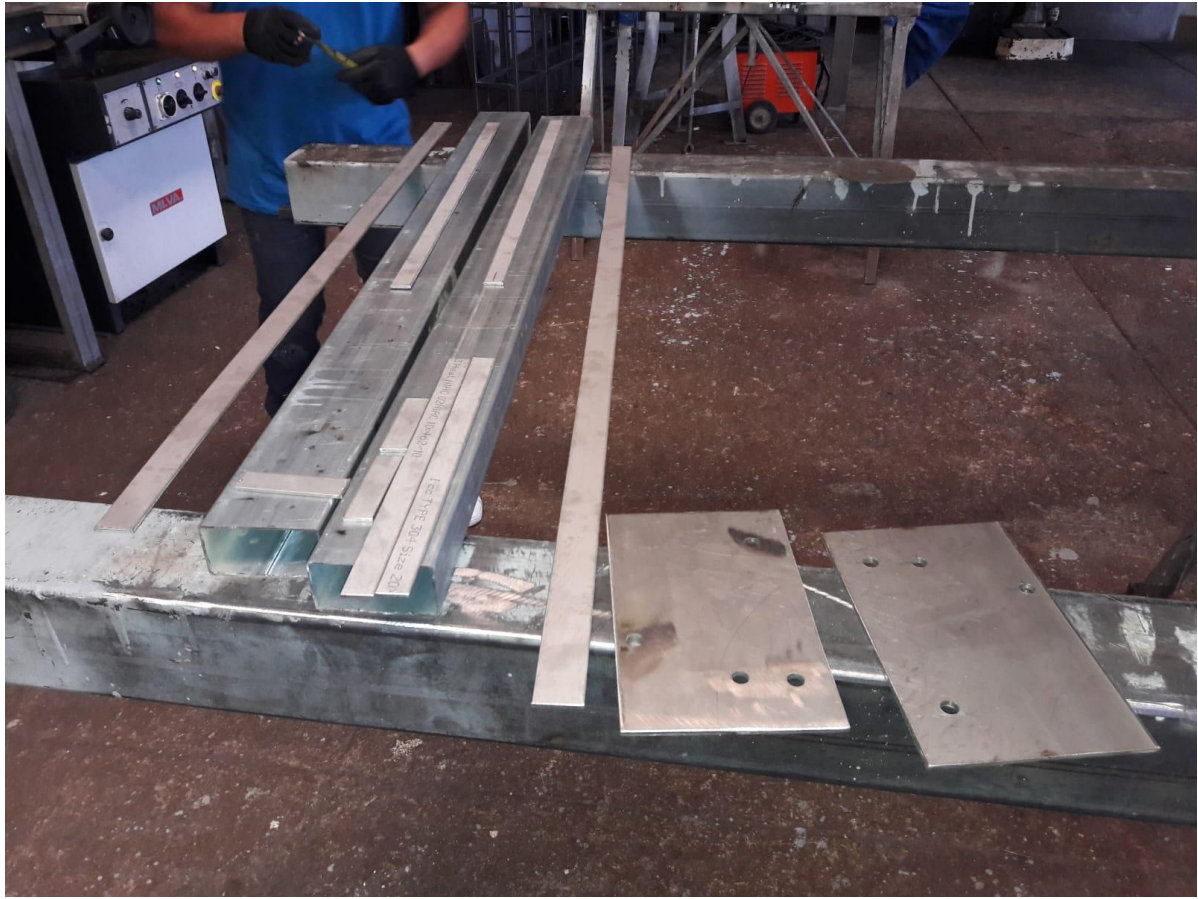


Figura 4.29 - Barras constituintes da estrutura.

Concluídas ambas as seções laterais da estrutura, procedeu-se ao corte dos tubos de aço inox que unirão estas duas pontes. Novamente, o fabricante destes tubos vende o tubo com um comprimento de 7 m. Utilizando o equipamento de corte referido anteriormente, cortaram-se quatro tubos com 244 mm de comprimento.

Outro dos requisitos considerados inicialmente na fase de conceção do modelo, era a possibilidade de desmonte das várias componentes da estrutura de forma a facilitar o encaixe no corpo central fixo. Uma das soluções encontradas para esse efeito consistiu em colocar uma porca roscada no interior de cada um dos tubos que unem as secções laterais e sucessivamente fazer um pequeno furo na seção lateral de forma a que a junção dos mesmo fosse feita por parafusos.

Assim, para cada um dos quatro tubos de 244 mm, foram limadas a parte interna de ambas as extremidades de forma a facilitar a entrada da porca roscada. De seguida foi introduzida a porca e forçou-se o seu encaixe com um martelo. De forma a assegurar a estabilidade da mesma, foram aplicados pequenos pingos de solda de forma a garantir que esta não sofre qualquer tipo de movimento. Foram ainda cortados os tubos transversais que conferem estabilidade às extremidades do elemento anelar estrutural. Estes foram cortados na sua própria extremidade com um ângulo de 45° de forma a facilitar o encaixe e respetiva soldadura entre os outros tubos superiores e inferiores. A peça completa apresenta-se na Figura 4.34. Com todas as barras e tubos constituintes do sistema cortados com as dimensões pretendidas, procedeu-se à soldadura das diversas peças. Para isso foi utilizado um equipamento próprio para soldagem de aço inox. O processo de soldagem iniciou-se pela soldagem entre a placa de fixação

e barra diretamente inferior a esta (barra com 30 mm de altura e 1,1 m de comprimento). De seguida soldaram-se as barras “superiores” da secção lateral (barras com 20 mm de altura, uma com 600 mm de comprimento e outra com 300 mm) à placa de fixação dos MLMs, e sucessivamente a soldagem das pequenas barras transversais (com 75mm de altura e 20 mm de largura) entre a barra superior e inferior de forma a conferir estabilidade à secção lateral.



Figura 4.30 - Soldagem da estrutura.

Completas ambas as secções laterais da estrutura, sobrepôs-se uma à outra e fizeram-se os furos em cada uma das extremidades, utilizando o equipamento da Figura 4.28, por onde encaixará o parafuso de solidarização com as secções tubulares transversais. Como a solidarização seria feita por parafusos de aço inox com 4 mm de diâmetro, fizeram-se os furos com 5 mm de diâmetro. De seguida, mudou-se a broca do equipamento para uma com 9 mm de forma a afunilar o buraco para permitir um melhor encaixe da cabeça do parafuso, conforme representado na Figura 4.31.

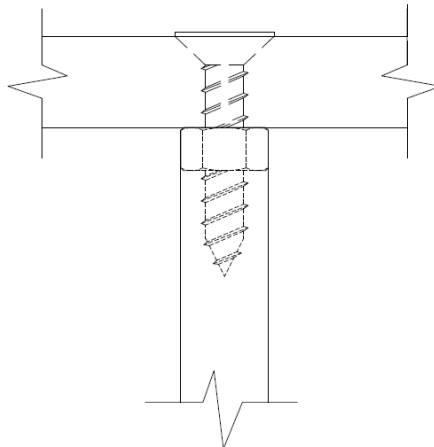


Figura 4.31 - Esquema de encaixe dos parafusos.

Este tipo de pormenores é importante no que trata ao estudo de um dispositivo conversor de energia das ondas, uma vez que se pretende minimizar todo e qualquer tipo de perdas de energia por atrito criadas por saliências existentes no corpo físico. Com efeito, é essencial também que o modelo físico seja o mais hidrodinâmico possível.



Figura 4.32 - Pormenor de encaixe dos parafusos de fixação das barras laterais.

Com o elemento anelar estrutural concluído, procedeu-se à construção dos tirantes. Os tirantes são constituídos por dois tubos de aço inox circulares com 10 mm de diâmetro e um tubo, também de aço inox, de secção quadrada, com 10 mm de aresta. Os dois tubos circulares constituem os tirantes inferiores, enquanto o tubo quadrado o tirante superior (onde irá encaixar a cremalheira).

A construção dos tirantes consistiu basicamente no corte dos tubos com as dimensões pretendidas, neste caso 1,1 m. Foi, no entanto, necessário colocar uma porca roscada nas extremidades de cada um deles, de forma a permitir a fixação destes no elemento anelar estrutural. O procedimento para a colocação desta última componente foi o mesmo aplicado para os tubos transversais do elemento anelar estrutural, que já foi descrito anteriormente. Para fixar os tirantes no elemento anelar estrutural foram realizados três furos na posição descrita na Figura 4.24 de forma a permitir a passagem do parafuso de fixação.

No tirante superior (tubo quadrado), responsável pela transformação do movimento oblíquo em rotativo do motor, foi necessário colocar uma correia sincronizadora com um passo compatível com o da polia utilizada no motor. A fixação desta correia foi feita com *Araldite*® e reforçada com duas abraçadeiras metálicas nas extremidades da mesma.



Figura 4.33 - Correia sincronizadora instalada no superior tirante quadrado.

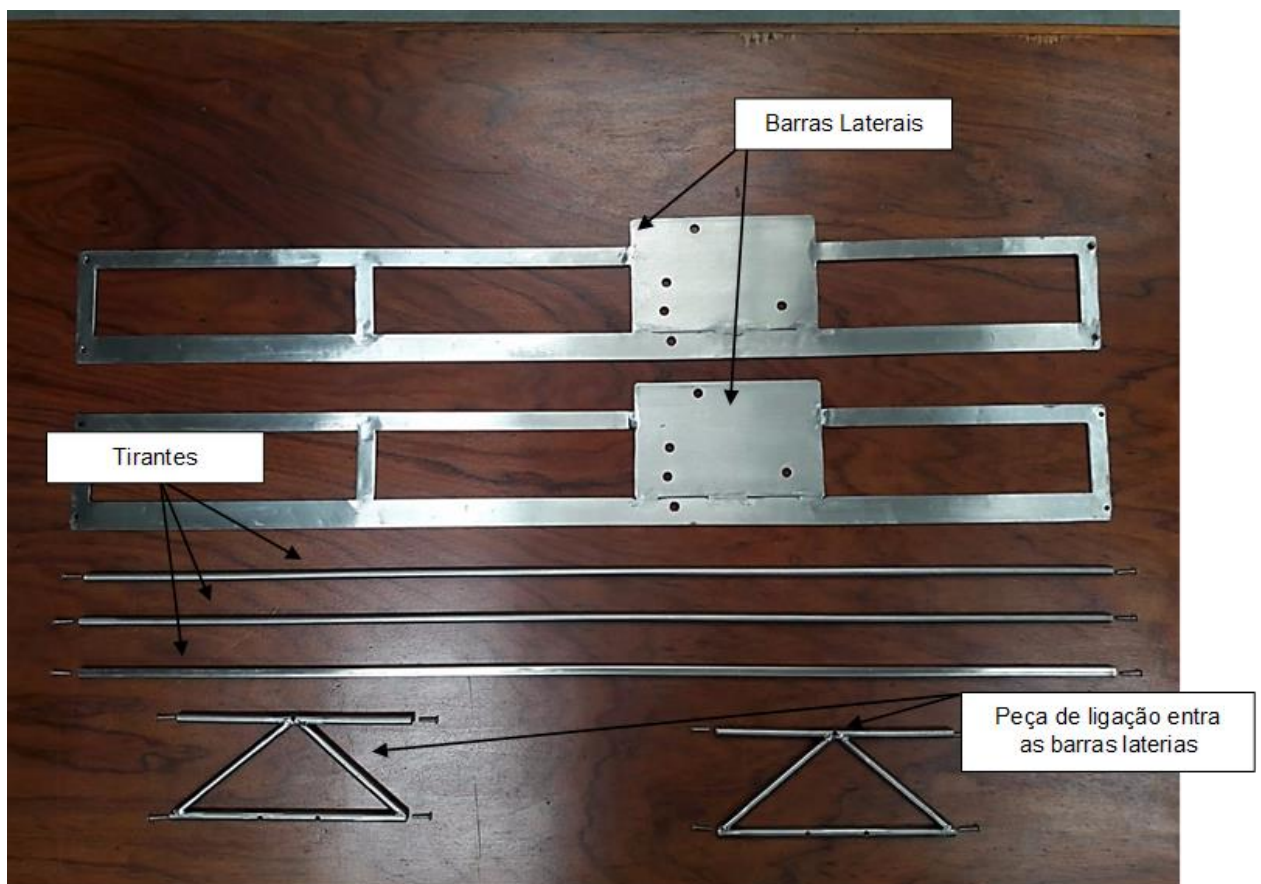


Figura 4.34 - Partes constituintes do elemento anelar estrutural.

4.9.4.4. Base de fixação

Para um bom desempenho do dispositivo CECO, é importante que o único movimento possível seja o da produção de energia, ou seja, o movimento de translação da parte móvel do dispositivo. Assim sendo, para que tal seja possível, é crucial que o corpo central se encontre bem fixo e que não sofra movimentos.

A base de fixação do dispositivo consistiu em 5 cilindros de betão, com 300 mm de diâmetro e 300 mm de altura, solidarizados entre si por 2 peças metálicas, de forma a garantir uma solução pesada e imóvel perante a ação da agitação marítima e dos esforços transmitidos pela parte móvel do dispositivo CECO.

Como melhoramento em relação aos modelos físicos anteriores, no presente trabalho foi projetado e instalado um mecanismo que permite o ajuste da altura do corpo central fixo e da parte flutuante móvel do dispositivo CECO. Visto que se pretende garantir um grau de submersão dos flutuadores de 50% para as diferentes inclinações do dispositivo, existe a necessidade de um mecanismo que permita ajustar com rigor a posição dessas componentes. Por exemplo, é necessário subir o dispositivo CECO quando se aumenta a sua inclinação, como se esquematiza na Figura 4.35.

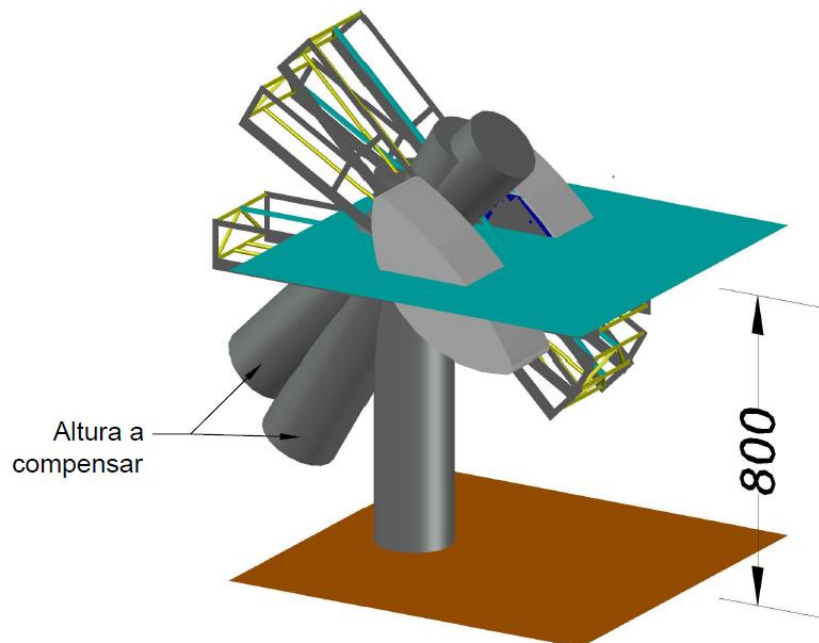


Figura 4.35 - Representação da variação da altura da base (medidas em mm).

A alteração do nível da água no tanque de ondas iria impossibilitar qualquer tipo de comparação direta entre os resultados dos testes realizados. Assim, de forma a permitir o ajuste de altura, foram efetuadas 4 furações no cilindro de betão central, onde foram introduzidas 4 buchas com rosca. Nessas buchas foram aplicados 4 varões de aço inox roscados que garantem um encastramento perfeito no cilindro de betão, conforme ilustrado em pormenor na Figura 4.36.



Figura 4.36 - Sistema de compensação da altura na base do modelo.

Estes varões foram colocados a uma distância que permitiu o encaixe de duas placas de aço inox, uma em cada lateral do corpo central, onde foram feitas várias furações, que permitem o ajuste da inclinação longitudinal do dispositivo. Estas placas possuem 4 furos, um deles serve de eixo de rotação e os outros para colocação de um varão roscado no furo correspondente e à inclinação pretendida. É de mencionar que estas placas foram as mesmas utilizadas por Teixeira (2012) e Marinheiro (2013).

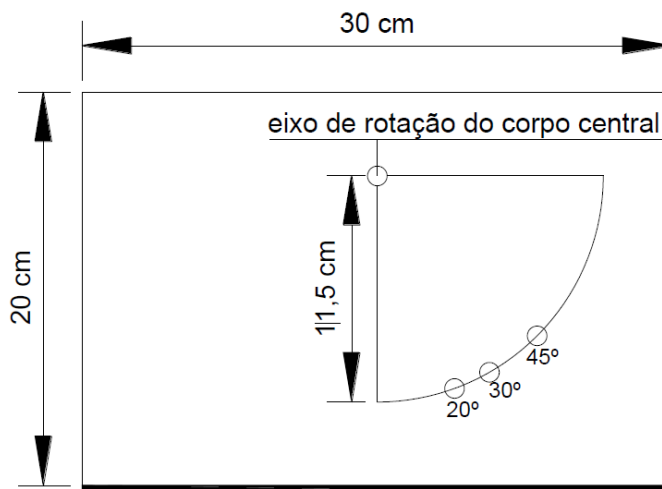


Figura 4.37 - Esquema do sistema de rotação na base do dispositivo.

Foram efetuados 2 furos na base de cada uma destas placas de forma a permitir que estas entrem nos varões roscados encastrados na base de betão. É assim possível alterar a altura destas placas através das porcas e anilhas que fixam estas placas aos varões roscados.

A altura das placas relativamente à base de betão foi de 28.6 e 18.0 cm para as inclinações de 45° e 30°, respetivamente.

4.9.4.5. Corpo central fixo e sistema de guiamento dos tirantes

O corpo central fixo do modelo construído é um pouco maior do que os utilizados anteriormente⁶, devido à alteração da escala de 1/20 para 1/25. À semelhança dos modelos físicos anteriores, o corpo central consiste num tubo de PVC com 200 mm de diâmetro, que lhe garante rigidez e ao mesmo tempo mitiga as perturbações do escoamento na sua envolvente.

A construção do corpo central iniciou-se pelo corte do tubo de PVC para as dimensões pretendidas (70 cm). De seguida efetuaram-se as furações para os dois tirantes inferiores (com as distâncias previamente apresentadas na Figura 4.24) a 35 cm da base do tubo⁷. Se seguida, tomando como referência a furação dos dois tirantes inferiores, fez-se o furo para o tirante superior que faz a ligação cremalheira-pinhão.



Figura 4.38 - Tubo PVC com a furação para os tirantes.

Foi ainda necessário efetuar dois furos a 6,0 cm da base do tubo e com 11,5 cm de distância entre si, de forma a permitir a ligação do corpo central nas placas de aço inox da base já existentes. Esta ligação é feita por 2 varões roscados que atravessam as duas placas e o corpo central, de uma ponta à outra, Figura 4.39.

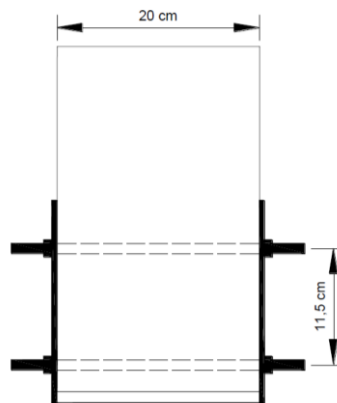


Figura 4.39 - Esquema do sistema de fixação do corpo central fixo (vista frontal) (adaptado de Marinheiro, 2013).

⁶ O diâmetro do corpo central foi aumentado em 1 metro (valores de protótipo)

⁷ Foi considerada a posição de referência o corpo central fixo com 0° de inclinação (posição vertical)

De seguida, partiu-se para a construção do sistema de guiamento dos tirantes. A construção do mesmo iniciou-se com o corte de dois discos de *Perspex* com 10 mm de espessura e 192 mm de diâmetro de forma a permitir o encaixe no interior do tubo de PVC de 200 mm de diâmetro. Para o guiamento dos dois tirantes inferiores (estabilizadores), foram utilizados numa primeira abordagem 4 patins de zinco, com as dimensões e espaçamento adequados aos mesmos. A fixação dos patins foi feita por 2 parafusos sextavados que atravessam os discos e enroscam no patim. Teoricamente esta solução seria a ideal, uma vez que impede movimentos em qualquer outra direção e, teoricamente, apresentaria baixa resistência ao movimento dos tirantes por atrito.

De seguida procedeu-se à junção dos dois discos de *Perspex*, através de duas placas (também de *Perspex*), utilizando cola. A junção entre as placas e os discos foi ainda reforçada aplicando um parafuso de cabeça cilíndrica com sextavado interno. A Figura 4.40 apresenta o resultado final da parte inferior do sistema de guiamento dos tirantes.



Figura 4.40 - Parte inferior do sistema de guiamento dos tirantes.

O guiamento do tirante superior exigiu a aplicação de um suporte para o motor e respetiva polia. Esse suporte consistiu numa placa de *Perspex* em forma de semicírculo que permitia um encaixe mais perfeito do corpo do motor. Essa placa semicircular foi ainda reforçada com duas placas retangulares (uma em cada extremidade e fixadas com parafusos) de forma a conferir-lhe uma maior estabilidade. O tirante superior tem acoplado uma correia que transmite o movimento linear oblíquo para o PTO, o que implica que o mesmo esteja sempre em contato com a polia. Para tal foi montada uma pequena roldana do lado oposto à polia de forma a forçar esse mesmo contato.

Após um primeiro teste no tanque de ondas chegou-se à conclusão que o sistema de guiamento dos tirantes necessitava de alterações, nomeadamente a nível do guiamento dos tirantes estabilizadores e no alinhamento do tirante superior.

Devido à esbelteza dos tirantes inferiores, verificou-se que estes fletiam. Estas flexões dificultavam a sua correta passagem pelos patins de zinco, aumentando a resistência ao movimento da parte móvel da estrutura. Assim, de forma a permitir um melhor funcionamento em condições de flexão dos tirantes, foi adotada outra solução.



Figura 4.41 - Sistema de guiamento dos tirantes inicial.

A nova solução consistiu na substituição dos quatro patins, por um conjunto de 8 roldanas em aço inox, quatro no disco superior e quatro no disco inferior. Essas roldanas foram colocadas de acordo com as dimensões do tirante (espaçamento de 1 cm entre as roldanas superiores e inferiores, e espaçamento de 6 cm entre o conjunto de roldanas), conforme ilustrado na Figura 4.42.

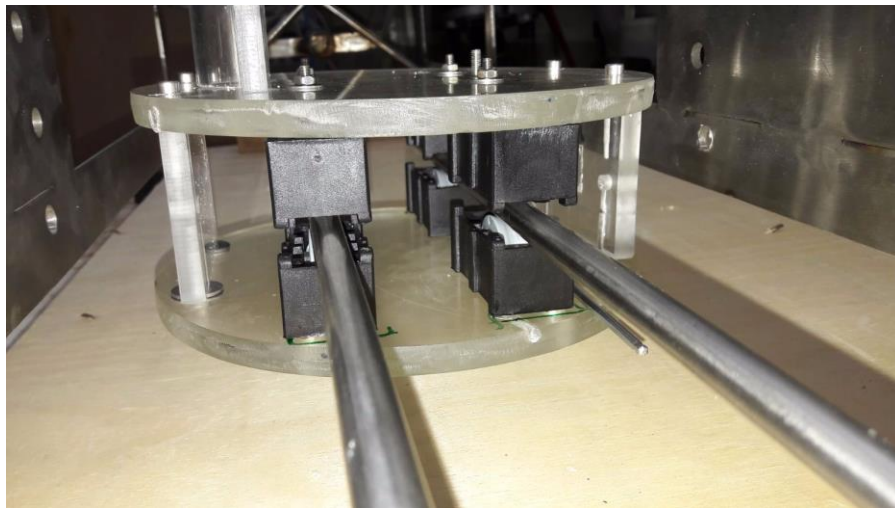


Figura 4.42 - Posicionamento dos dois discos com as roldanas e os tirantes inferiores.

Foram ainda acrescentadas duas roldanas no topo do disco superior de forma a que estas impedissem o tirante superior de sair da sua posição. Esta alteração foi importante uma vez que devido à esbelteza do tirante superior, este tinha tendência a fletir e quebrava a ligação entre a correia e a polia do motor. Quando isto ocorria, para além de se perder o propósito principal do dispositivo CECO, ainda se verificava um aumento na resistência ao movimento da parte móvel. A Figura 4.44 apresenta o resultado final do sistema de guiamento dos tirantes.



Figura 4.43 - Nova solução de guiamento dos tirantes.

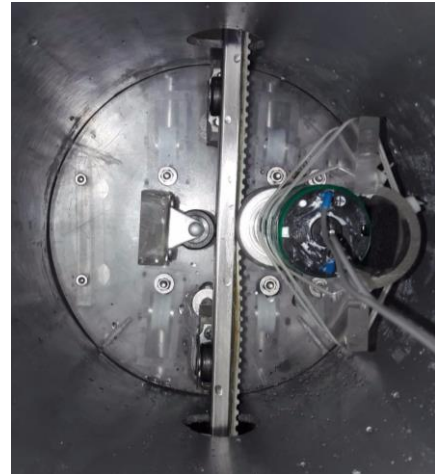


Figura 4.44 - Pormenor do guiamento do tirante superior.

Terminado o sistema de guiamento dos três tirantes, a peça foi instalada dentro do corpo central. De seguida, cuidadosamente, foi feita uma furação no tubo de forma a permitir o encaixe de parafusos sextavados internos para fixar os discos de *Perspex* no interior do mesmo. A Figura 4.45 apresenta o corpo central fixo com o elemento anelar estrutural e tirantes montados.



Figura 4.45 - Corpo central fixo com elemento anelar estrutural e tirantes montados.

5

INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

5.1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo visa descrever detalhadamente o estudo experimental efetuado para a análise do dispositivo CECO. Será descrito todo o processo experimental, nomeadamente as condições de teste estudadas, os testes de caracterização do sistema de reprodução do PTO e os procedimentos necessários à realização de cada fase experimental. Para além disso serão ainda apresentados os resultados obtidos.

O dispositivo foi testado para vários tipos de agitação marítima regular e irregular. Foram também testados diferentes graus de inclinação do dispositivo, bem como diferentes graus de amortecimento do sistema de reprodução do PTO. O comportamento do dispositivo para essas condições será analisado em detalhe nos pontos seguintes.

Com base nos resultados obtidos, pretende-se, também, confrontar os valores da potência absorvida estimados através da medição direta da diferença de potencial pelo sistema de reprodução do PTO com os valores estimados por via indireta, a partir dos registos do sistema de aquisição de movimentos *Qualisys*.

Finalmente, apresenta-se uma estimativa da energia produzida para as diferentes condições de teste, no modelo físico, efetuando a extrapolação desses valores para o protótipo, utilizando os fatores de escala determinados de acordo com os critérios de semelhança adaptados.

5.2. PLANO DE TESTES

Como foi referido anteriormente, o presente estudo visa o desenvolvimento e otimização do dispositivo conversor de energia das ondas CECO tendo em vista a sua aplicação na costa portuguesa.

A definição de um plano de testes adequado às características e funcionamento do CECO é um fator crucial na análise da viabilidade do conceito. É, portanto, importante fazer uma análise da forma como parâmetros como, por exemplo, a inclinação do dispositivo, a profundidade da água, as condições de agitação marítima ou as características do PTO afetam o desempenho final do dispositivo.

Ao contrário dos estudos em modelo físico realizados anteriormente, o presente trabalho experimental tem já como base uma série de estudos numéricos anteriores, que permitiram uma melhor definição das características do dispositivo CECO a estudar e das próprias condições de teste. De facto, esses estudos numéricos acrescentaram informações relevantes ao rumo que o dispositivo deve tomar e têm um papel preponderante no desenvolvimento do mesmo.

No presente estudo experimental foram reproduzidas condições de agitação marítima características da costa portuguesa, em particular da costa oeste, mas também condições de agitação relevantes para os

futuros trabalhos de modelação numérica. Assim, o plano de testes foi definido com base nos resultados dos estudos numéricos referidos anteriormente (Secção 3.3).

Conforme referido anteriormente, os estudos numéricos indicaram que o dispositivo CECO apresentava um melhor desempenho para alturas de onda significativas compreendidas entre os 2,5 a 5 m, e períodos de pico na ordem dos 10 a 13 s. Foram, também, analisados os resultados das simulações das condições de agitação marítima na costa portuguesa, que indicam que a maior parte da energia das ondas disponível se encontra associada aos seguintes estados de mar:

- Região Norte: 1 a 5 m de altura de onda significativa e períodos de onda de pico de 10 a 13 s;
- Região Sul: 1 a 3 m de altura de onda significativa e períodos de onda de pico de 11 a 15 s.

Tendo como ponto de partida as conclusões dos estudos anteriores, torna-se assim necessário determinar as condições de agitação que é possível simular na instalação experimental. A altura de onda máxima que pode ser reproduzida no tanque de ondas, para um determinado período, é limitada, quer por critérios de rebentação da onda, quer pelas características de desempenho do sistema de geração.

O desempenho do sistema de geração de agitação marítima está dependente da excursão máxima das pás (1,08 m), da sua velocidade máxima (0,87 m/s) e da força de atuação (1,5 kN). Outra condicionante está associada à relação entre a altura de onda máxima ($H_{m\acute{a}x}$) que pode ser gerada, numa determinada profundidade de água, sem que ocorra rebentação da onda, que é dada por,

$$H_{m\acute{a}x} = \frac{L}{7} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad \text{ou} \quad H_{m\acute{a}x} = \frac{L}{10} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$$

em que L representa o comprimento de onda e d a profundidade de água.

Outro critério, mais conservativo do que o primeiro, dá na prática mais garantias de que as ondas geradas não sofrem rebentação. De acordo com este critério, a relação entre $H_{m\acute{a}x}$ a e d é:

$$H_{m\acute{a}x} = 0.5 \cdot d \quad \text{ou} \quad H_{m\acute{a}x} = 0.6 \cdot d$$

Na Figura 5.1 e Figura 5.2 apresentam-se as condições de agitação marítima que podem ser reproduzidas pelo sistema de geração de ondas instalado no Laboratório de Hidráulica (LH) da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da FEUP, para uma profundidade de água no tanque de ondas igual a 0,80 m e para estados de agitação marítima regular e irregular, respetivamente. Nessas representações são consideradas as hipóteses relativas à utilização do sistema de geração com o módulo de absorção ativa de reflexões desligado e uma situação com esse mesmo módulo ativo e absorvendo reflexões de um modelo físico com um coeficiente de reflexão de 20%.

Quando se reproduzem estados de agitação irregular, é importante ter em consideração que a altura de onda máxima na sequência aleatória de ondas geradas poderá ser 1.7 a 1.8 vezes superior à altura de onda significativa.

Como se pode verificar pela análise da Figura 5.1 e Figura 5.2, todas as condições de teste definidas para o presente estudo, estão dentro daquilo que são os limites físicos do fenómeno e dos impostos pelo próprio sistema de geração.

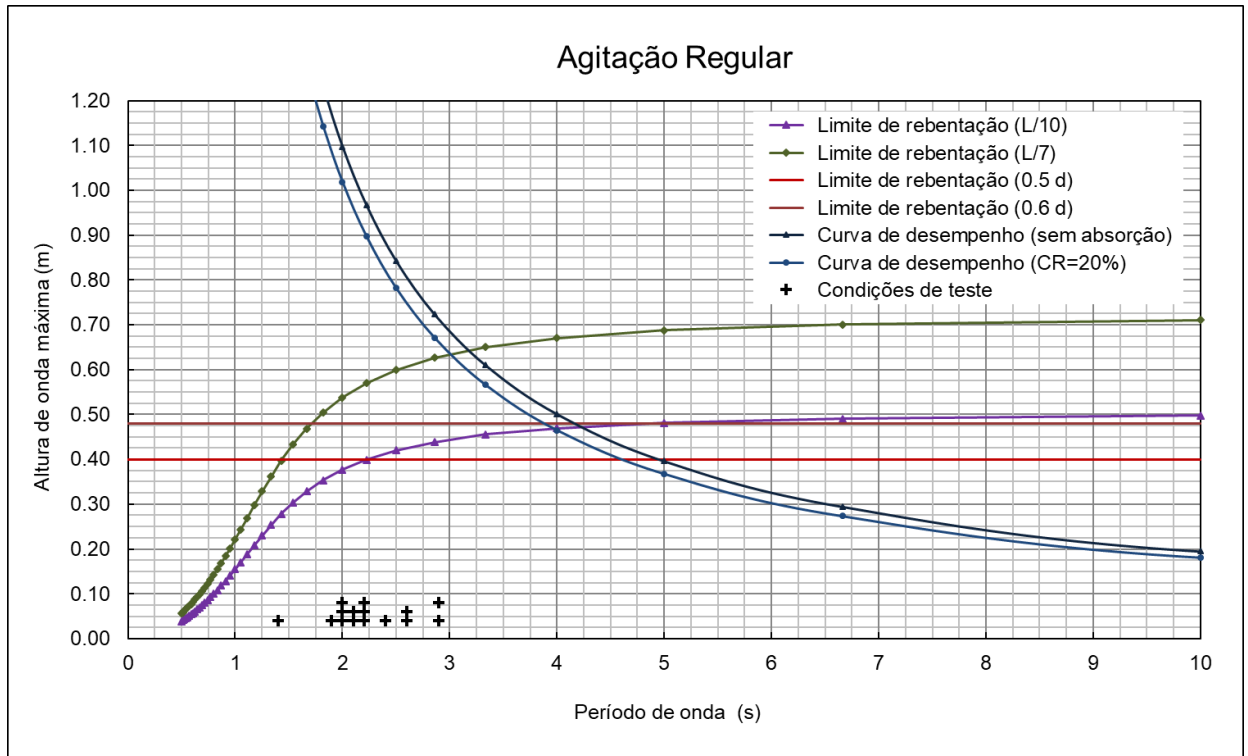


Figura 5.1 - Condições de agitação marítima vs. condições limite da instalação experimental para ondas regulares.

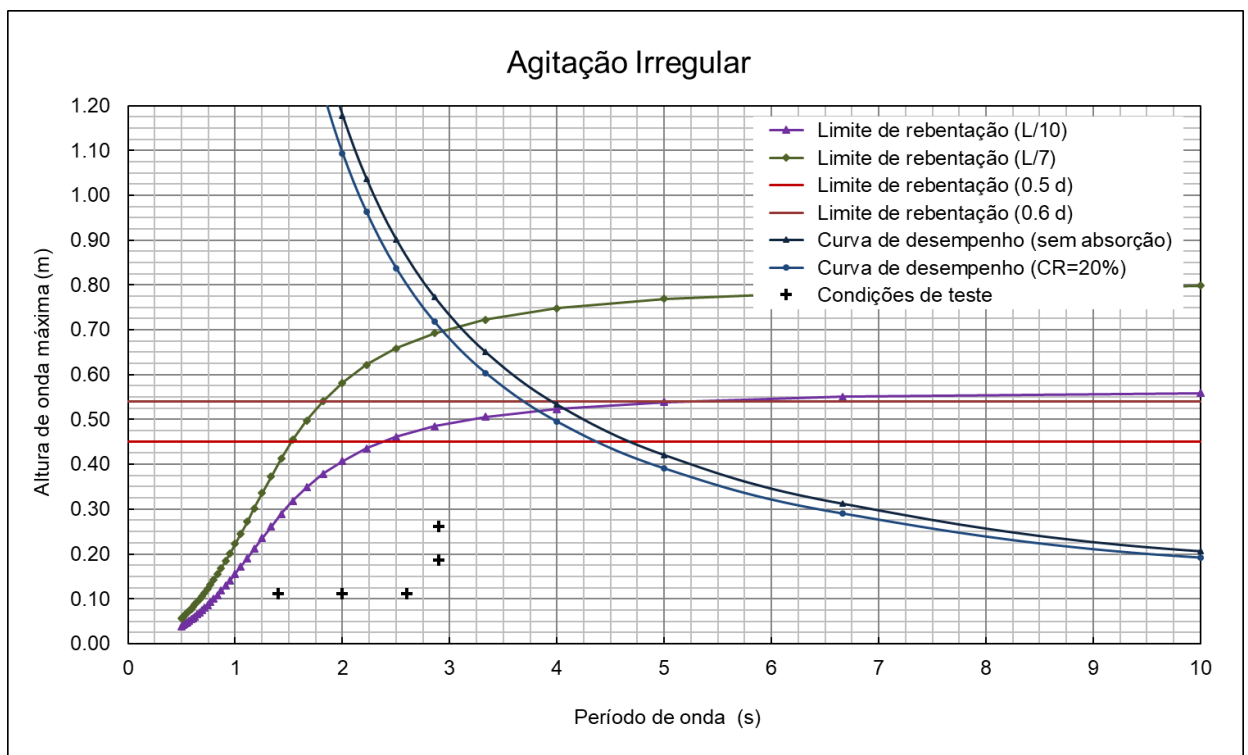


Figura 5.2 - Condições de agitação marítima vs. condições limite da instalação experimental para ondas irregulares.

Assim, pela análise da das Figura 5.1 e Figura 5.2, é possível identificar um total de 20 estados de agitação marítima distintos, onde 5 deles são estados irregulares e os restantes regulares. De forma a facilitar a nomenclatura e organização do trabalho foram atribuídos nomes a cada um dos 20 estados referidos. Os Quadro 5.1 e Quadro 5.2 apresentam o nome atribuído a cada um dos diferentes estados de agitação a que o dispositivo foi submetido.

Quadro 5.1 - Nome atribuído aos estados de agitação regulares.

Nome do Estado de Agitação	T (s)	H (m)
REG1	7.0	1.0
REG2	9.5	1.0
REG3	10.0	1.0
REG4	10.0	1.5
REG5	10.0	2.0
REG6	10.5	1.0
REG7	13.0	1.0
REG8	14.5	1.0
REG9	14.5	2.0
REG10	11.0	1.0
REG11	11.0	1.5
REG12	11.0	2.0
REG13	12.0	1.0
REG14	13.0	1.5
REG15	10.5	1.5

Quadro 5.2 - Nome atribuído aos estados de agitação irregulares.

Nome do Estado de Agitação	Tp (s)	Hs (m)
IRREG1	7.0	1.5
IRREG2	10.0	1.5
IRREG3	13.0	1.5
IRREG4	14.5	2.5
IRREG5	14.5	3.5

Antes da realização de testes com o dispositivo CECO sob a ação das ondas, é importante quantificar o amortecimento e os períodos naturais de oscilação relativos à parte móvel do dispositivo, para as várias configurações a testar (inclinações do CECO e amortecimento introduzido pelo PTO). Esses parâmetros foram estimados a partir de testes de decaimento livre das oscilações do dispositivo CECO em águas de outro modo paradas.

Com base nos pressupostos referidos, foi definido um plano de testes adequado aos objetivos da presente dissertação de mestrado, Quadro 5.3.

Quadro 5.3 - Quadro síntese das condições de teste estudadas.

Inclinação	Amortecimento (Ohms)	Agitação	H/H _S (m)	T/T _P (s)
30°	10 42 100 S/PTO	Regular	1.0	7; 9.5; 10; 10.5; 11; 12; 13; 14.5
			1.5	10; 10.5; 11; 13
			2.0	10; 11;14.5
	10 42 100 S/PTO	Irregular	1.5	7; 10; 13
			2.5	14.5
			3.5	14.5
			45°	
	10 100 S/PTO	Regular	1.0	7; 9.5; 10; 10.5; 13; 14.5
1.5			10	
2.0			10; 14.5	
10 100 S/PTO		Irregular	1.5	7; 10; 13
			2.5	14.5
			3.5	14.5

Uma vez que o plano de testes apresentado no Quadro 5.3 é já significativamente ambicioso, não foi possível estudar a influência que a direção de incidência das ondas terá sobre o desempenho final do dispositivo CECO. Sendo este dispositivo unidirecional, é importante que o mesmo se encontre direcionado perpendicularmente à crista da onda de forma a maximizar a energia absorvida. Apesar de no laboratório esta questão ser facilmente contornável, o mesmo não se verifica numa aplicação em mar, assim, conforme referido anteriormente, é importante a existência de um sistema que permita ajustar o dispositivo à direção das ondas incidentes.

5.3. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE REPRODUÇÃO DO PTO

Conforme referido anteriormente, o sistema PTO foi reproduzido com um motor elétrico síncrono (DC – *Direct Current*) que funcionou como gerador, em que foram aplicadas diferentes resistências de forma a simular diferentes condições de amortecimento. Contudo, o seu comportamento não era conhecido à partida, sendo por isso necessário caracterizar a força de amortecimento introduzida por esse elemento, para diferentes velocidades de rotação do motor e condições de funcionamento (resistência introduzida).

Foram assim realizados vários testes experimentais de caracterização do sistema PTO para as condições de amortecimento apresentadas no Quadro 5.3. Os graus de amortecimento que foram considerados são os associados às seguintes resistências externas: 100, 79.6, 42, 10 e 5.6 Ohms, bem como à resistência máxima e mínima.

A força de amortecimento induzida pelo motor pretende reproduzir o amortecimento gerado durante a produção de energia elétrica com o dispositivo CECO em funcionamento. Assim, em primeiro lugar, foi necessário caracterizar o motor por uma curva de desempenho que relaciona a velocidade com que o modelo do CECO se desloca e a força de amortecimento gerada pelo motor.

O movimento da marca refletora, cuja velocidade pode ser relacionada com a velocidade rotativa da polia e do sistema de reprodução do PTO foi capturado e registado pelo *Qualisys*. Em simultâneo, foi feita a medição da ddp pela aplicação desenvolvida para a monitorização do sistema de reprodução do PTO. Assim passa a ser possível ter uma estimativa da potência gerada através de dois métodos, um método direto que resulta da medição da ddp por parte do sistema de monitorização do PTO, e outro método indireto, que tira partido da aplicação da função do fator de amortecimento e da velocidade.

5.3.1. CURVAS DE DESEMPENHO DO SISTEMA PTO

Para determinar a curva de desempenho do sistema de reprodução do PTO foi necessário calcular o seu coeficiente de amortecimento para diferentes valores de força aplicada (pesos). Assim, para esse efeito, foi idealizado um procedimento experimental simples que consiste, basicamente, na utilização de um fio enrolado em torno da polia do motor com um peso variável acoplado na extremidade. Devido à ação da gravidade sobre o peso, este sofre um movimento vertical descendente, que pode ser caracterizado medindo a velocidade e a aceleração que o peso tem durante o movimento descendente, com recurso ao sistema de medição de movimentos *Qualisys*. Na Figura 5.3 apresenta-se a instalação experimental que permitiu a caracterização do sistema de reprodução do PTO utilizado.

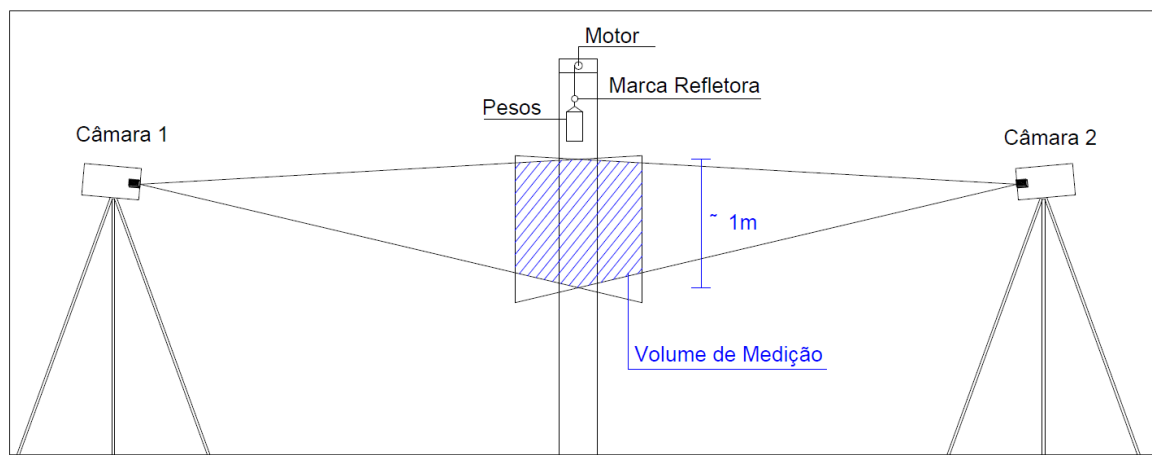


Figura 5.3 - Esquema da Instalação experimental para a caracterização da força de amortecimento aplicada pelo sistema de reprodução do PTO (adaptado de Teixeira, 2012).

As câmaras do sistema *Qualisys* não foram posicionadas de forma a captar todo o percurso do peso, pois o movimento descendente é inicialmente acelerado. Quando a resultante das forças atuantes no sistema fica nula, o movimento passa a ser uniforme, com velocidade constante e aceleração aproximadamente igual a zero. Assim, quando o corpo (peso) estiver dentro do volume de medição, este já adquiriu um movimento linear uniforme. A Figura 5.4 apresenta as séries temporais dos deslocamentos do corpo nas componentes x, y e z, obtidas com o sistema *Qualisys*. As correspondentes velocidade e aceleração são apresentadas na Figura 5.5 e Figura 5.6, respetivamente.

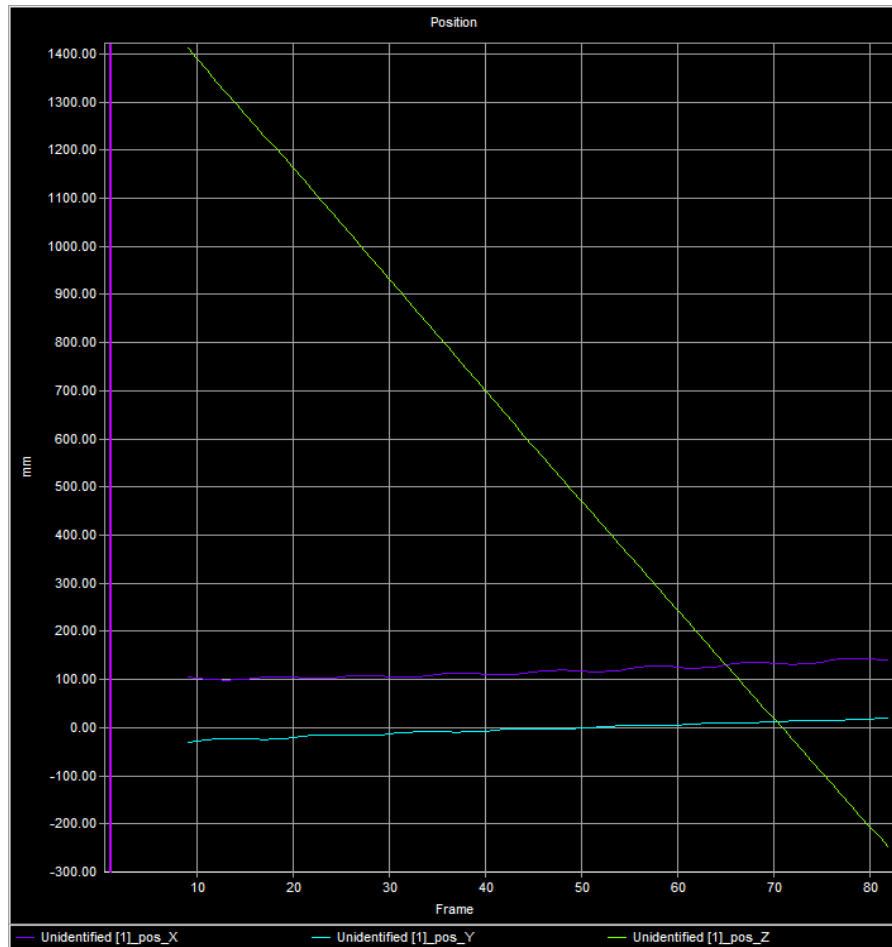


Figura 5.4 – Deslocamento do peso as segundo as componentes x, y e z obtido com o sistema Qualisys num ensaio de caracterização do sistema de reprodução do PTO.

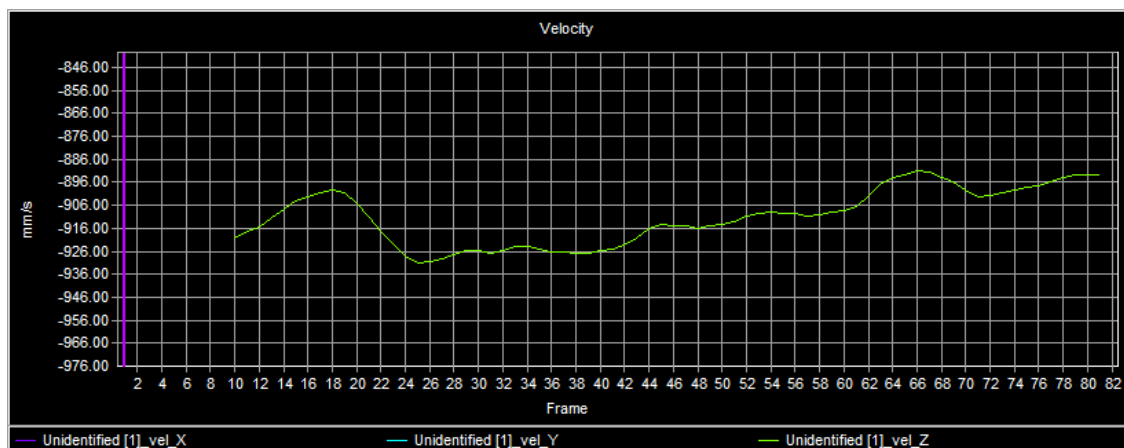


Figura 5.5 - Velocidades segundo as componentes x, y e z obtidos com o sistema Qualisys num ensaio de caracterização do sistema de reprodução do PTO.

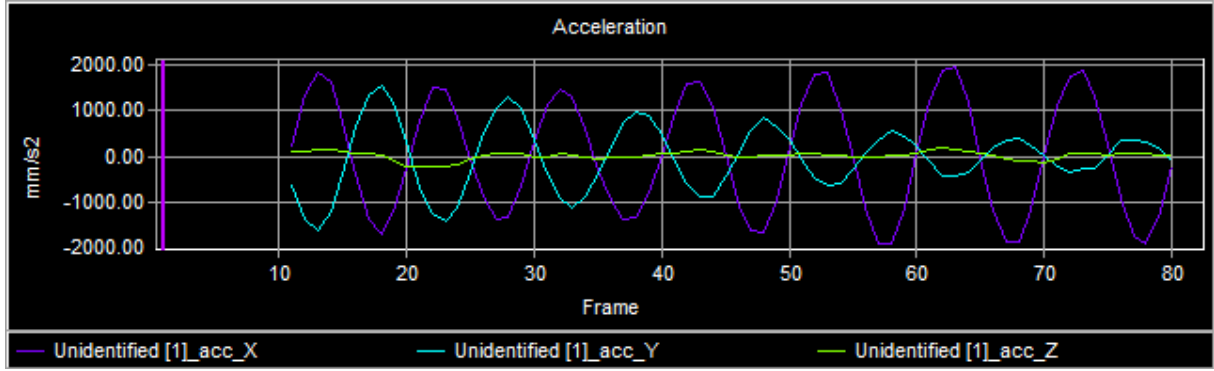


Figura 5.6 - Acelerações segundo as componentes x, y e z obtidos com o sistema *Qualisys* num ensaio de caracterização do sistema de reprodução do PTO.

Como se pode verificar pela análise das Figura 5.4 a Figura 5.6, o movimento descendente da marca refletora, dentro do volume útil de medição, foi aproximadamente linear e uniforme, uma vez que a variação da sua posição no tempo é linear, a velocidade é aproximadamente constante e, portanto, a aceleração é aproximadamente nula.

É de salientar que durante o decorrer dos ensaios, teve que se ter uma especial atenção à forma como se enrolava o fio na polia, tendo-se constatado no início que, por vezes, a velocidade do sistema pesos-marca refletora diminuía na fase final do percurso. Isto devia-se à sobreposição de várias camadas de fio que provocavam um aumento do “raio” da polia. Com o desenrolar do fio, esse raio diminui progressivamente, o que implica uma redução do momento aplicado no motor e, também, da velocidade dos pesos.

5.3.2. POTÊNCIA ABSORVIDA – MÉTODO INDIRETO

A equação que descreve o movimento descende do peso é dada por,

$$mg = m\ddot{z} + c_a\dot{z} \quad (5.1)$$

em que m representa a massa do conjunto utilizado em cada teste, em kg, g a aceleração da gravidade, em m/s^2 , $\ddot{z}$ a aceleração da massa, segundo z , em m/s^2 , $\dot{z}$ a velocidade da massa segundo z , em m/s .

O coeficiente de amortecimento produzido pelo sistema de reprodução do PTO foi determinado com base na expressão (5.2) e a força de amortecimento produzida pela expressão (5.3),

$$c_a = \frac{mg - m\ddot{z}}{\dot{z}} \quad (5.2)$$

$$F_a = c_a\dot{z} \quad (5.3)$$

em que c_a representa o coeficiente de amortecimento linear do motor, em $N/(m/s)$, e F_a a força de amortecimento produzida pelo sistema de reprodução do PTO, em N.

A curva de desempenho do sistema de reprodução do PTO, para as diferentes condições de teste (valores de resistência externa utilizada) foi determinada com base no ajuste de diferentes curvas de regressão

aos pontos obtidos experimentalmente, Quadro 5.4. Essas curvas de regressão expressam a força de amortecimento em função da velocidade.

Quadro 5.4 - Regressões matemáticas obtidas a partir da caracterização do sistema de reprodução do PTO.

Resistência	Curvas de Regressão	Coefficiente de Amortecimento (kN.s/m) (valores de protótipo)
Máxima	$F_a = 0.7076v + 1.4848$	2.21
100 Ω	$F_a = 0.8061v + 1.419$	2.52
42 Ω	$F_a = 14.65v + 1.3853$	45.78
10 Ω	$F_a = 30.812v + 1.4749$	96.29
5,6 Ω	$F_a = 37.237v + 1.2191$	116.36
Mínima	$F_a = 48.291v + 1.1833$	150.91

Depois de determinada a curva de regressão que melhor traduz a força de amortecimento provocada pelo sistema de reprodução do PTO, é possível fazer o cálculo da potência instantânea absorvida pelo dispositivo (neste caso a potência gerada). Esta potência pode ser obtida a partir da expressão (5.4).

$$P = F_a \cdot v \quad (5.4)$$

em que P representa a potência instantânea, F_a a força de amortecimento e v a velocidade instantânea do movimento segundo a direção z .

5.3.3. POTÊNCIA ABSORVIDA – MÉTODO DIRETO

Como foi já referido anteriormente, a potência instantânea gerada pelo sistema de reprodução do PTO pode ser facilmente calculada com base nos registos obtidos com a ferramenta desenvolvida para a monitorização direta do PTO. A forma como o sistema de monitorização foi desenvolvido⁸ implica a necessidade de aplicação de uma fórmula de modo a converter os valores apresentados na interface para a unidade padrão (Volts). A fórmula de conversão é dada por,

$$V = \frac{(ddp - 1911)}{78.5} \quad (5.5)$$

em que V representa os valores da diferença de potencial em Volts e ddp os valores em bruto registados pelo sistema de monitorização do PTO.

Com a diferença de potencial em Volts, é assim possível determinar a potência útil que o sistema está a gerar, através de,

$$P_u = \frac{V^2}{R} \quad (5.6)$$

onde V é a ddp em Volts e R a resistência externa em carga em Ohms.

⁸ O sistema foi desenvolvido desta forma de modo a facilitar a calibração do mesmo.

A diferença de potencial a considerar para o cálculo da potência útil corresponde à média dos valores obtidos instantaneamente pelo sistema de monitorização do PTO dentro do volume útil de medição do *Qualisys*,

De seguida é assim possível extrapolar a potência gerada pelo modelo para valores de protótipo. Deste modo é possível ter uma perceção mais realista da potência debitada pelo CECO numa aplicação real. Esta conversão de valores de modelo para protótipo, conforme referido anteriormente, tem por base o critério de semelhança de *Froude* onde:

$$P_p = P_m \cdot \gamma \cdot \lambda_l^{3.5} \quad (5.7)$$

onde, P_p é a potência do protótipo, P_m a potência do modelo, γ o fator corretivo que representa o quociente entre a massa volúmica da água doce e da água salgada, e λ_l o fator de escala geométrico.

5.4.PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O estudo experimental no tanque de ondas iniciou-se com a remoção da Sonda 5, de forma a dar lugar à base de betão do CECO. É ainda importante referir que se teve o cuidado de implantar o modelo físico fora da tampa do fosso central do tanque de ondas, de forma a que os resultados dos ensaios a efetuar não fossem influenciados por possíveis vibrações da mesma.

Com a base de betão devidamente instalada no local pretendido, procedeu-se à montagem das diversas partes constituintes do modelo, nomeadamente o corpo central fixo, o elemento anelar estrutural e os MLMs. Foi ainda necessário ajustar o grau de submersão do dispositivo CECO. De acordo com o estudo de Rodriguez *et al.* (2018), os MLMs teriam um grau de submersão de 50% para um peso total da parte móvel do dispositivo de 18.62 kg. Durante esta fase, foi pesado o elemento anelar estrutural e os dois MLMs, tendo-se obtido um peso de 5.64 kg para o elemento anelar estrutural e um peso de 4.7 kg para cada um dos MLMs. Assim, houve a necessidade de acrescentar 1.5 kg a cada um dos MLMs de forma a obter o grau de submersão pretendido. Esse ajuste da massa foi realizado através da colocação de areia num compartimento próprio, dentro de cada um dos MLMs. No final o grau de submersão foi confirmado visualmente, com recurso a uma régua e a desenhos CAD.

Foram ainda aplicadas no modelo físico as marcas refletoras que permitem a aquisição dos movimentos do dispositivo CECO. Para a aplicação destas marcas, foi instalada na extremidade traseira do elemento anelar estrutural uma estrutura em forma de “L”. Esta estrutura possibilitou, assim, a utilização de quatro marcas posicionadas estrategicamente de forma a facilitar a definição e posicionamento do referencial local associado ao corpo rígido, através de translações e sucessivas rotações desse sistema de eixos, para o tornar adequado ao tipo de movimentos do dispositivo CECO, Figura 5.7. Foram ainda aplicadas mais duas marcas auxiliares de forma a permitir uma melhor caracterização dos movimentos segundo todos os graus de liberdade.

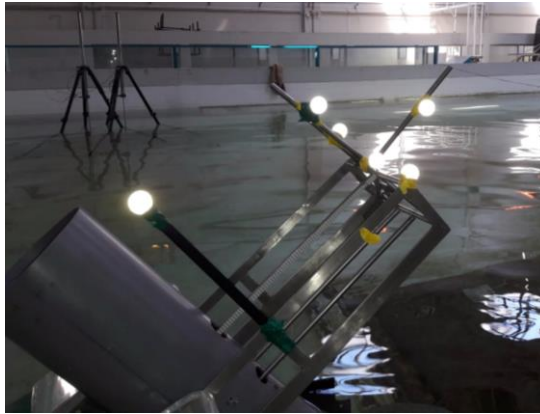


Figura 5.7 - Marcas refletoras aplicadas no CECO.

Após a instalação do modelo físico do dispositivo CECO no tanque de ondas, e das respectivas marcas refletoras, foram instaladas as três câmaras do sistema *Qualisys* de forma a abrangerem um volume de medição adequado aos movimentos que o modelo experimentará. Na orientação das câmaras teve-se o cuidado de colocar as marcas refletoras instaladas no CECO numa posição central da imagem capturada por cada uma das câmaras e ainda de verificar que o sistema apanhava apenas as seis marcas refletoras pretendidas, Figura 5.8.

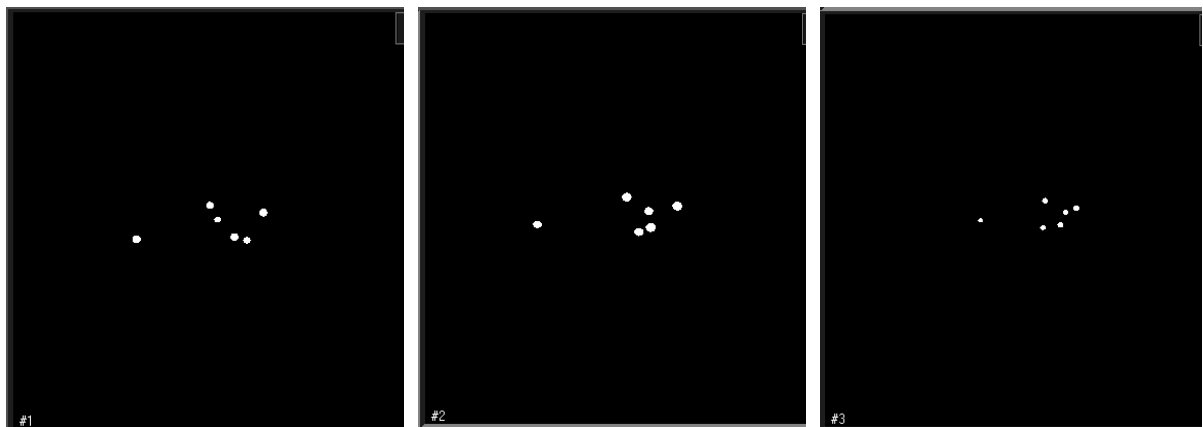


Figura 5.8 - Janelas de Visualização da captura das três câmaras utilizadas.

Ao contrário dos trabalhos realizados anteriormente (Teixeira, 2012 e Marinheiro, 2013), que utilizaram apenas duas câmaras, no presente trabalho foram usadas três, o que ajuda a garantir uma maior segurança e precisão na aquisição dos movimentos do CECO. A Figura 5.9 representa o esquema final dos diversos componentes utilizados no presente no trabalho.

Com todos os sistemas previamente referidos devidamente instalados e calibrados, procedeu-se ao início dos ensaios. De referir que, no início de cada fase de testes experimentais, era realizada a calibração do sistema de aquisição de movimento e do sistema de aquisição da agitação marítima.

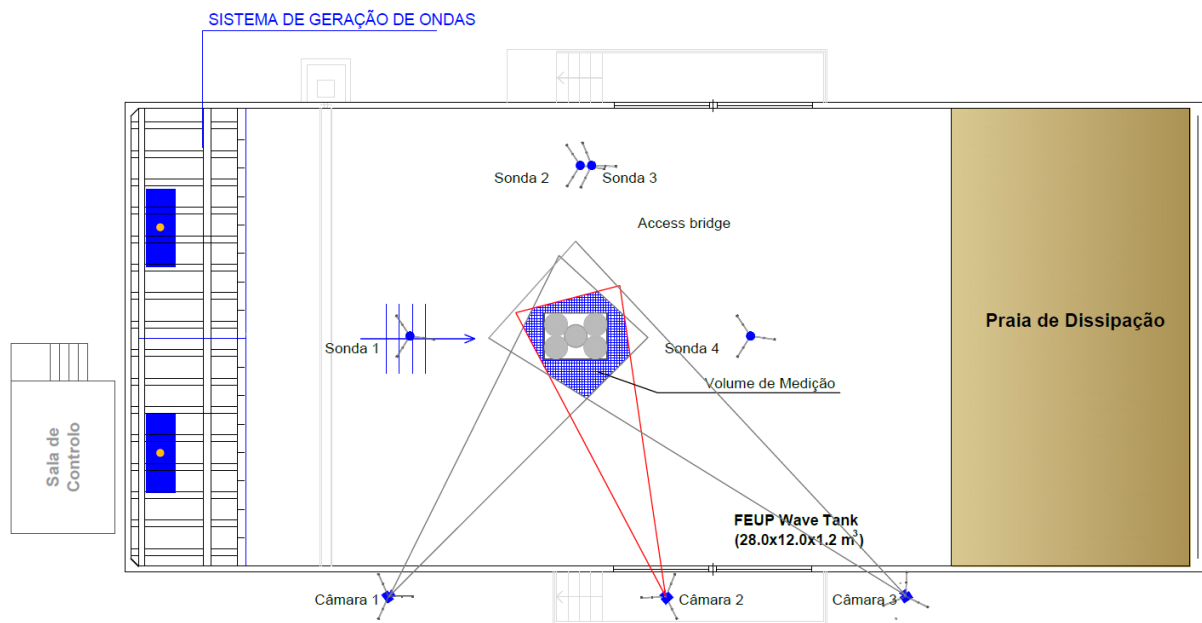


Figura 5.9 - Esquema da instalação das sondas, câmaras e modelo físico durante a fase de testes.

O sistema de aquisição de movimentos *Qualisys* era o primeiro a ser calibrado. A calibração do mesmo iniciava-se com a colocação da estrutura em “L” dentro do volume de medição das câmaras, de forma a que o “braço” maior estivesse orientado perpendicularmente ao sistema de geração, definindo-se, assim, o eixo dos *xx*. Esta orientação facilitava a translação do sistema de eixos global para o sistema de eixos local.

Para que fosse possível realizar corretamente a calibração do *Qualisys*, cobriam-se as marcas refletoras instaladas na parte móvel do CECO, uma vez que durante a calibração as câmaras apenas podem captar as marcas refletoras da estrutura em “L” e “T”, Figura 5.10.



Figura 5.10 - Estrutura em “L” ao lado do modelo com as marcas refletoras tapadas.

De seguida era iniciado no *software* QTM – *Qualisys Track Manager*. O período de calibração, durante o qual a estrutura em T tinha de ser movimentada segundo diversas direções e sentidos dentro do volume de medição, foi de 90 s. Finalizada esta calibração, o *software* QTM apresenta uma janela com o resíduo final associado a cada uma das câmaras. A calibração era considerada aceitável quando o resíduo médio apresentava valores inferiores a 0.6 mm.

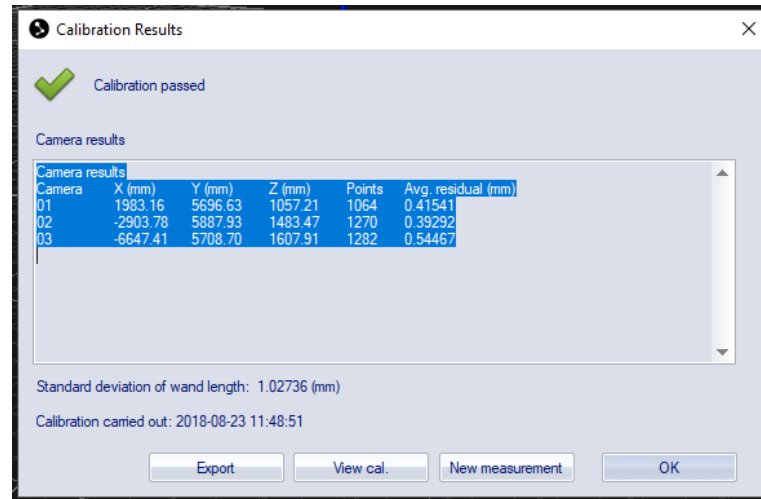


Figura 5.11 - Resultado final de uma calibração do sistema Qualisys.

O resíduo médio associado ao corpo rígido era ainda verificado durante os ensaios, de forma a garantir a qualidade dos dados obtidos, Figura 5.12. Quando se verificava que o resíduo médio começava a aumentar (possivelmente por causa de pequenos deslocamentos entre as marcas constituintes do corpo rígido), procedia-se à aquisição de um novo corpo rígido e nalguns casos à recalibração do sistema de medição.

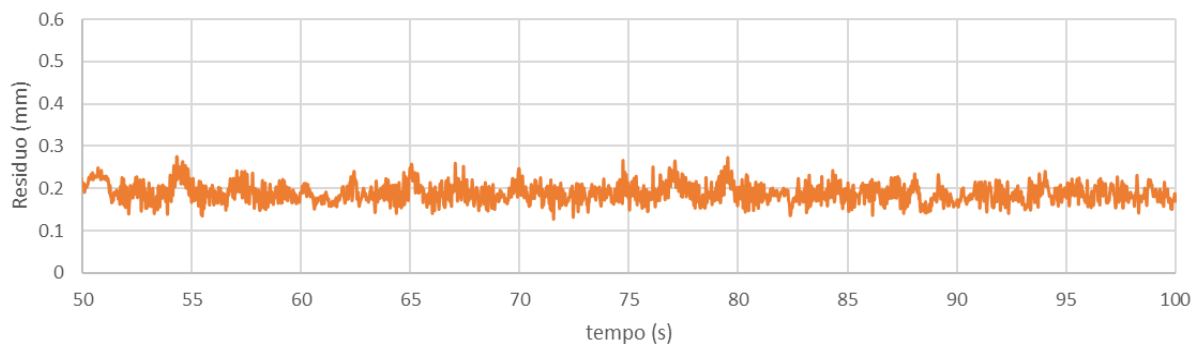


Figura 5.12 - Variação temporal do resíduo médio das medições realizadas pelo Qualisys.

Após a obtenção de uma calibração válida, era removida a estrutura em “L” e as marcas refletoras eram destapadas. De seguida procedia-se à aquisição do corpo rígido materializado pelas marcas refletoras existentes no dispositivo. Com o corpo rígido definido, é possível a criação de um sistema de eixos local (com o auxílio das marcas refletoras estratégicas previamente mencionadas) adequado à caracterização dos movimentos experienciados pelo dispositivo CECO, Figura 5.13.

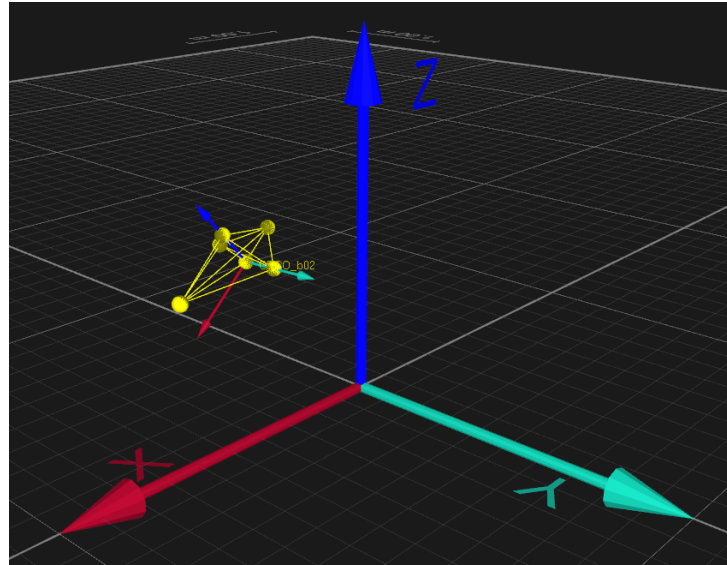


Figura 5.13 – Sistema de eixos global e sistema de eixo local do dispositivo (a amarelo).

De seguida procedia-se à calibração do sistema de aquisição da agitação marítima. A calibração das sondas de níveis hidrodinâmicos consiste em variar a sua profundidade de imersão na água (são considerados três níveis: um máximo, um mínimo e um zero) e registar as correspondentes diferenças de potencial. Inicialmente definia-se o nível de referência da sonda (o nível zero). De seguida, a sonda era elevada 16 cm relativamente ao nível zero (profundidade mínima) e esperava-se que a superfície livre da água estivesse completamente em repouso. Quando a água estava novamente calma, registava-se a diferença de potencial correspondente a esse nível. Voltava-se a repetir este último procedimento, para o ponto de imersão máxima, ou seja, a sonda era imersa 16 cm relativamente ao nível zero. Com essas três diferenças de potencial, associadas a um determinado deslocamento relativamente à posição de referência das sondas, o próprio *software* HR-DAQ determina a reta que traduz o melhor ajuste aos pares de pontos profundidade de imersão e diferença de potencial, Figura 5.14.

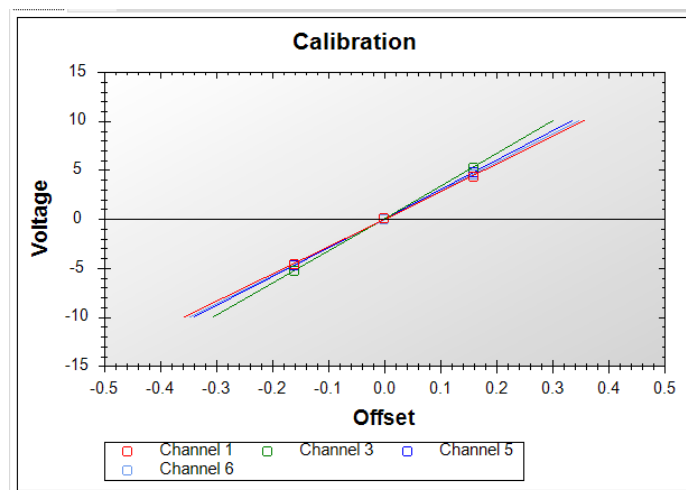


Figura 5.14 – Exemplo do resultado da calibração das sondas.

Na calibração procura-se que o coeficiente de correlação (R^2) seja o mais próximo possível da unidade, de forma a assegurar a qualidade dos dados registados, Figura 5.15. Quando a calibração é considerada válida, as sondas são novamente colocadas no seu nível de referência.

Name	Cal	Zero	R ²	95% CI
Channel 1	0.0349 m/V	0.026 V	0.99990	0.0002
Channel 3	0.0302 m/V	-0.045 V	0.99992	0.0002
Channel 5	0.0332 m/V	0.085 V	1.00000	0.0000
Channel 6	0.0346 m/V	-0.096 V	0.99999	0.0001

Figura 5.15 - Tabela com os diferentes fatores de correlação de uma calibração das quatro sondas.

Com o sistema de aquisição de agitação marítima previamente calibrado, durante os testes experimentais é possível registrar a elevação da superfície livre da água nos locais onde as sondas foram instaladas. A Figura 5.16 e a Figura 5.17 apresentam um exemplo dessas mesmas séries para agitação irregular e regular, respectivamente.

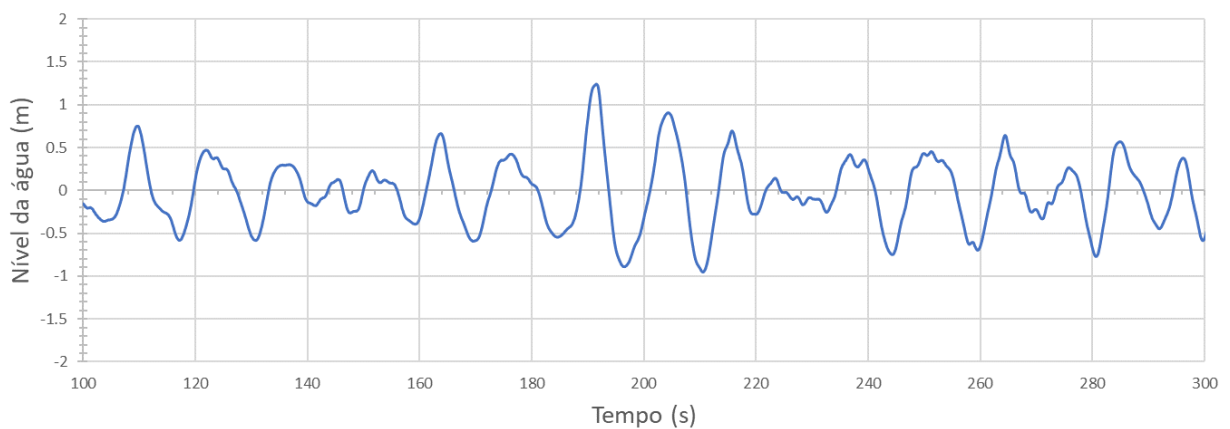


Figura 5.16 - Trecho de uma série temporal da elevação da superfície livre registada num teste com agitação irregular: $T_p = 13$ s; $H_s = 1.5$ m.

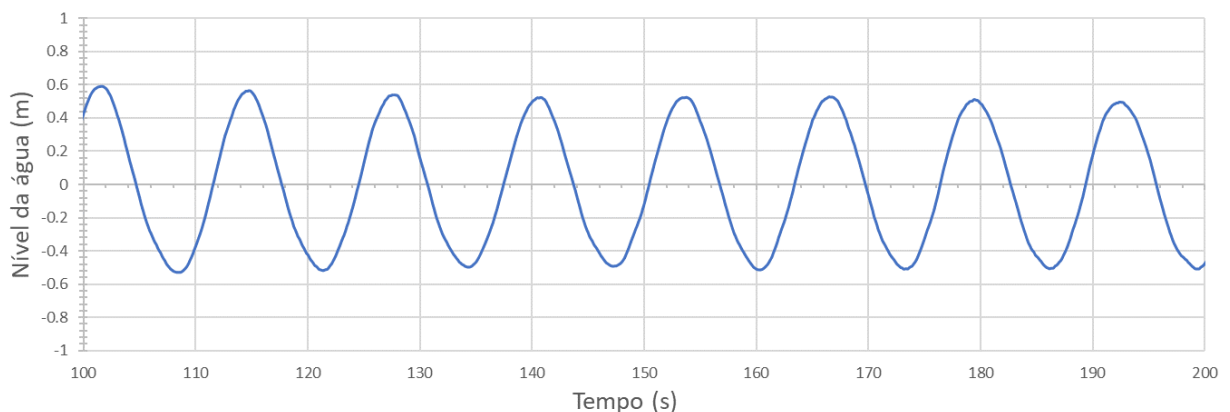


Figura 5.17 - Trecho de uma série temporal da elevação da superfície livre registada num teste com agitação regular: $T = 13$ s; $H = 1.0$ m.

O “ganho” do sistema de geração da agitação marítima foi ajustado com recurso a estas séries temporais e aos módulos de análise estatística e espectral do próprio software HR DAQ. Este ajuste consistia num processo iterativo onde se alterava o fator de ganho do sistema de geração até que a série temporal da elevação da superfície livre da água registada fosse coincidente com o estado de agitação pretendido.

Para além do processamento das séries temporais de elevação da superfície livre da água, o *software* HR DAQ permite obter os espectros de energia da agitação marítima gerada (densidade de energia em função da frequência), Figura 5.18. Para além da caracterização dos estados de agitação irregular gerados, estes espectros irão permitir determinar a potência da onda por metro de frente de onda, que é posteriormente utilizada na caracterização do desempenho do dispositivo CECO, *i.e.*, no cálculo da largura de captura relativa do dispositivo.

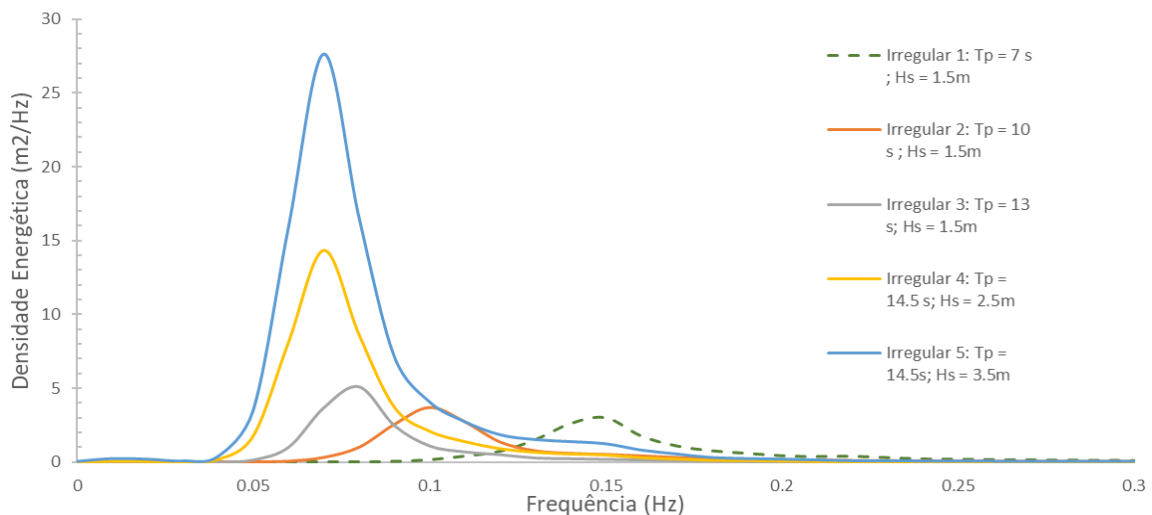


Figura 5.18 - Espectros de energia para diferentes estados de agitação irregular.

Após a conclusão de todos estes procedimentos iniciais eram iniciados os testes experimentais. Conforme referido anteriormente, o sistema de monitorização do PTO foi desenvolvido de forma a funcionar em simultâneo com o sistema de aquisição de movimentos – *Qualisys*. Assim, para cada um dos ensaios a realizar⁹, era iniciado o sistema de geração de ondas, seguidamente e em simultâneo, o sistema de monitorização do PTO, o sistema de aquisição de movimentos (que era feita automaticamente) e o sistema de aquisição de agitação marítima. Como a sincronização da aquisição da agitação marítima com a aquisição de movimentos e monitorização do PTO era feita manualmente, poderá ocorrer um pequeno desfasamento entre os valores dos mesmos.

5.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.5.1. INTRODUÇÃO

Finalizados os testes experimentais procedeu-se à análise dos resultados obtidos. A análise efetuada teve como objetivo estudar a influência de vários parâmetros no funcionamento do CECO, nomeadamente, das condições de agitação marítima, da inclinação do dispositivo e, também, do grau de amortecimento introduzido pelo sistema de reprodução do PTO.

Para que melhor se entendam as designações presentes ao longo deste capítulo, é importante identificar e clarificar a terminologia utilizada para designar cada um dos seis graus de liberdade de movimento do dispositivo, Figura 5.19. É importante referir que essas mesmas designações são referentes ao referencial local do dispositivo. O Quadro 5.5 sintetiza essas designações.

⁹ Com exceção dos testes de decaimento.

Quadro 5.5 - Movimentos do dispositivo segundo os seus 6 graus de liberdade.

Movimento	Direção	Designação
Translação	x	Avanço (<i>Surge</i>)
	y	Deriva (<i>Sway</i>)
	z	Arfagem (<i>Heave</i>)
Rotação	em torno de x	Balanço (<i>Roll</i>)
	em torno de y	Cabeceio (<i>Pitch</i>)
	em torno de z	Guinada (<i>Yaw</i>)

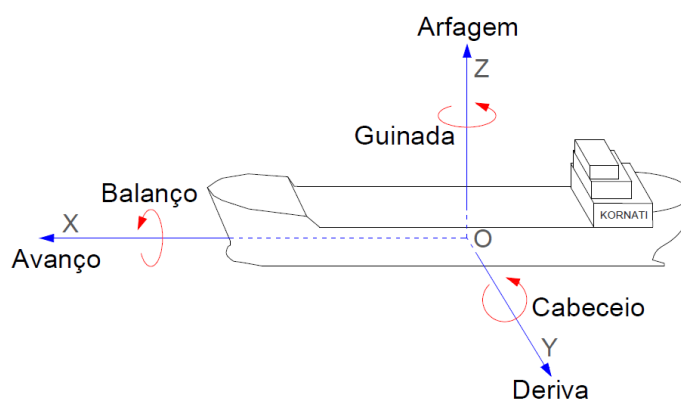


Figura 5.19 - Movimentos de um navio segundo os seus 6 graus de liberdade (adaptado de Santos, 2010).

5.5.2. ANÁLISE DOS MOVIMENTOS DO DISPOSITIVO CECO

A análise das séries temporais dos movimentos experimentados pelo dispositivo CECO, segundo cada um dos seis graus de liberdade, permite compreender o seu comportamento e verificar que o movimento principal é aquele que está associado à produção de energia, isto é, o movimento de avanço (translação segundo o eixo xx). Desta forma é também possível confirmar o correto posicionamento da origem do referencial e a respetiva orientação.

Como os MLMs do dispositivo acompanham a propagação da onda, é expectável que o seu movimento de avanço tenha um comportamento sinusoidal. O mesmo não se verifica para a agitação irregular, onde o movimento de avanço é também irregular. Esta análise permitiu ainda avaliar a eficácia com que o sistema usado para o posicionamento e guiamento dos tirantes desempenha o seu papel, nomeadamente na restrição e limitação dos movimentos secundários do CECO.

A Figura 5.20 apresenta um trecho da série temporal dos movimentos do dispositivo segundo os seus 6 graus de liberdade para um estado de agitação irregular. Na Figura 5.21 o trecho apresentado diz respeito a um estado de agitação regular.

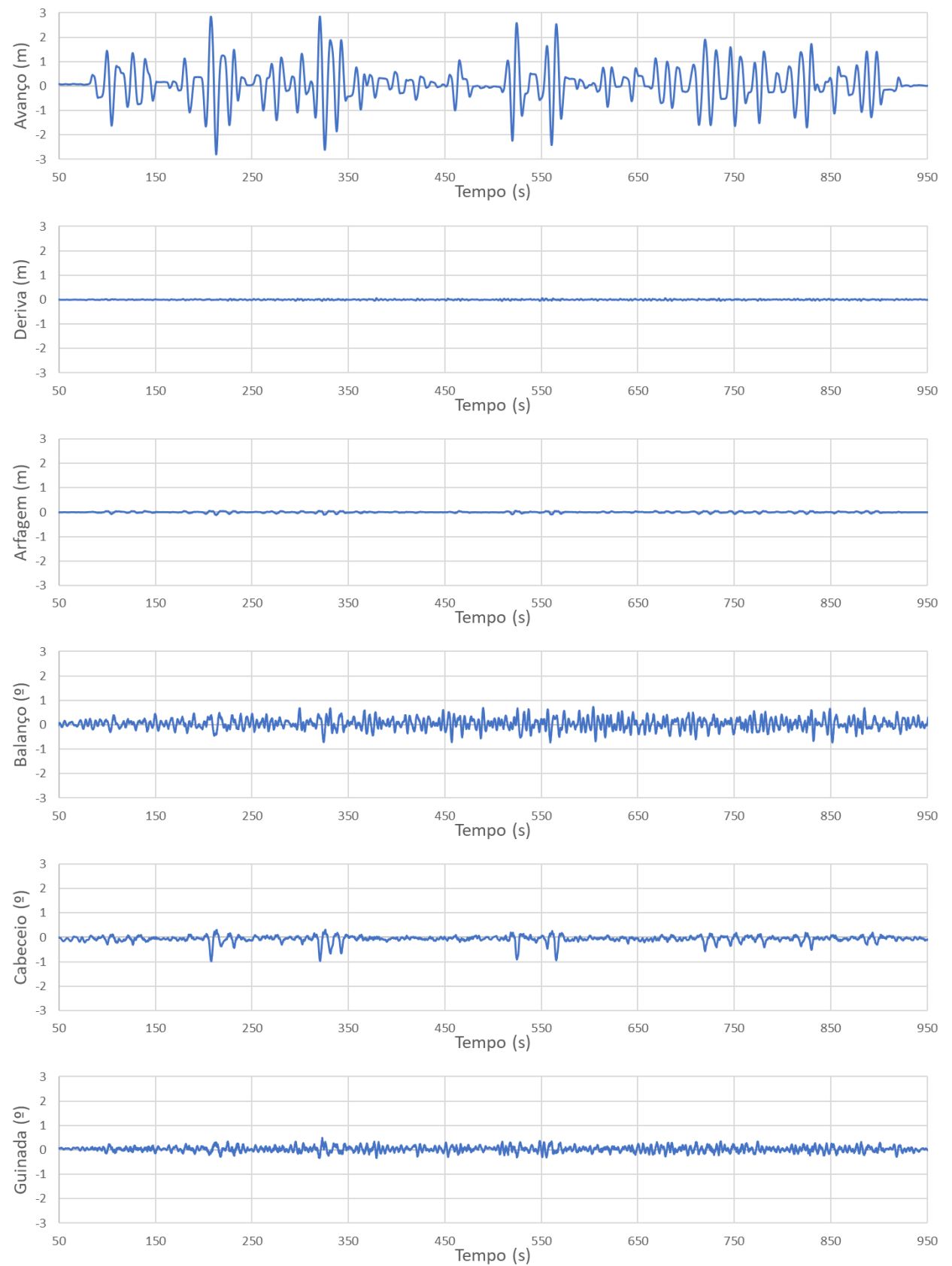


Figura 5.20 - Trecho da série temporal dos movimentos do dispositivo CECO num teste com agitação irregular (valores de protótipo): $R = 100 \text{ Ohms}$; $i=45^\circ$; $H = 1.5 \text{ m}$; $T = 13 \text{ s}$.

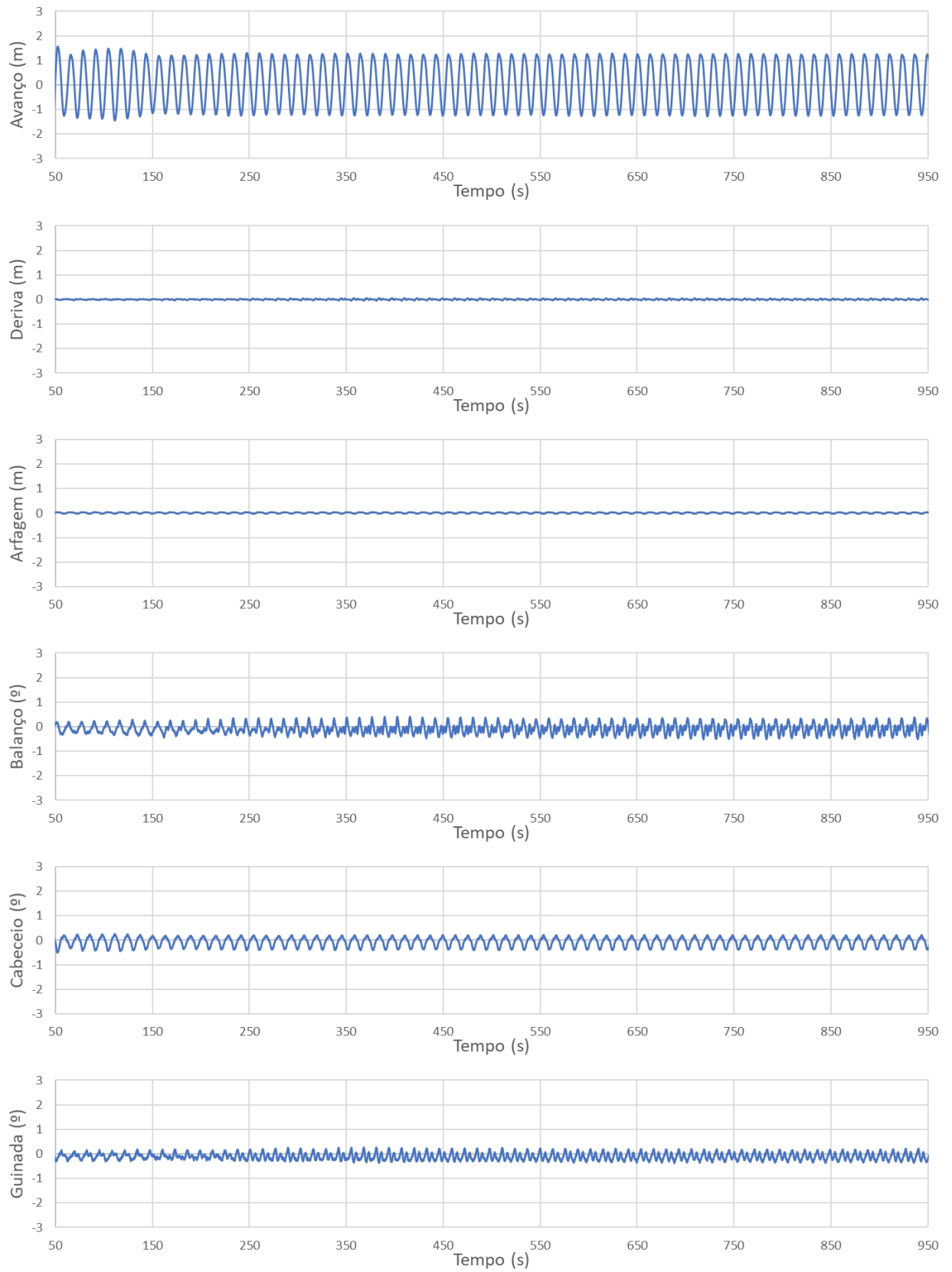


Figura 5.21 - Trecho da série temporal dos movimentos do dispositivo CECO num teste com agitação regular (valores de protótipo): $R = 100 \text{ Ohms}$; $i = 45^\circ$; $H = 1.0 \text{ m}$; $T = 13 \text{ s}$.

A análise das Figura 5.20 e Figura 5.21 permite confirmar que o movimento principal do CECO é o de avanço. Pode-se ainda concluir que a solução adotada para o sistema de guiamento dos tirantes é bastante eficaz comparativamente aos modelos anteriores, uma vez que os movimentos de deriva e de arfagem são praticamente nulos. As amplitudes dos movimentos de balanço, cabeceio e guinada são também significativamente inferiores às observadas nos modelos anteriores, especialmente quando se tem em consideração que geometria adotada implicou que os marcadores fossem aplicados na extremidade do elemento anelar estrutural. No entanto verificou-se que para amplitudes de onda elevadas (que exigiam maior curso dos tirantes), quando os MLMs se encontravam na cava da onda a força de impulsão exercida nos mesmos originava um momento de flexão nos tirantes que provocava picos de cabeceio. Estes momentos são indesejáveis, pois consistem em movimentos que não o da produção de energia (avanço). São também prejudiciais pois aumentam o atrito entre as bordas da polia e o tirante superior.

Apresenta-se, ainda, uma comparação entre a amplitude do movimento de avanço do dispositivo para os diferentes graus de amortecimento, para estados de agitação regular (Figura 5.22) e irregular (Figura 5.23).

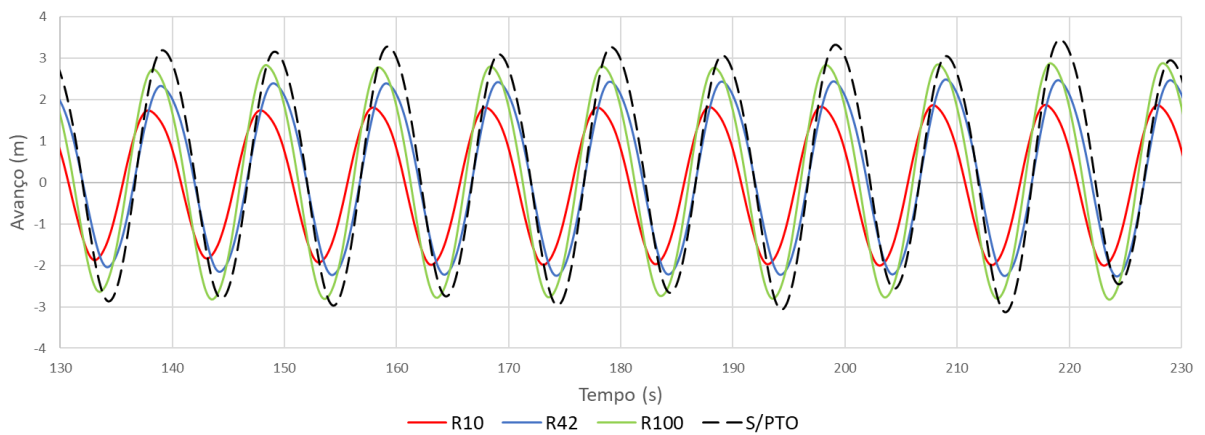


Figura 5.22 - Amplitude de avanço do dispositivo (valores de protótipo) para diferentes níveis de amortecimento do PTO e uma inclinação de 45° em testes realizados com agitação regular ($T = 10$ s e $H = 2$ m).

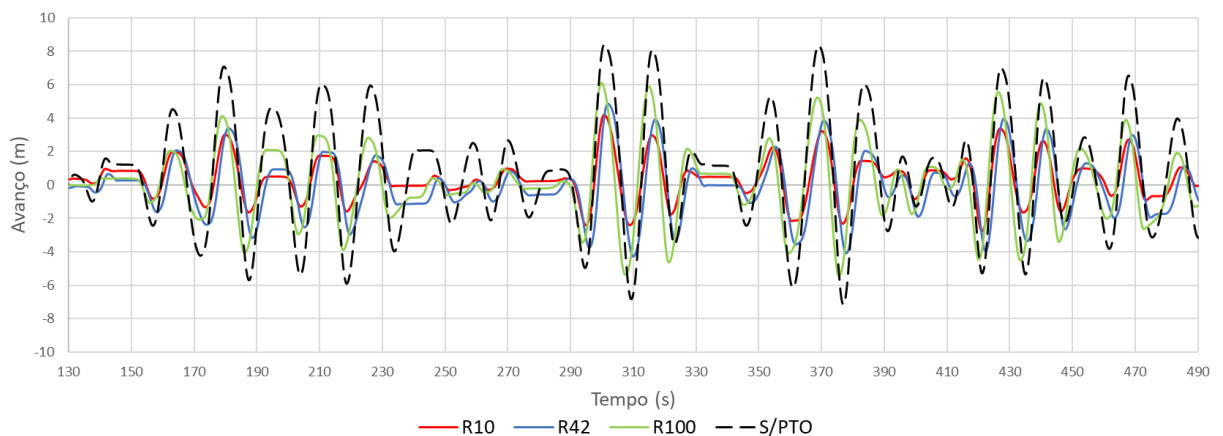


Figura 5.23 - Amplitude de avanço do dispositivo (valores de protótipo) para diferentes níveis de amortecimento do PTO e uma inclinação de 45° em testes realizados com agitação irregular ($T_p = 14.5$ s e $H_s = 2.5$ m).

A análise das Figura 5.22 e Figura 5.23 revela que a amplitude de avanço é tanto menor quanto maior for o nível de amortecimento. Esta situação justifica-se pelo facto de que quanto mais elevado é o nível de amortecimento (*i.e.*, menor for o valor da resistência externa), maior dificuldade o dispositivo terá para se movimentar, uma vez que o motor utilizado para simular o PTO estará mais próximo de trabalhar em curto-circuito (circuito fechado).

Foram também realizados testes de decaimento para todos os níveis de amortecimento associados a cada uma das inclinações do CECO testadas. Estes testes foram realizados inicialmente com o intuito de obter uma estimativa do período natural de oscilação amortecido do sistema. No entanto, os resultados obtidos a partir dos mesmos foram, regra geral, inconclusivos, uma vez que o sistema é muito amortecido, Figura 5.26.

Os testes de decaimento consistem em manualmente imergir e segurar a parte móvel do dispositivo até um determinado curso dos tirantes. De seguida liberta-se a parte móvel do dispositivo que, devido à força de impulsão da água nos MLMs, emerge. Utilizando o sistema de aquisição de movimentos *Qualisys* é possível analisar as oscilações que o corpo teve até que voltasse novamente à posição de equilíbrio, e assim estimar o período de ressonância do dispositivo.

Os testes de decaimento para o presente trabalho foram realizados para duas profundidades de imersão. A primeira onde a imersão correspondia a metade do curso dos tirantes, e a segunda onde se imergia os MLMs o mais possível (curso total dos tirantes). A Figura 5.24 apresenta o exemplo de uma série temporal de um teste de decaimento.

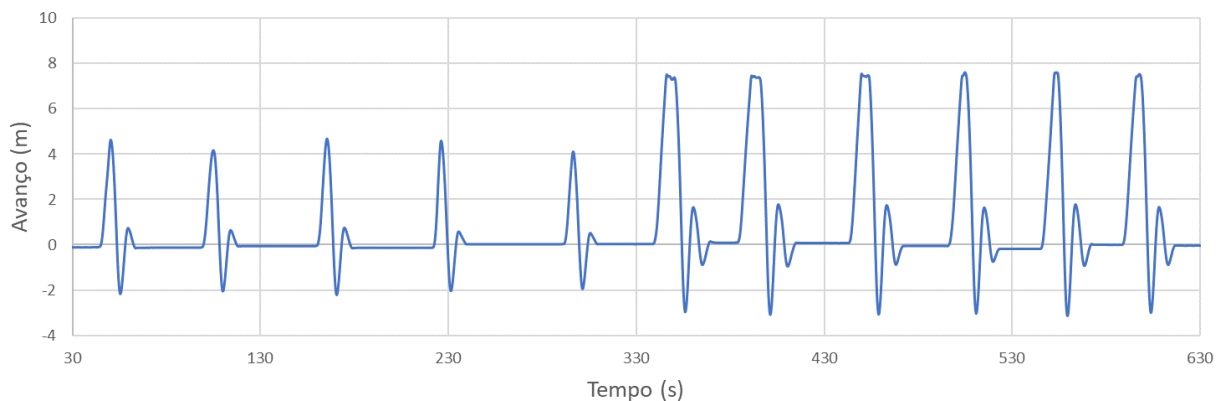


Figura 5.24 - Exemplo de uma série temporal de um teste de decaimento ($i = 45^\circ$; $R = 100 \text{ Ohms}$).

Como o ensaio foi realizado manualmente, repetiu-se o mesmo cinco vezes para cada excursão do tirante utilizada de forma a diminuir a incerteza associada aos resultados finais.

A realização dos testes de decaimento para diferentes cursos de tirante pretendia analisar se este teria influência no período natural de oscilação determinado nestes ensaios. O período de natural de oscilação é determinado através do tempo que ocorre entre dois máximos relativos do movimento de avanço das oscilações do teste de decaimento. A Figura 5.25 apresenta a comparação da série temporal de um teste de decaimento para os dois cursos de tirante considerados.

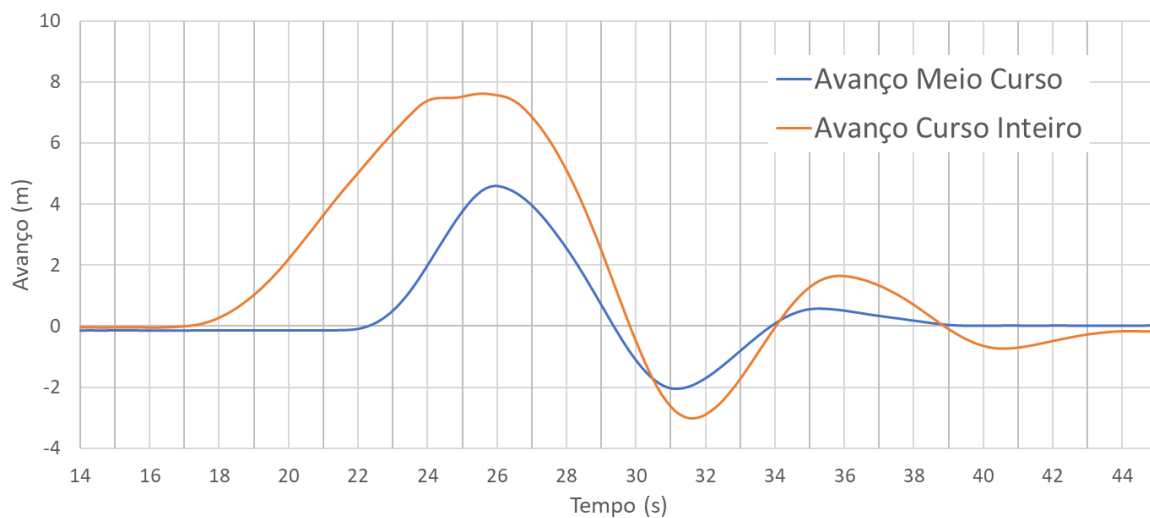


Figura 5.25 – Comparação da série temporal de um teste de decaimento para os dois cursos de tirante considerados ($i = 45^\circ$; $R = 100$ Ohms).

Pela análise da Figura 5.25 percebe-se que existe uma pequena diferença entre os períodos naturais de oscilação para os dois cursos considerados. Pela análise dos resultados finais, o período natural de oscilação estimado utilizando o curso total dos tirantes é superior ao estimado utilizando apenas meio curso¹⁰. No entanto deve-se ter em conta a incapacidade da reprodução exata das condições iniciais de cada um dos ensaios.

Os períodos de oscilação natural obtidos a partir dos testes de decaimento podem não ser os mais corretos uma vez que o sistema é criticamente amortecido (como é verificável pela análise da Figura 5.26). Sendo o sistema demasiado amortecido, torna-se difícil determinar com exatidão qual o período natural de oscilação para cada uma das inclinações e resistência externas consideradas.

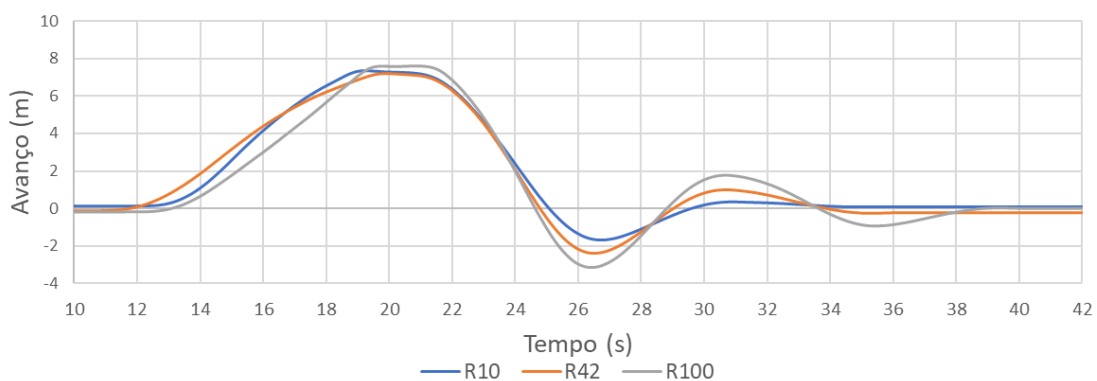


Figura 5.26 - Exemplo de séries temporais de testes de decaimento para uma inclinação do CECO de 45° .

¹⁰ Valores na ordem dos 2 segundos

5.5.3. POTÊNCIA ABSORVIDA

5.5.3.1. Introdução

Neste subcapítulo pretende-se fazer uma análise da potência absorvida e da energia produzida pelo dispositivo CECO. Devido ao tempo limitado para a realização do presente trabalho, a análise foi focada na potência resultante do método direto, isto é, a obtida através da análise do *output* do sistema usado na monitorização do PTO, uma vez que esta é uma estimativa mais conservativa e realista da mesma. Foi assim calculada a potência média absorvida pelo dispositivo CECO a partir dos valores da diferença de potenciais instantâneos medidos nos polos do gerador.

5.5.3.2. Potência teórica da onda

De forma a compreender a eficiência do dispositivo, torna-se evidente a necessidade de uma análise à potência disponível nos diversos estados de agitação marítima. Assim, a primeira análise consiste na avaliação da potência teórica de uma onda.

A potência teórica de uma onda é determinada pela seguinte expressão,

$$P = \rho g \int_0^{\infty} C_g(f) \cdot S(f) df \quad (5.8)$$

onde ρ representa a massa volúmica da água do mar em kg/m^3 , g a aceleração gravítica em m/s^2 , C_g a velocidade de grupo das ondas em m/s e $S(f)$ a densidade de energia em função da frequência, f .

A velocidade de grupo das ondas, C_g , é dada por:

$$C_g = \frac{C}{2} \left(1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh(4\pi d/L)} \right) \quad (5.9)$$

onde C representa a celeridade da onda à profundidade de estudo, d , e pode ser determinada pelas seguintes expressões:

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L}} \quad (5.10)$$

ou

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (5.11)$$

Tendo em atenção que,

$$C = \frac{L}{T} \quad (5.12)$$

onde L representa o comprimento de onda e T o período de onda, é possível definir facilmente a relação de dispersão, que relaciona o comprimento de onda com o período de onda,

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (5.13)$$

A potência teórica da onda, por metro de frente de onda, para cada um dos estados de agitação¹¹ marítima estudados, foi calculada com base nas expressões apresentadas. O Quadro 5.6 exemplifica as potências teóricas da onda calculadas para os ensaios realizados com uma inclinação do dispositivo de 45° para estados de agitação irregular.

Quadro 5.6 - Potência teórica da onda para os estados de agitação irregulares usados nos ensaios realizados com a inclinação 45°.

Estado de Agitação	H _s (m)	T _p (s)	Resistência (Ω)	Potência Teórica da Onda (kW/m)
IRREG1	1.5	7.0	10	8.44
			100	8.63
IRREG2	1.5	10.0	10	12.70
			100	12.41
IRREG3	1.5	13.0	10	16.39
			100	16.26
IRREG4	2.5	14.5	10	46.77
			100	46.94
IRREG5	3.5	14.5	10	91.26
			100	91.21

Como se pode verificar pela análise do Quadro 5.6, a potência teórica da onda disponível aumenta com o período e com a altura de onda.

5.5.3.3. Potência Absorvida – Método Direto

Conforme referido anteriormente, a determinação da potência absorvida pelo dispositivo CECO poderá ser feita de duas formas distinta. Uma delas, designada “método indireto”, tira partido das velocidades registadas pelo sistema de aquisição de movimentos e da caracterização prévia do sistema de reprodução do PTO. Na outra forma, designada “método direto”, são analisados os valores da diferença de potencial instantânea registados pelo sistema de monitorização do PTO. A Figura 5.27 e Figura 5.28 apresentam um exemplo de uma série temporal da potência instantânea absorvida pelo dispositivo numa condição de agitação regular e irregular respetivamente.

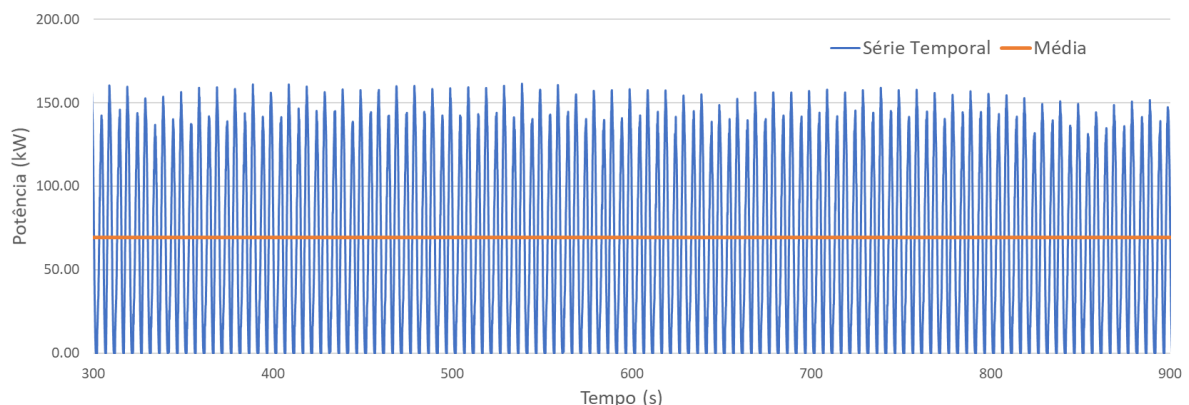


Figura 5.27 - Exemplo de uma série temporal da potência instantânea absorvida num teste realizado com agitação regular: T = 10.0 s; H = 1.5 m; R = 100 Ohms (valores no protótipo).

¹¹ Resultados são apresentados nos anexos

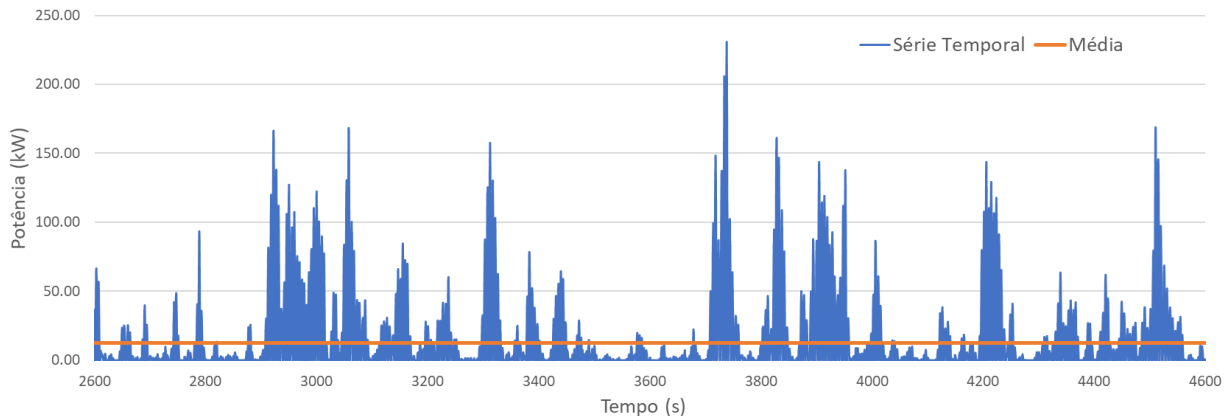


Figura 5.28 - Exemplo de uma série temporal da potência instantânea absorvida num teste realizado com agitação irregular: $T_p = 10.0$ s; $H_s = 1.5$ m; $R = 100$ Ohms (valores no protótipo).

O sistema de monitorização do PTO era iniciado com um atraso de apenas 6 s relativamente ao início da geração de agitação marítima. Como o intervalo de atraso é relativamente curto, isto implica que no instante em que se inicia a aquisição dos valores da diferença de potencial, o CECO ainda esteja parado e o gerador elétrico sem produzir energia. Por outro lado, há ainda uma fase inicial em que a amplitude do movimento do CECO aumenta progressivamente até aos valores de referência para as condições de teste. Assim, de forma a obter uma estimativa mais realista, na análise das séries temporais da potência absorvida para estados de agitação regular, foram apenas considerados os valores da potência a partir do momento em que o sistema estabilizava. A Figura 5.29 representa o referido.

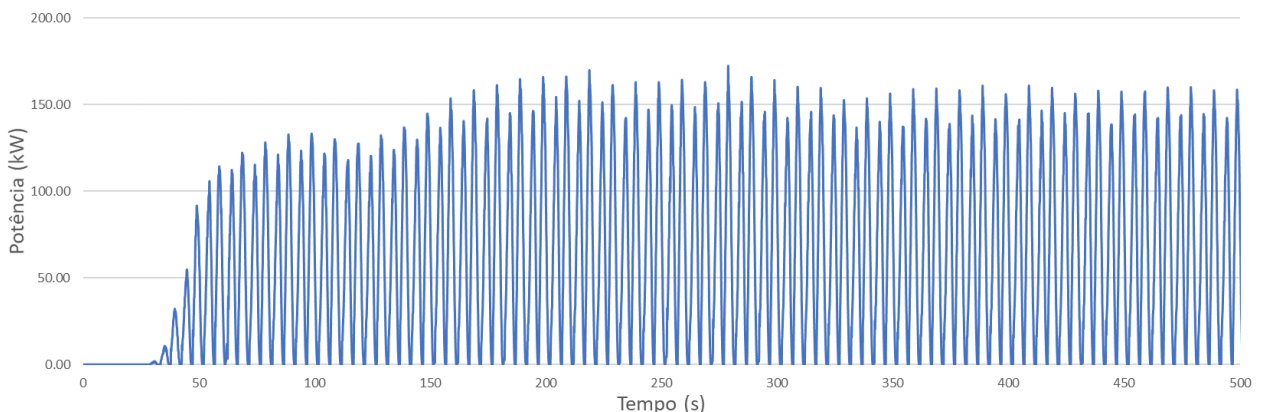


Figura 5.29 - Exemplo do desenvolvimento inicial de uma série temporal da potência instantânea absorvida num teste realizado com agitação regular ($T = 10.0$ s; $H = 1.5$ m; $R = 100$ Ohms (valores no protótipo)).

Foram assim calculados os valores da potência útil¹², isto é, a potência que foi efetivamente debitada pelo dispositivo CECO, depois de subtraídas todas as perdas associadas ao processo de conversão da energia das ondas em eletricidade. Conforme referido anteriormente, essa potência pode ser determinada a partir da equação (5.6).

No entanto, à escala do protótipo, os sistemas PTO permitem, normalmente, obter rendimentos muito mais elevados que no modelo físico. Este aumento na eficiência do sistema PTO reflete-se numa menor potência dissipada no processo de conversão da energia mecânica para energia elétrica. Torna-se assim

¹² Dissipada na resistência em carga

importante fazer uma estimativa da potência total (*i.e.*, a soma da potência dissipada internamente no gerador com a potência útil). Embora esta análise tenha associada um nível de incerteza considerável, é importante pois permite obter uma estimativa mais realista daquilo que seria a produção elétrica numa aplicação real do dispositivo CECO.

Primeiramente, para a estimativa da potência dissipada no sistema, é necessário calcular a corrente que passa no circuito elétrico. Para tal foi utilizada a lei de Ohm,

$$V = R_{carga} \cdot I \quad (5.14)$$

onde I representa a intensidade de corrente que passa no circuito, em Amperes, V a diferença de potencial, em Volts, e R_{carga} a resistência de carga, em Ohms.

No circuito elétrico utilizado as resistências instaladas estão em série, logo a intensidade de corrente é igual em todos os pontos do circuito. Assim, a potência dissipada no gerador pode ser determinada através de,

$$P_{dissipada} = (R_{interna} + R_{cabo}) \cdot I^2 \quad (5.15)$$

onde, no presente caso, a $R_{interna}$ representa a resistência interna do próprio motor e R_{cabo} a resistência do cabo de ligação do motor ao sistema de monitorização do PTO.

A resistência do motor e do cabo de ligação foi medida utilizando um multímetro, e tomam os valores de $29.2 \, \Omega$ e $3.2 \, \Omega$, respetivamente.

Com a potência dissipada calculada, torna-se possível estimar a potência total produzida através de,

$$P_{total} = P_{dissipada} + P_{útil} \quad (5.16)$$

A eficiência de um gerador nunca é total. Segundo Summers (1971), um conversor de energia mecânica para energia elétrica tem uma eficiência na ordem dos 95%. Assim, de forma a calcular de uma forma mais realista e conservativa da potência total gerado pelo dispositivo, considerou-se que o gerador teria uma eficiência de 80%. Esta estimativa tem em consideração a aplicação do dispositivo no meio marítimo, que possivelmente irá implicar uma série de proteções extras e vedantes.

Quadro 5.7 – Potências médias absorvidas pelo dispositivo para os diferentes estados de agitação irregular para uma inclinação de 30° do dispositivo.

Estado de Agitação	Resistência (Hz)	Potência útil (kW)	Potência dissipada (kW)	Potência Total (kW)	Diferença (%)
IRREG1 $T_p = 7 \text{ s}; H_s = 1.5 \text{ m}$	10	0.78	2.41	2.71	71%
	42	1.08	0.78	1.70	37%
	100	-	-	-	-
IRREG2 $T_p = 10 \text{ s}; H_s = 1.5 \text{ m}$	10	0.19	0.61	0.68	72%
	42	0.34	0.26	0.55	38%
	100	0.32	0.10	0.40	20%
IRREG3 $T_p = 13 \text{ s}; H_s = 1.5 \text{ m}$	10	0.14	0.43	0.49	71%
	42	0.85	0.61	1.34	37%
	100	0.53	0.16	0.66	20%

Quadro 5.8 - Potências médias absorvidas pelo dispositivo para os diferentes estados de agitação irregular para uma inclinação de 30° do dispositivo (continuação).

Estado de Agitação	Resistência (Hz)	Potência útil (kW)	Potência dissipada (kW)	Potência Total (kW)	Diferença (%)
IRREG4 $T_p = 14.5 \text{ s}$; $H_s = 2.5 \text{ m}$	10	5.93	18.31	20.58	71%
	42	12.35	8.89	19.46	37%
	100	16.65	5.16	20.78	20%
IRREG5 $T_p = 14.5 \text{ s}$; $H_s = 3.5 \text{ m}$	10	24.13	74.50	83.73	71%
	42	31.84	22.92	50.18	37%
	100	18.54	5.75	23.14	20%

Quadro 5.9 - Potências médias absorvidas pelo dispositivo para os diferentes estados de agitação regular para uma inclinação de 30° do dispositivo.

Estado de Agitação	Resistência (Hz)	Potência média (kW)	Potência dissipada (kW)	Potência Total (kW)	Diferença (%)
REG1 $T = 7 \text{ s}$; $H = 1.0 \text{ m}$	10	1.83	5.65	6.26	71%
	42	0.40	0.29	0.61	34%
	100	2.42	0.75	2.91	17%
REG2 $T = 9.5 \text{ s}$; $H = 1.0 \text{ m}$	10	0.00	0.00	0.00	0%
	42	0.00	0.00	0.00	0%
	100	0.00	0.00	0.00	0%
REG3 $T = 10 \text{ s}$; $H = 1.0 \text{ m}$	10	0.97	3.03	3.36	71%
	42	1.98	1.47	3.08	36%
	100	1.97	0.61	2.37	17%
REG4 $T = 10 \text{ s}$; $H = 1.5 \text{ m}$	10	4.70	14.68	16.45	71%
	42	8.06	5.98	12.85	37%
	100	7.69	2.38	9.59	20%
REG5 $T = 10 \text{ s}$; $H = 2.0 \text{ m}$	10	11.46	36.87	40.88	72%
	42	18.68	14.24	29.86	37%
	100	33.12	10.69	41.56	20%
REG6 $T = 10.5 \text{ s}$; $H = 1.0 \text{ m}$	10	0.16	0.50	0.56	71%
	42	0.47	0.35	0.75	37%
	100	0.77	0.24	0.96	20%
REG7 $T = 13 \text{ s}$; $H = 1.0 \text{ m}$	10	0.00	0.00	0.00	0%
	42	0.00	0.00	0.00	0%
	100	0.06	0.02	0.07	20%
REG8 $T = 14.5 \text{ s}$; $H = 1.0 \text{ m}$	10	0.00	0.00	0.00	0%
	42	0.00	0.00	0.00	0%
	100	0.00	0.00	0.00	0%
REG9 $T = 14.5 \text{ s}$; $H = 2.0 \text{ m}$	10	3.83	12.71	14.09	73%
	42	10.04	7.98	16.72	40%
	100	47.10	15.38	59.79	21%
REG11 $T = 11 \text{ s}$; $H = 1.5 \text{ m}$	10	0.00	0.00	0.00	0%
	42	0.60	0.45	0.96	37%
	100	3.84	1.19	4.79	20%

Quadro 5.10 - Potências médias absorvidas pelo dispositivo para os diferentes estados de agitação regular para uma inclinação de 30° do dispositivo (continuação).

Estado de Agitação	Resistência (Hz)	Potência média (kW)	Potência dissipada (kW)	Potência Total (kW)	Diferença (%)
REG12 T = 11 s ; H = 2.0 m	10	4.14	12.93	14.49	71%
	42	9.12	6.77	14.54	37%
	100	23.30	7.21	29.07	20%
REG14 T = 13 s ; H = 1.5 m	10	0.00	0.00	0.00	0%
	42	0.00	0.00	0.00	0%
	100	0.00	0.00	0.00	0%

Quadro 5.11 - Potências médias absorvidas pelo dispositivo para os diferentes estados de agitação irregular para uma inclinação de 45° do dispositivo.

Estado de Agitação	Resistênci a (Hz)	Potência média (kW)	Potência dissipada (kW)	Potência Total (kW)	Diferença (%)
IRREG1 T _p = 7 s ; H _s = 1.5 m	10	3.31	10.70	11.87	72%
	100	6.60	2.14	8.34	21%
IRREG2 T _p = 10 s ; H _s = 1.5 m	10	5.01	16.17	17.92	72%
	100	12.81	4.13	16.07	20%
IRREG3 T _p = 13 s ; H _s = 1.5 m	10	2.57	8.24	9.14	72%
	100	4.58	1.49	5.78	21%
IRREG4 T _p = 14.5 s ; H _s = 2.5 m	10	9.17	29.45	32.64	72%
	100	15.92	5.11	19.85	20%
IRREG5 T _p = 14.5 s ; H _s = 3.5 m	10	22.36	71.74	79.53	72%
	100	42.10	13.55	52.65	20%

Quadro 5.12 - Potências médias absorvidas pelo dispositivo para os diferentes estados de agitação regular para uma inclinação de 45° do dispositivo.

Estado de Agitação	Resistência (Hz)	Potência média (kW)	Potência dissipada (kW)	Potência Total (kW)	Diferença (%)
REG1 T = 7 s ; H = 1.0 m	10	7.38	23.30	25.83	71%
	100	18.04	5.73	22.26	19%
REG2 T = 9.5 s ; H = 1.0 m	10	2.15	7.09	7.86	73%
	100	12.07	4.02	15.61	23%
REG3 T = 10 s ; H = 1.0 m	10	6.17	19.79	21.94	72%
	100	26.79	8.63	33.54	20%
REG4 T = 10 s ; H = 1.5 m	10	20.54	65.84	72.99	72%
	100	69.74	22.53	87.57	20%

Quadro 5.13 - Potências médias absorvidas pelo dispositivo para os diferentes estados de agitação regular para uma inclinação de 45° do dispositivo (continuação).

Estado de Agitação	Resistência (Hz)	Potência média (kW)	Potência dissipada (kW)	Potência Total (kW)	Diferença (%)
REG5 T = 10 s ; H = 2.0 m	10	36.38	117.27	130.01	72%
	100	116.19	38.25	148.66	22%
REG6 T = 10.5 s ; H = 1.0 m	10	-	-	--	-
	100	-	-	-	-
REG7 T = 13 s ; H = 1.0 m	10	-	-	-	-
	100	-	-	-	-
REG8 T = 14.5 s ; H = 1.0 m	10	-	-	-	-
	100	-	-	-	-
REG9 T = 14.5 s ; H = 2.0 m	10	3.61	11.89	13.18	73%
	100	6.81	2.22	8.61	21%

Pela análise dos Quadros 5.7 a 5.8, é possível verificar que para a inclinação de 30°, a condição mais vantajosa em termos de potência total debitada, corresponde a um estado de agitação irregular com um período de pico de 14.5 s e uma altura de onda significativa de 3.5 m, associada à resistência de 10 Ω . Para a inclinação de 45°, a condição mais vantajosa corresponde a um estado de agitação regular com um período de onda de 10 s e uma altura de onda de 2 m, associado à resistência de 100 Ω (Quadros 5.9 a 5.10).

No entanto, os valores apresentados têm por base a estimativa da potência total absorvida que poderá não corresponder aos valores reais. Se por sua vez se analisarem os valores da potência que efetivamente foi debitada pelo sistema¹³, pode-se concluir que a condição mais vantajosa para a inclinação de 30° passa a ser um estado de agitação regular com período e altura de onda de 14.5 s e 2 m, respetivamente. Para a inclinação de 45°, a condição mais vantajosa em termos de potência útil é a mesma que foi referida anteriormente para a potência total.

É também possível concluir, tal como seria de esperar, que a diferença entre a potência total e a potência útil depende da resistência externa colocada no sistema. Verificou-se uma diferença média de 72%, 37% e 20% para as resistências de 100 Ω , 42 Ω e 10 Ω , respetivamente.

Nesta análise não foram considerados os valores referentes às condições REG10, REG13 e REG15 para uma inclinação do dispositivo de 30°, pois as mesmas não tiveram qualquer tipo de movimento por parte do CECO pois a solicitação das ondas não era suficiente para vencer o atrito interno do dispositivo.

Com estes valores é possível concluir que regra geral, a potência média absorvida aumenta significativamente com a resistência externa. No entanto, para a inclinação do dispositivo de 30°, verificou-se a existência de alguns casos onde a potência média absorvida pelo modelo é superior para a resistência intermédia (42 Ω). As Figura 5.30 e Figura 5.31 apresentam uma comparação entre a potência média útil absorvida pelo dispositivo para as resistências externas estudadas em cada estado de agitação.

¹³ Potência útil

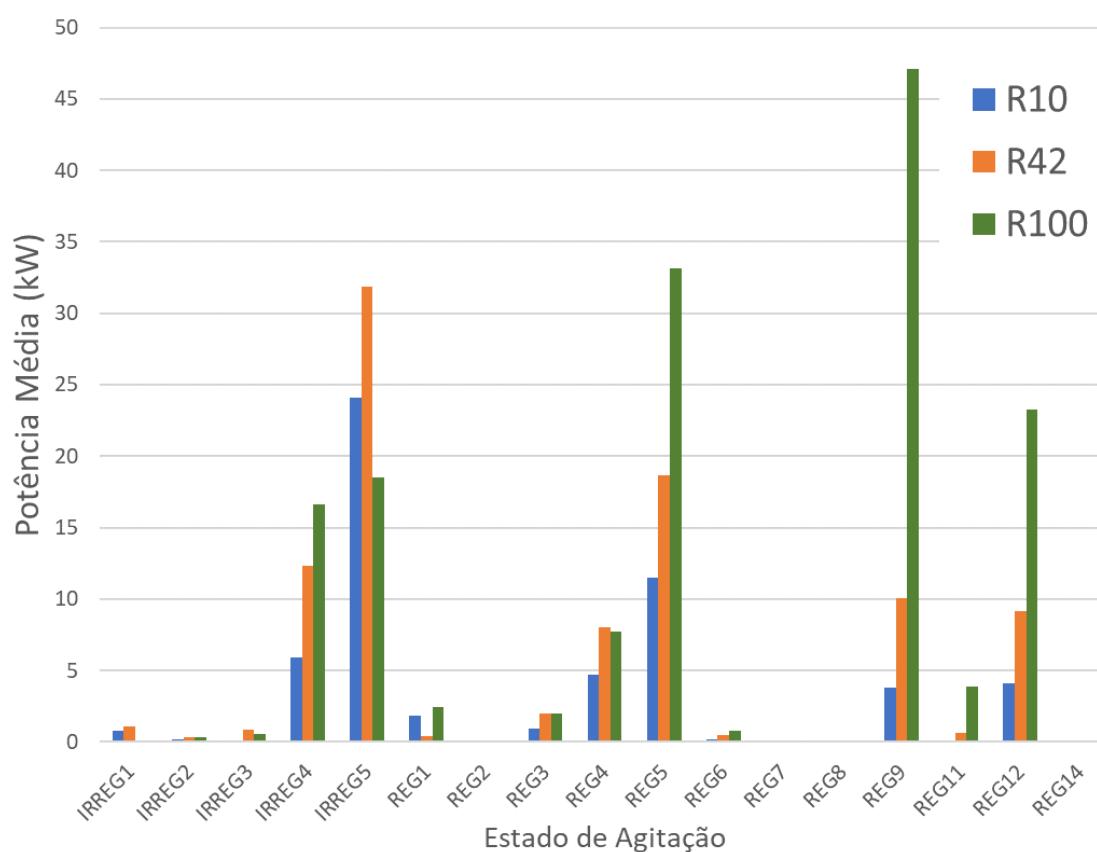


Figura 5.30 - Comparação da potência média útil absorvida pelo dispositivo para a inclinação de 30°.

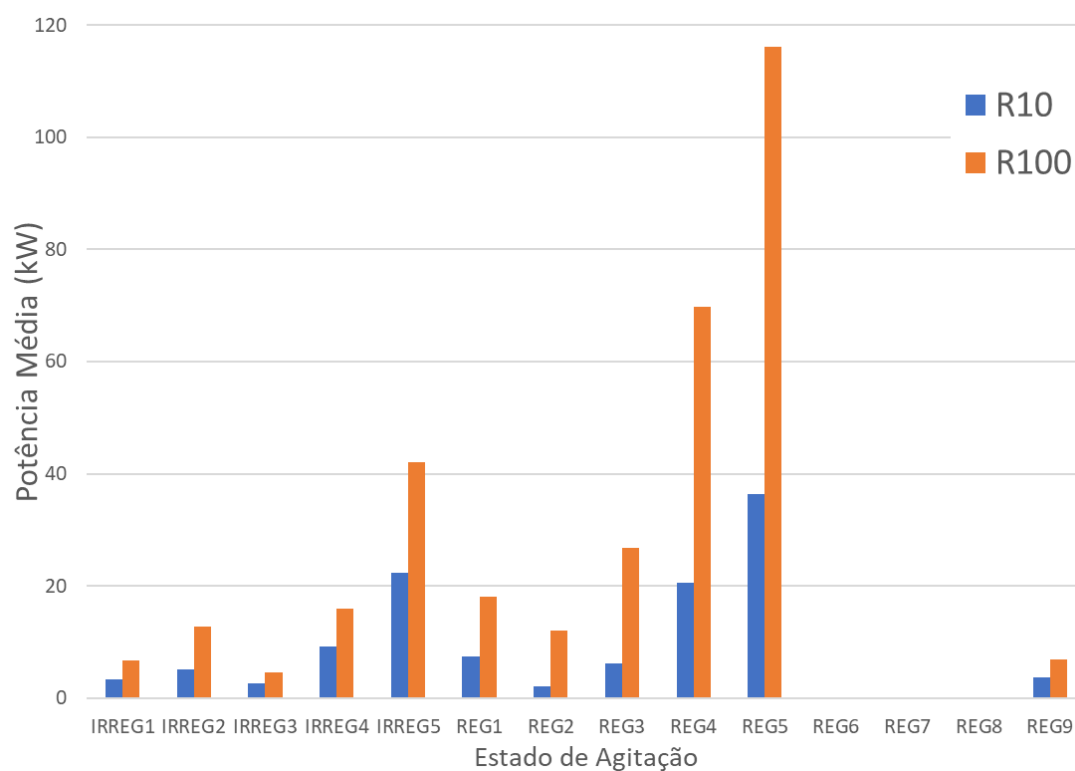


Figura 5.31 - Comparação da potência média útil absorvida pelo dispositivo para a inclinação de 45°.

É ainda possível concluir pela análise das Figura 5.30 e Figura 5.31 que a potência média absorvida pelo dispositivo foi significativamente superior para a inclinação de 45°(com exceção do estado de agitação REG9 que foi consideravelmente superior na inclinação 30°).

Com esta análise foi ainda possível concluir que, como seria de esperar, a altura e período de onda influenciam em muito a potência absorvida pelo dispositivo. Os estados de agitação com maior potência útil absorvida foram os estados IRREG5 ($T_p = 14.5$ s; $H_s = 3.5$ m), REG5 ($T = 10.0$ s; $H = 2$ m) e REG9 ($T = 14.5$ s; $H = 2$ m). Em geral, a potência média absorvida aumentou com o período e amplitude de onda.

5.5.3.4. Potência Absorvida – Método Indireto

Embora tenha sido planeado inicialmente a comparação entre os valores da potência absorvida obtidos pelos métodos direto e indireto, tal não foi possível devido ao tempo limitado para a realização deste trabalho. Deste modo, optou-se pela realização de uma análise mais aprofundada com base nos valores obtidos pelo método direto, uma vez que representa uma estimativa mais conservativa, e possivelmente mais realista, da potência absorvida, embora não se tenha colocado totalmente de parte a realização da análise dos resultados pelo método indireto. A análise da potência absorvida pelo CECO por via indireta, uma vez que está a “montante” das perdas que poderão ocorrer durante a conversão da energia mecânica em energia elétrica, deveria resultar em valores superiores aos obtidos pelo método direto. Assim, para demonstrar o procedimento a seguir no cálculo da potência absorvida pelo método indireto, foi realizada esta análise para alguns casos específicos, de forma a permitir uma comparação entre os dois métodos.

No cálculo da potência absorvida pelo método indireto foi utilizado o procedimento descrito na Secção 5.3.2. O Sistema de aquisição de movimentos *Qualisys*, permite a exportação de um ficheiro “.tsv” com os valores da posição do corpo rígido segundo os seus seis graus de liberdade de movimento. No entanto, para o cálculo da potência absorvida, é necessário ter as séries temporais da velocidade do corpo segundo o eixo dos xx (movimento de avanço). Embora o *Qualisys* não forneça esses mesmos valores diretamente, é possível obtê-los indiretamente a partir de,

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} \quad (5.17)$$

onde $\dot{x}$ representa a velocidade do CECO segundo o eixo dos xx .

Assim, foi possível obter a velocidade do movimento de avanço do corpo rígido derivando a posição do mesmo em ordem ao tempo. A Figura 5.32 representa um exemplo de uma série temporal do movimento de avanço e da correspondente velocidade de avanço.

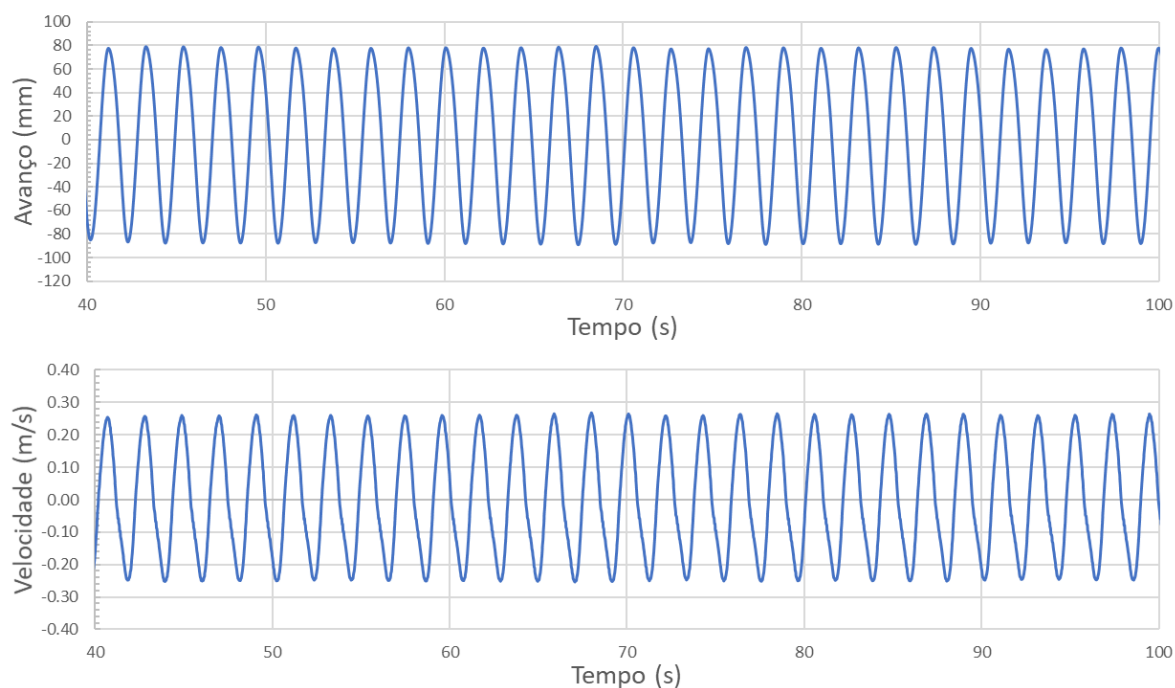


Figura 5.32 - Série temporal do movimento de avanço (em cima) e da velocidade de avanço (em baixo) do dispositivo CECO para uma inclinação de 45° e para o estado de agitação REG6 (valores no modelo).

O movimento oscilatório, característico do funcionamento do dispositivo CECO, implica uma constante mudança no sentido da velocidade. Assim, de forma a ser possível aplicar as expressões que permitem o cálculo da força de amortecimento do gerador (Quadro 5.4), foi necessário usar o módulo dos valores da velocidade de avanço. A Figura 5.33 apresenta, como exemplo, um trecho de uma série temporal da força de amortecimento e da potência absorvida pelo CECO.

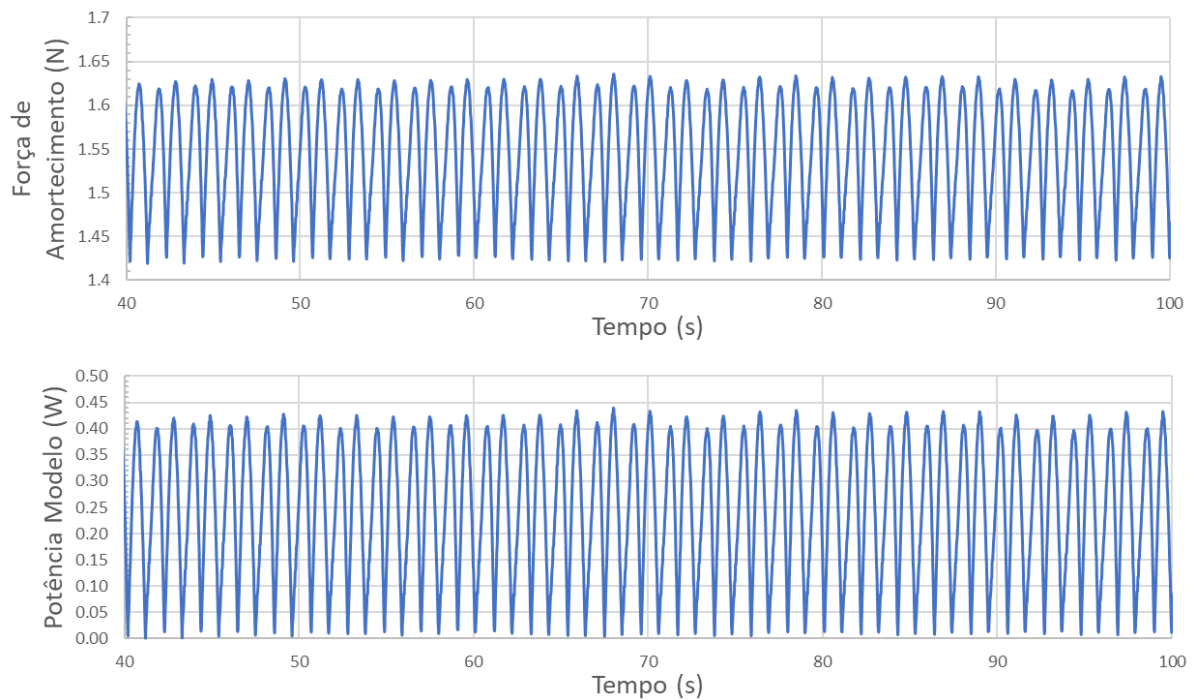


Figura 5.33 - Série temporal da força de amortecimento (em cima) e da potência absorvida (em baixo) pelo dispositivo CECO para uma inclinação de 45° e para o estado de agitação REG6 (valores no modelo).

O Quadro 5.14 sintetiza os resultados obtidos para os casos analisados pelos dois métodos de cálculo da potência absorvida pelo dispositivo CECO.

Quadro 5.14 - Potências obtidas pelos dois métodos para estados de agitação regular e uma inclinação do dispositivo CECO igual 45° .

Estado de Agitação	Resistência (Ω)	Potência Média (kW) Indireta	Potência Média (kW) Direta	Diferença (%)
REG1 T = 7 s ; H = 1.0 m	10	58.57	7.38	87%
	100	20.94	18.04	14%
REG2 T = 9.5 s ; H = 1.0 m	10	23.08	2.15	91%
	100	16.82	12.07	28%
REG3 T = 10 s ; H = 1.0 m	10	51.06	6.17	88%
	100	26.07	26.79	-3%
REG4 T = 10 s ; H = 1.5 m	10	124	20.54	83%
	100	44.98	69.74	-55%
REG5 T = 10 s ; H = 2.0 m	10	192.57	36.38	81%
	100	63.68	116.19	-82%
REG6 T = 10.5 s ; H = 1.0 m	10	83.01	*	
	100	18.22		
* Erro na medição dos valores				

Quadro 5.15 - Potências obtidas pelos dois métodos para estados de agitação regular e uma inclinação do dispositivo CECO igual 45° (continuação).

Estado de Agitação	Resistência (Ω)	Potência Média (kW) Indireta	Potência Média (kW) Direta	Diferença (%)
REG7	10	29.44		
T = 13 s ; H = 1.0 m	100	9.01		
REG8	10	14.6		*
T = 14.5 s ; H = 1.0 m	100	6.16		
REG9	10	33.34	3.61	89%
T = 14.5 s ; H = 2.0 m	100	12.27	6.81	44%
* Erro na medição dos valores				

Importa referir que deverá ter ocorrido um problema durante o decorrer dos ensaios para os estados de agitação REG6, REG7 e REG8, uma vez que foram registados movimentos do CECO, mas o sistema de monitorização do PTO não registou qualquer diferença de potencial nos polos do gerador elétrico. Este problema deve alertar para possíveis erros no sistema de monitorização do PTO, pelo que se deve analisar todos os resultados provenientes do mesmo com sentido crítico. Infelizmente, o problema só foi constatado na fase de análise dos resultados, pelo que foi impossível a repetição dos ensaios.

5.5.4. EFICIÊNCIA DO DISPOSITIVO

Depois de efetuado o cálculo dos valores da potência teórica da onda e da potência média absorvida pelo dispositivo CECO, torna-se possível efetuar a análise da sua eficiência. Esta análise teve por base um parâmetro designado “largura de captura relativa”, L_{cap} , que é dado pelo quociente entre a potência média absorvida pelo dispositivo por unidade de comprimento dos seus componentes destinados à absorção da energia da onda¹⁴, e a potência teórica média das ondas incidentes por unidade de comprimento da crista, como indicado na expressão (5.18),

$$L_{cap} = \frac{\bar{P}}{\bar{P}_w \cdot B} \quad (5.18)$$

onde $\bar{P}$ representa a potência média absorvida pelo dispositivo, $\bar{P}_w$ a potência teórica média das ondas incidentes por unidade de comprimento da crista e B o comprimento dos componentes destinados à absorção da energia da onda.

Nas situações em que o valor de L_{cap} é igual à unidade pode-se concluir que o dispositivo absorve toda a energia da onda que nele incide, isto é, ocorre a total absorção da potência da onda incidente em toda a sua largura. Se L_{cap} for inferior a 1, significa que o dispositivo não é capaz de absorver toda a energia da onda incidente. É ainda de referir que a largura de captura relativa pode tomar valores superiores à unidade nos casos em que o dispositivo consegue absorver a potência das ondas ao longo de um comprimento de crista superior à largura do dispositivo devido a efeitos tridimensionais (Thomas, 2008).

¹⁴ No caso do dispositivo CECO corresponde ao comprimento dos dois MLMs

A geometria adotada para o modelo físico do CECO possui dois MLMs com 18 cm de comprimento de absorção útil. Assim, o comprimento total dos componentes utilizados na absorção da energia da onda foi de 9 m (valor de protótipo).

Os Quadros 5.16 a 5.20 apresentam os valores da largura de captura relativa, quer para a potência útil, quer para a potência total. Importa mais uma vez referir que estes valores foram determinados com base no método direto.

Quadro 5.16 - L_{cap} do dispositivo CECO nos testes realizados com agitação irregular para a inclinação de 30°.

Estado de Agitação	Resistência (Ω)	Potência da Onda (kW/m)	Potência útil (kW)	Potência Total (kW)	$L_{cap}^{útil}$ (%)	L_{cap}^{total} (%)
IRREG1 $T_p = 7$ s; $H_s = 1.5$ m	10	7.36	0.78	2.71	1.18	4.09
	42	7.26	1.08	1.70	1.65	2.60
	100	7.27	-	-	-	-
IRREG2 $T_p = 10$ s; $H_s = 1.5$ m	10	11.05	0.19	0.68	0.19	0.68
	42	11.07	0.34	0.55	0.34	0.55
	100	10.97	0.32	0.40	0.32	0.41
IRREG3 $T_p = 13$ s; $H_s = 1.5$ m	10	14.23	0.14	0.49	0.11	0.38
	42	14.26	0.85	1.34	0.66	1.04
	100	14.28	0.53	0.66	0.41	0.51
IRREG4 $T_p = 14.5$ s; $H_s = 2.5$ m	10	41.31	5.93	20.58	1.59	5.53
	42	40.98	12.35	19.46	3.35	5.28
	100	40.79	16.65	20.78	4.54	5.66
IRREG5 $T_p = 14.5$ s; $H_s = 3.5$ m	10	78.97	24.13	83.73	3.40	11.78
	42	78.32	31.84	50.18	4.52	7.12
	100	78.48	18.54	23.14	2.62	3.28

Quadro 5.17 - L_{cap} do dispositivo CECO nos testes realizados com agitação regular para a inclinação de 30°.

Estado de Agitação	Resistência (Ω)	Potência Teórica da Onda (kW/m)	Potência média (kW)	Potência Total (kW)	$L_{cap}^{útil}$ (%)	L_{cap}^{total} (%)
REG1 $T = 7$ s; $H = 1.0$ m	10	6.10	1.83	6.26	3.33	11.40
	42	6.16	0.40	0.61	0.72	1.10
	100	5.87	2.42	2.91	4.58	5.51
REG2 $T = 9.5$ s; $H = 1.0$ m	10	6.56	0.00	0.00	0.00	0.00
	42	6.54	0.00	0.00	0.00	0.00
	100	6.56	0.00	0.00	0.00	0.00
REG3 $T = 10$ s; $H = 1.0$ m	10	11.71	0.97	3.36	0.92	3.19
	42	11.87	1.98	3.08	1.85	2.88
	100	11.78	1.97	2.37	1.86	2.24
REG4 $T = 10$ s; $H = 1.5$ m	10	25.37	4.70	16.45	2.06	7.20
	42	25.70	8.06	12.85	3.48	5.55
	100	25.75	7.69	9.59	3.32	4.14
REG5 $T = 10$ s; $H = 2.0$ m	10	40.61	11.46	40.88	3.14	11.18
	42	41.76	18.68	29.86	4.97	7.94
	100	42.56	33.12	41.56	8.65	10.85

Quadro 5.18 - L_{cap} do dispositivo CECO nos testes realizados com agitação regular para a inclinação de 30°
(continuação)

Estado de Agitação	Resistência (Ω)	Potência Teórica da Onda (kW/m)	Potência média (kW)	Potência Total (kW)	$L_{cap}^{útil}$ (%)	L_{cap}^{total} (%)
REG6 $T = 10.5 \text{ s}$; $H = 1.0 \text{ m}$	10	10.51	0.16	0.56	0.17	0.59
	42	10.67	0.47	0.75	0.49	0.78
	100	10.56	0.77	0.96	0.81	1.01
REG7 $T = 13 \text{ s}$; $H = 1.0 \text{ m}$	10	15.05	0.00	0.00	0.00	0.00
	42	14.98	0.00	0.00	0.00	0.00
	100	14.93	0.06	0.07	0.04	0.06
REG8 $T = 14.5 \text{ s}$; $H = 1.0 \text{ m}$	10	12.68	0.00	0.00	0.00	0.00
	42	12.79	0.00	0.00	0.00	0.00
	100	12.81	0.00	0.00	0.00	0.00
REG9 $T = 14.5 \text{ s}$; $H = 2.0 \text{ m}$	10	44.74	3.83	14.09	0.95	3.50
	42	44.18	10.04	16.72	2.53	4.21
	100	43.38	47.10	59.79	12.06	15.31
REG11 $T = 11 \text{ s}$; $H = 1.5 \text{ m}$	10	23.97	0.00	0.00	0.00	0.00
	42	24.33	0.60	0.96	0.27	0.44
	100	24.01	3.84	4.79	1.78	2.22
REG12 $T = 11 \text{ s}$; $H = 2.0 \text{ m}$	10	45.91	4.14	14.49	1.00	3.51
	42	45.78	9.12	14.54	2.21	3.53
	100	45.15	23.30	29.07	5.73	7.15
REG14 $T = 13 \text{ s}$; $H = 1.5 \text{ m}$	10	27.26	0.00	0.00	0.00	0.00
	42	27.38	0.00	0.00	0.00	0.00
	100	27.33	0.00	0.00	0.00	0.00

Quadro 5.19 - L_{cap} do dispositivo nos testes realizados com agitação irregular para a inclinação de 45° .

Estado de Agitação	Resistência (Ω)	Potência da Onda (kW/m)	Potência útil (kW)	Potência Total (kW)	$L_{cap}^{útil}$ (%)	L_{cap}^{total} (%)
IRREG1 $T_p = 7 \text{ s}$; $H_s = 1.5 \text{ m}$	10	8.44	3.31	11.87	4.36	15.63
	100	8.63	6.60	8.34	8.50	10.74
IRREG2 $T_p = 10 \text{ s}$; $H_s = 1.5 \text{ m}$	10	12.70	5.01	17.92	4.38	15.68
	100	12.41	12.81	16.07	11.47	14.39
IRREG3 $T_p = 13 \text{ s}$; $H_s = 1.5 \text{ m}$	10	16.39	2.57	9.14	1.74	6.20
	100	16.26	4.58	5.78	3.13	3.95
IRREG4 $T_p = 14.5 \text{ s}$; $H_s = 2.5 \text{ m}$	10	46.77	9.17	32.64	2.18	7.75
	100	46.94	15.92	19.85	3.77	4.70
IRREG5 $T_p = 14.5 \text{ s}$; $H_s = 3.5 \text{ m}$	10	91.26	22.36	79.53	2.72	9.68
	100	91.21	42.10	52.65	5.13	6.41

Quadro 5.20 - L_{cap} do dispositivo nos testes realizados com agitação regular para a inclinação de 45°.

Estado de Agitação	Resistência (Ω)	Potência da Onda (kW/m)	Potência útil (kW)	Potência Total (kW)	$L_{cap}^{útil}$ (%)	L_{cap}^{total} (%)
REG1 $T = 7 \text{ s}$; $H = 1.0 \text{ m}$	10	6.45	7.38	25.83	12.71	44.50
	100	5.60	18.04	22.26	35.79	44.17
REG2 $T = 9.5 \text{ s}$; $H = 1.0 \text{ m}$	10	7.50	2.15	7.86	3.19	11.64
	100	8.48	12.07	15.61	15.81	20.45
REG3 $T = 10 \text{ s}$; $H = 1.0 \text{ m}$	10	11.59	6.17	21.94	5.92	21.03
	100	11.10	26.79	33.54	26.82	33.57
REG4 $T = 10 \text{ s}$; $H = 1.5 \text{ m}$	10	24.80	20.54	72.99	9.20	32.70
	100	23.99	69.74	87.57	32.30	40.56
REG5 $T = 10 \text{ s}$; $H = 2.0 \text{ m}$	10	39.34	36.38	130.01	10.28	36.72
	100	41.16	116.19	148.66	31.37	40.13
REG6 $T = 10.5 \text{ s}$; $H = 1.0 \text{ m}$	10	10.03	0.00	0.00	0.00	0.00
	100	10.20	0.00	0.00	0.00	0.00
REG7 $T = 13 \text{ s}$; $H = 1.0 \text{ m}$	10	14.35	0.00	0.00	0.00	0.00
	100	14.40	0.00	0.00	0.00	0.00
REG8 $T = 14.5 \text{ s}$; $H = 1.0 \text{ m}$	10	12.70	0.00	0.00	0.00	0.00
	100	12.70	0.00	0.00	0.00	0.00
REG9 $T = 14.5 \text{ s}$; $H = 2.0 \text{ m}$	10	45.02	3.61	13.18	0.89	3.25
	100	45.87	6.81	8.61	1.65	2.09

Analisando os quadros anteriores conclui-se que o dispositivo é mais eficiente para uma inclinação de 45°. A L_{cap} máxima estimada usando a potência total foi obtida para um estado de agitação regular com um período de 7 s, altura de onda de 1 m associada à resistência de 10 Ω . Por sua vez, a L_{cap} máxima estimada usando a potência útil ocorreu para o mesmo estado de agitação, mas associada à resistência de 100 Ω .

Sendo um dos principais objetivos deste trabalho, a validação das alterações a nível da geometria dos flutuadores com o intuito de aumentar o período de vibração natural do dispositivo, este resultado torna-se suspeito. Torna-se assim importante efetuar uma análise aos movimentos de avanço experienciados pelo dispositivo, de forma a determinar o efeito que um estado de agitação marítima irá ter sobre o movimento da parte móvel do dispositivo. O operador de amplitude de resposta, *Response Amplitude Operator* (RAO), poderia permitir, através da análise dos ensaios realizados, prever o comportamento do dispositivo para outros estados de agitação e pode ser obtido, adaptado ao caso em estudo, através da seguinte expressão:

$$RAO(f) = \frac{A_{\text{avanço}}}{H} \quad (5.19)$$

em que $A_{avanço}$ é a amplitude média do avanço dos MLMs em m, e H representa a altura de onda do estado de agitação.

Infelizmente, devido ao tempo limitado disponível para a realização da presente dissertação, não foi possível analisar os RAO's do dispositivo.

No que diz respeito à inclinação de 30° , o dispositivo apresentou a sua eficiência máxima também para um estado de agitação regular. Tanto a L_{cap} associada à potência útil como à potência total, teve o seu valor máximo (12.06% e 15.31%, respetivamente) para um período e altura de onda de 14.5 s e 2 m, e para uma resistência externa de 100Ω .

Como se pode verificar, o período de onda associado à largura de captura máxima é muito diferente para as duas inclinações estudadas. Conforme referido anteriormente, a inclinação do dispositivo influencia a sua frequência natural de oscilação, que por sua vez condiciona a eficiência do mesmo na absorção da energia das ondas. No entanto, na análise destes valores surgiu a suspeita de que poderão ter sido influenciados por outro fator para além da inclinação. Antes da alteração da inclinação do dispositivo, foi removido o sistema de reprodução do PTO da sua posição no corpo central fixo para que pudessem ser realizados os testes sem PTO. Finalizados os testes sem PTO e a alteração do dispositivo para uma inclinação de 30° , foi novamente instalado o motor. No entanto, apesar do cuidado na instalação do motor no corpo central fixo, o espaço confinado dificultou o processo, pelo que se tem consciência que poderão ter surgido algumas diferenças. Outro dos fatores que poderá ainda adulterar os resultados entre as inclinações deve-se ao atrito entre o tirante superior e as bordas da polia. Este, pela observação direta do funcionamento do dispositivo, deverá ser superior na inclinação de 30° . Na instalação do motor inicial¹⁵ reparou-se que existia uma pequena folga¹⁶ entre a polia e o veio do motor que permitia que a polia se ajustasse à flexão do tirante superior, minimizando assim o atrito entre as bordas da polia e o tirante. O mesmo não se verificou para a nova instalação do motor, uma vez que os parafusos tiveram que ser novamente apertados.

No entanto, de acordo com os resultados obtidos para a largura de captura relativa, o dispositivo CECO apresenta uma eficiência bastante interessante comparativamente a outros WECs. É importante referir que foram considerados os valores de L_{cap} máximos obtidos para o presente modelo. O Quadro 5.21 apresenta uma comparação entre as larguras de captura relativa do modelo construído e outros dispositivos conversores de energia das ondas.

Quadro 5.21 - Comparação entre a L_{cap} de diversos WECs (valores retirados de Babarit, 2015)

Dispositivo	Potência de onda (kW/m)	Largura de Captura Relativa (%)
CECO	30°	43.38
	45°	6.45
<i>Pelamis</i>	12	21
<i>Wavebob</i> (corpos oscilantes)	12	40
<i>Wavedragon</i> (galgamento)	16	23
Central do Pico (Coluna de água oscilante)	20	38
<i>AquaEnergy / AquaBuOY</i>	12	20

¹⁵ Instalação correspondente à inclinação de 45°

¹⁶ A folga resultou do funcionamento do dispositivo (não foi deixada propositadamente)

Teixeira (2012), concluiu que, para o primeiro modelo construído, os valores máximos da L_{cap} eram de 12,86% para um estado de agitação regular e de 19,17% para um estado de agitação irregular de crista longa. No segundo modelo Marinheiro (2013) apresenta valores de L_{cap} máximos de 30.68% para agitação regular, e de 28.21% para agitação irregular de crista longa. Desta forma, é possível concluir que as alterações realizadas no dispositivo permitiram obter resultados significativamente melhores para estados de agitação regular, no entanto os valores para a agitação irregular diminuíram consideravelmente¹⁷. Importa frisar que estes valores foram obtidos com base em resultados do método direto que já vêm deduzidos das perdas que ocorrem na transformação da energia mecânica em energia elétrica.

¹⁷ O valor de L_{cap} máximo obtido para agitação irregular foi de 15.68%

6

SÍNTESE, CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. SÍNTESE E CONCLUSÕES

Com a conclusão da presente dissertação, foi dado mais um passo no desenvolvimento do dispositivo de conversão da energia das ondas CECO, na medida em que se fez a análise e a verificação experimental das melhorias introduzidas neste dispositivo, resultantes dos vários modelos numéricos anteriormente realizados. Por outro lado, foram ainda obtidos dados experimentais para a geometria do CECO testada (otimizada), que serão de grande utilidade para a calibração e validação dos modelos numéricos a utilizar futuramente no desenvolvimento deste dispositivo.

O modelo físico do CECO construído para este estudo apresenta maior complexidade, nomeadamente a nível de geometria dos módulos laterais móveis. Por outro lado, na fase de construção, foi dada especial atenção a detalhes e pormenores que afetam o desempenho final do CECO.

A construção do novo modelo físico do CECO apresentou elevada complexidade, exigindo capacidade de coordenação dos diversos intervenientes, tendo o processo sido moroso, como aliás é frequente em qualquer outro trabalho laboratorial. É ainda importante frisar que longo do trabalho surgiram diversos problemas que exigiram a procura e respetiva implementação de soluções eficazes.

Neste trabalho podem destacar-se as melhorias introduzidas nos módulos laterais móveis, tanto a nível da qualidade de construção dos mesmos, como na definição e utilização de uma geometria inovadora que visava aumentar e maximizar a energia da onda capturada e o desempenho do CECO. É também de salientar a melhoria a nível do sistema de reprodução do PTO, que ao contrário dos modelos anteriores, foi utilizado um motor (gerador) adequado para às condições de funcionamento do CECO.

No entanto, como foi detalhado anteriormente, houve alguns aspetos que influenciaram negativamente os resultados experimentais obtidos. Por exemplo, os tirantes usados no modelo físico eram demasiado esbeltos. Por esse motivo, os momentos resultantes da impulsão da água sobre os flutuadores, quando estes se encontravam na sua posição mais baixa, levava à flexão dos mesmos. Devido à flexão, criavam-se forças de atrito adicionais entre a parte móvel e a parte fixa do CECO, que influenciavam a potência absorvida pelo PTO, especialmente para a inclinação de 30°.

A análise do desempenho do dispositivo CECO nos testes experimentais teve por base os valores médios da potência instantânea absorvida, estimados utilizando um método baseado na medição da diferença de potencial nos polos do gerador e na sua conversão posterior para valores de potência (método direto). No entanto, foi ainda feita uma breve análise da potência absorvida tendo por base o método indireto, que utiliza as séries temporais dos movimentos do dispositivo registadas pelo sistema de aquisição de movimentos *Qualisys* e as curvas de desempenho do PTO.

Os valores obtidos pelo método direto já têm em conta as perdas de energia que ocorrem no processo de transformação da energia mecânica em energia elétrica, sendo assim, em geral, mais conservativos e realistas. Os resultados obtidos são ainda penalizados pelo facto de o sistema de reprodução do PTO apresentar um ponto ótimo de funcionamento (velocidade de rotação). Com o afastamento a esse ponto ótimo aumentam as perdas de energia e diminui a eficiência associada à conversão de energia mecânica em energia elétrica.

Um dos objetivos do presente trabalho era realizar uma validação experimental das alterações, sobretudo a nível geométrico, introduzidas no dispositivo CECO, de forma a aproximar o seu período de oscilação natural dos períodos de onda típicos da costa norte portuguesa.

No entanto, após a análise dos resultados obtidos, foi possível concluir que embora o dispositivo tenha apresentado uma eficiência máxima para um período de onda de 14.5 s para a inclinação de 30°, o mesmo não se verifica para a inclinação de 45°, onde o período de onda com eficiência máxima foi de 7 s. Sendo todas as componentes utilizadas neste trabalho complexas, não se descarta a possibilidade de ter ocorrido erro em alguma delas, pelo que os resultados devem ser analisados com cuidado e sentido crítico.

Conclui-se ainda que na generalidade dos casos, a potência útil absorvida é superior para uma inclinação do dispositivo de 45°. Foi também realizada uma análise da influência da resistência externa na potência absorvida, tendo-se constatado que na generalidade dos casos esta aumenta com o aumento da resistência externa.

Em suma, com a conclusão deste trabalho foi possível identificar vários aspetos sensíveis do dispositivo CECO, permitindo compreender melhor o funcionamento do mesmo. Os resultados experimentais obtidos poderão agora ser utilizados para validação de novos modelos numéricos e dessa forma contribuir uma vez mais para o desenvolvimento do dispositivo CECO.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O acompanhamento da construção do modelo físico do dispositivo CECO, assim como a observação direta do seu comportamento durante a fase de testes e a análise dos resultados experimentais, permitiu identificar aspetos que requerem melhorias e merecem ser alvo de estudos mais aprofundados no futuro.

Em primeiro lugar sugerem-se algumas alterações a nível mecânico. Nomeadamente, o aumento da rigidez dos tirantes e do elemento anelar estrutural, de forma a reduzir a flexão da estrutura e evitar o sucessivo aumento das forças de atrito entre o PTO e o tirante superior, com o aumento da amplitude do movimento de avanço. É ainda de realçar:

- O tirante superior deve estar bem solidarizado com a correia (ou mecanismo de conversão do movimento de translação para rotação) de forma a evitar possíveis passagens do passo em falso;
- Deverá existir uma pequena folga entre a polia acoplada ao veio do motor e a cremalheira, de forma a que o sistema se ajuste a pequenas flexões do tirante superior;
- O sistema de guiamento dos tirantes deve minimizar os movimentos em direções que não a do movimento de avanço.

Deve ainda ser estudado um mecanismo que permita a adaptação ao nível da maré e ainda um ajuste automático à direção das ondas incidentes de forma a maximizar a energia absorvida das mesmas. A estabilidade do dispositivo é crucial para o bom funcionamento do dispositivo, pelo que se destaca a necessidade de elaborar um estudo de um sistema de amarração do CECO em águas profundas, pois é nestas que se encontram as condições mais energéticas.

Relativamente ao sistema de reprodução do PTO, a experiência adquirida neste trabalho experimental permite identificar alguns pontos de extrema importância para a construção de novos modelos:

- O motor/gerador utilizado deve ter o menor atrito interno possível;
- O sistema, no seu conjunto, deve ser estanque à água;
- A caixa de velocidades de um motor/gerador revela-se um aspeto crucial e deve ser analisado de antemão.

Embora não tenha sido analisada com grande detalhe a influência que a alteração da resistência externa teria na potência debitada pelo gerador/motor, sabe-se que a potência máxima que um gerador debita ocorre quando a resistência em carga é igual à resistência interna do gerador. Assim, num possível estudo do dispositivo CECO, deverá ser analisada esta última, sendo importante que a resistência interna do gerador seja coincidente com a resistência externa do circuito.

Deve ainda ser alvo de estudo um sistema de reprodução do PTO que permita aumentar a eficiência do processo de conversão da energia mecânica associada ao movimento de avanço em energia elétrica. O sistema de monitorização do PTO pode também ser melhorado, nomeadamente de forma a permitir, em tempo real, a confirmação de que os valores estão a ser corretamente medidos.

Devido ao tempo limitado para a realização deste trabalho, o plano de testes para o modelo desenvolvido foi condensado de forma a permitir caracterizar apenas as condições essenciais, pelo que num futuro estudo, deverão ser acrescentadas mais condições de agitação marítima, entre elas agitação do tipo irregular de crista curta.

Torna-se importante efetuar uma análise cuidada aos movimentos que o modelo do dispositivo CECO estudado experienciou durante os ensaios experimentais. Esta análise irá permitir uma melhor compreensão da influência das condições de agitação e do grau de amortecimento do PTO no funcionamento e desempenho final do conversor de energia das ondas CECO. Infelizmente, no tempo disponível para a realização desta dissertação não foi possível efetuar essa análise, mas salienta-se aqui a sua importância para que futuramente seja realizada.

Embora tenha sido dado mais um passo no desenvolvimento do dispositivo CECO, reconhece-se que a viabilidade do mesmo ainda não está comprovada. Os modelos físicos estudados até à data apresentam resultados interessantes em termos de potência absorvida, no entanto o acompanhamento direto da construção e funcionamento do modelo revelaram que o sistema é bastante sensível. Apesar de em laboratório ser possível controlar grande parte dos problemas que os oceanos encontram, tal não é possível numa aplicação real. Agentes biológicos como algas ou crustáceos, e ainda a poluição dos oceanos poderão afetar significativamente o funcionamento do CECO. Assim, na eventualidade de uma aplicação marítima é importante que sejam realizados estudos acerca da influência destes agentes no dispositivo e ainda desenvolvida uma forma de combater estes últimos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Portuguesa de Energias Renováveis, 2018. *Eletricidade Renovável Em Revista*.
- Babarit, A., 2015. *A database of capture width ratio of wave energy converters*. Renewable Energy, 80, p. 610-628.
- Carlos, M. R., Victor, G. B., 2012. *Recursos Naturais*. Ingenium, Vol. 131, p. 34-35.
- Cornett, A., 2008. *A global wave energy resource assessment*. Proc. ISOPE, 8, p. 318-326.
- Cruz, J., Sarmiento, A. (2004). *Energia das ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Económicos e Ambientais*. Instituto do Ambiente, Alfragide.
- Cunha, J. F., Onofrei, R.. *Energia Oceânica*. Instituto Nacional de Propriedade Industrial, Lisboa.
- Curran, R., Folley, M., Danielsson, O., Thorburn, K., Leijon, M., & Taylor, J., 2008. *Power take-off systems*. Chapter 6, Ocean Wave Energy, Springer, Berlin, Heidelberg, 189p.
- Drew, B., Plummer, A., Sahinkaya, M., 2009. *A review of wave energy converter technology*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 223, p. 887-902.
- Falcão, A., 2009. *Renewable and Sustainable Energy Reviews. Wave Energy Utilization: A review of the technologies*.
- Goulart, M., Gomes, M., Souza, J., 2016. *Estudo Numérico do Efeito de um Espectro de Ondas Comparado a Uma Onda Monocromática Sobre um Dispositivo de Galgamento Onshore Empregando Design Construtal*. VII Seminário e workshop em engenharia oceânica, p. 202-211.
- Heller, V., 2011. *Scale effects in physical hydraulic engineering models*. Journal of Hydraulic Research 49(3), p. 293-306.
- Heller, V., 2012. *Technology Readiness Level approach for the development of WEC's*. 4th CoastLab Teaching School, Wave and Tidal Energy, FEUP, Porto.
- Holmes, B. e Nielson, K. (2010). *Guidelines for the Development & Testing of Wave Energy Systems*. Final Technical Report, OES-IA, Annex II, Task 2.1.
- López, M., Taveira-Pinto, F., Rosa-Santos, P., 2018. *Effects of the PTO inclination on the performance of the CECO wave energy converter*. Marine Structures. Vol. 61. p. 452-466.
- López, M., Taveira-Pinto, F., Rosa-Santos, P., 2017. *Influence of the power take-off characteristics on the performance of CECO wave energy converter*. Energy. Vol. 120. p. 686–697.
- Marinheiro, J. (2013). *“Estudo de Otimização de um Dispositivo Inovador para o Aproveitamento da Energia das Ondas”*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Hidráulica, FEUP, Porto.
- Mofk G., Barstow, S., Kabuth, A., Pontes, M., 2010. *Assessing the Global Wave Energy Potential*. 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Vol, 3, p. 447-454.
- Pecher, A., Kofoed., J., 2017. *Handbook of Ocean Wave Energy*. Ocean Engineering & Oceanography, Springer International Publishing, Vol.7. ISBN 978-3-319-39888-4.
- Perdigão, D. (2012). *"Avaliação Numérica do Comportamento do Dispositivo CECO - Conversor da Energia Cinética das ondas"*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Hidráulica, FEUP, Porto.

- Pérez-Collazo, C., Greaves, D., Iglesias, G., 2015. *A review of combined wave and offshore wind energy*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 42, p. 141-153, doi: 10.1016/j.rser.2014.09.032.
- Ramos, V., López, M., Taveira-Pinto, F., Rosa-Santos, P., 2017. *Influence of the wave climate seasonality on the performance of a wave energy converter: A case study*. Energy, 135, p. 303-316.
- Ramos, V., López, M., Taveira-Pinto, F., Rosa-Santos, P., 2017. *Performance assessment of the CECO wave energy converter: Water depth influence*. Renewable Energy, 117, p. 341-356.
- Pinto, F. T., Santos, P. R., Rodrigues, C. A., López, M., Ramos, V., Xu, S., ... & Soares, C. G., 2018. *Optimization of Wave Energy Converters in the OPWEC Project*. Progress in Maritime Engineering and Technology, p. 657-666.
- Rodríguez, C. A., Taveira-Pinto, F., & Rosa-Santos, P., 2018. *Experimental Assessment of the Performance of CECO Wave Energy Converter in Irregular Waves*. In ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, p.1–10.
- Rosa Santos, P. (2010). *Análise da Interação de Navios com Dispositivos de Acostagem e Amarração. Estudo em Modelo Físico do Posto "A" do Terminal de Petroleiros do Porto de Leixões*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil – Hidráulica, FEUP, Porto.
- Shek, J., Macpherson, D., Mueller, M., 2002, *Power Conversion for Wave Energy Applications*. 216, p. 1-27.
- So, R., Casey, S., Kanner, S., Simmons, A., Brekken, T. K., 2015, *PTO-Sim: Development of a power take off modeling tool for ocean wave energy conversion*. Power & Energy Society General Meeting, p. 1-5.
- Summers, C., 1971, *The Conversion of Energy*. Scientific American, 225, p. 148-160.
- Taveira Pinto, F. (2011a). *Modelação Física*. Trabalhos marítimos 2. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, FEUP, Porto.
- Teixeira, L., Rosa-Santos, P., Taveira-Pinto, F., Ribeiro, J., 2012, *Estudo experimental de um novo dispositivo de aproveitamento da energia das ondas*. p. 31-39.
- Teixeira, L. (2012). *"Estudo Experimental de um Novo Dispositivo de Aproveitamento da Energia das Ondas"*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Hidráulica, FEUP, Porto.

ANEXOS

Quadro 0.1 - Lista das forças aplicadas para as resistências externas de Mínima, 5,6, 10, 42 e 79.6 Ohms na caracterização do Motor 10.

R (Ω)	Massa (g)	Força (N)
Máxima	370	3.63
	450	4.41
	609	5.97
	1018	9.98
	1417	13.90
	1915	18.78
	2510	24.62
	3017	29.59
	3509	34.41
	3915	38.39
5.6	405	3.97
	510	5.00
	614	6.02
	806	7.90
	1198	11.75
	1697	16.64
	2297	22.53
	3102	30.42
	3502	34.34
	312	3.06
10	510	5.00
	608	5.96
	812	7.96
	1214	11.91
	1698	16.65
	2106	20.65
	2608	25.58
	3012	29.54
	213	2.09
	512	5.02
42	788	7.73
	1186	11.63
	1368	13.42
	166	1.63
	169	1.66
79.6	180	1.77
	190	1.86
	201	1.97
	213	2.09

Quadro 0.2 - Lista das forças aplicadas para as resistências externas de Máxima e 100 Ohms na caracterização do Motor 10

R (Ω)	Massa (g)	Força (N)
100	166	1.63
	175	1.72
	177	1.74
	185	1.81
	197	1.93
	204	2.00
	224	2.20
Mínima	165	1.62
	177	1.74
	193	1.89
	208	2.04
	229	2.25

Quadro 0.3 - Lista das forças aplicadas para as resistências externas de Máxima e Mínima na caracterização do Motor 24

R (Ohms)	Massa (g)	Força (N)
Máxima	1217	11.94
	1323	12.97
	1532	15.02
	1630	15.99
	1730	16.97
Mínima	1900	18.63
	2130	20.89
	3334	32.70
	5241	51.40

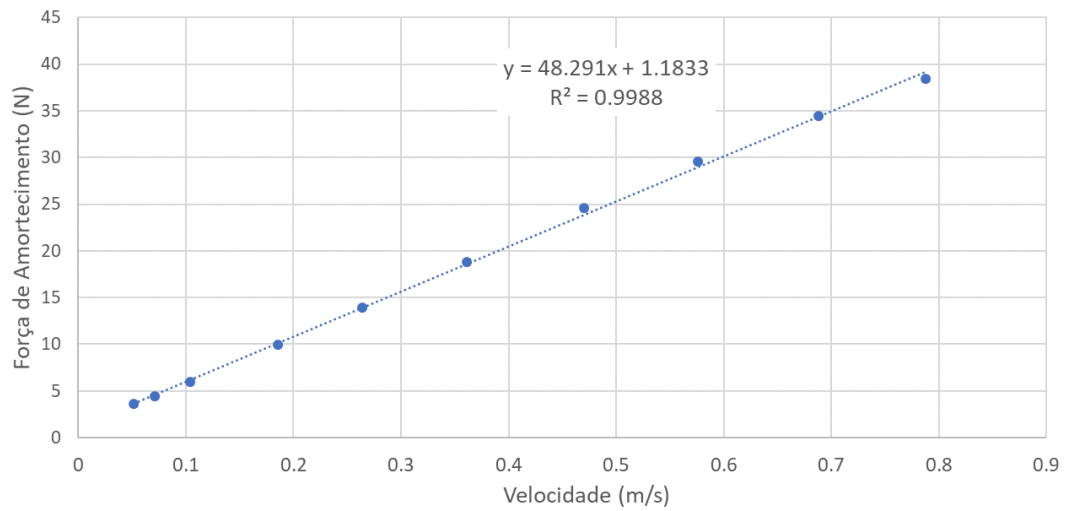


Figura 0.1 - Curva característica do Motor 10 para uma resistência externa mínima

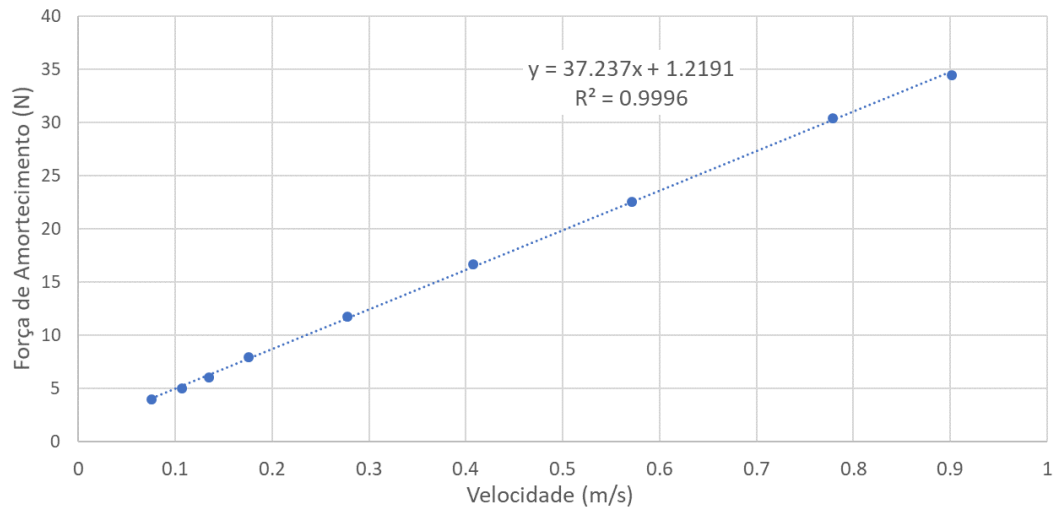


Figura 0.2 - Curva característica do Motor 10 para uma resistência externa de 5.6 Ohms

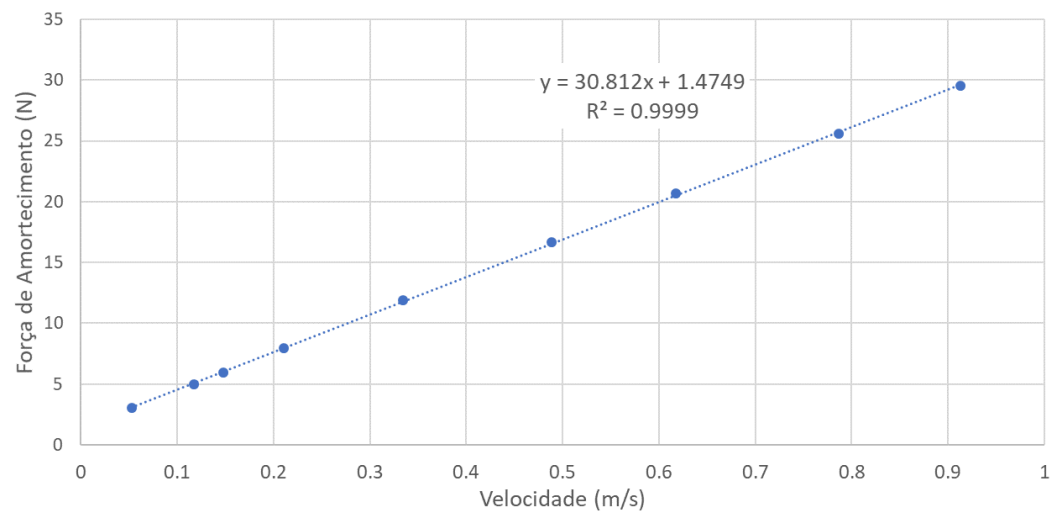


Figura 0.3 - Curva característica do Motor 10 para uma resistência externa de 10 Ohms

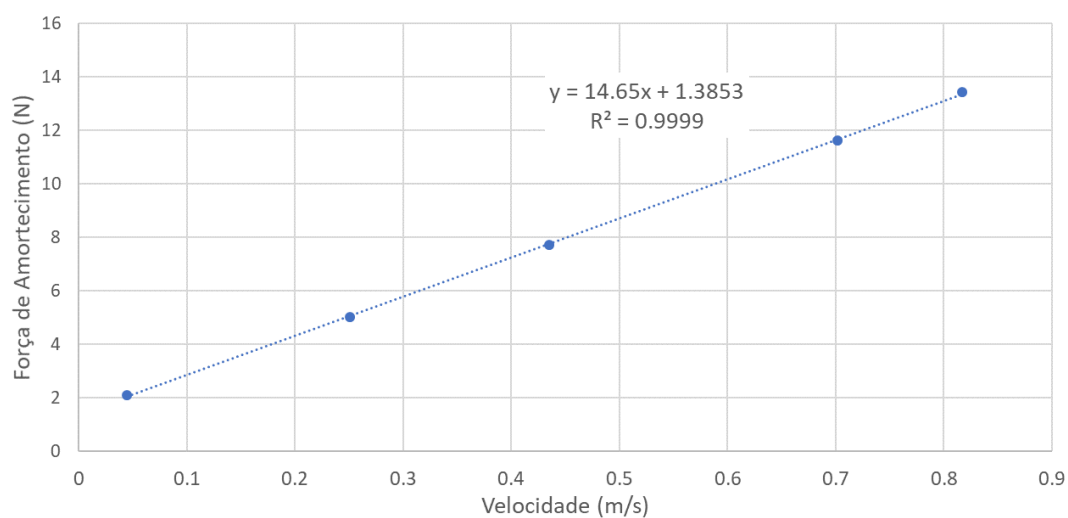


Figura 0.4 - Curva característica do Motor 10 para uma resistência externa de 42 Ohms

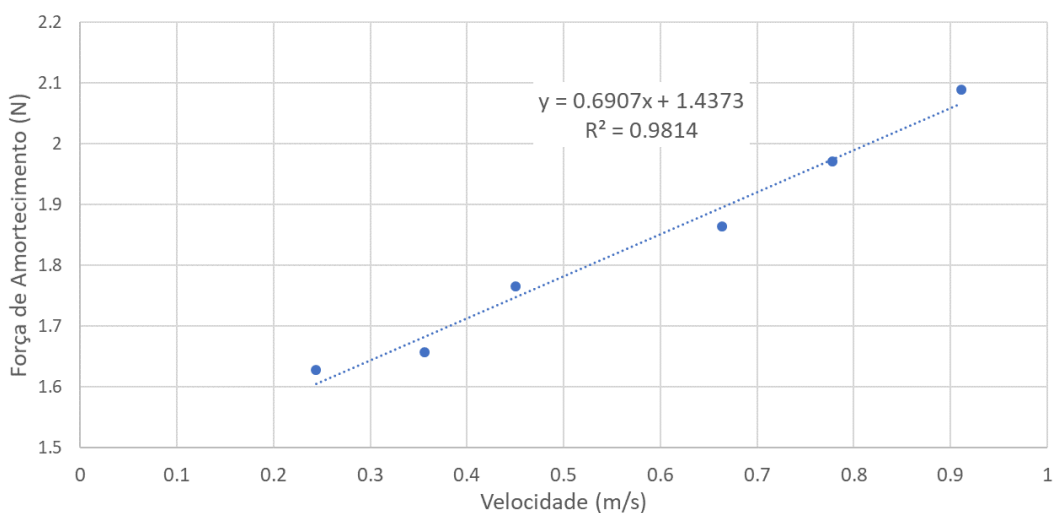


Figura 0.5 - Curva característica do Motor 10 para uma resistência externa de 79.6 Ohms

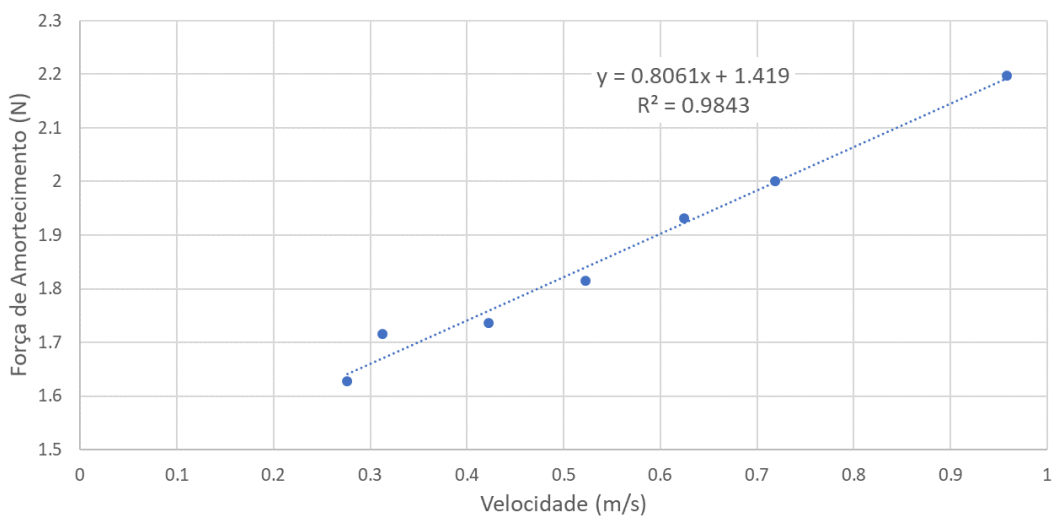


Figura 0.6 - Curva característica do Motor 10 para uma resistência externa de 100 Ohms

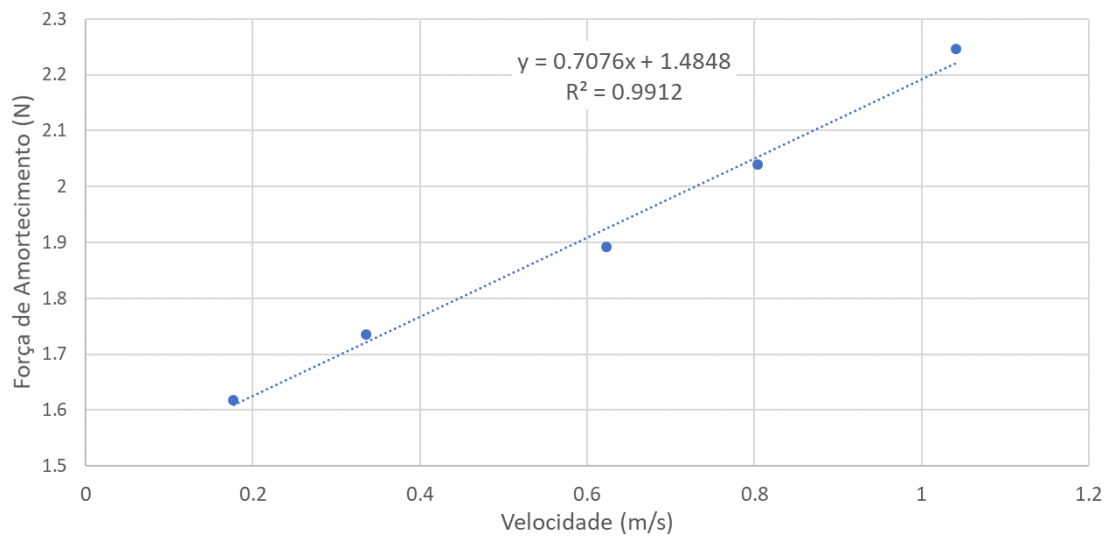


Figura 0.7 - Curva característica do Motor 10 para uma resistência externa máxima

Quadro 0.4 - Potência teórica da onda para estados de agitação irregulares nos ensaios com inclinação 30°

Estado de Agitação	Resistência (Hz)	Potência Teórica da Onda (kW/m)
IRREG1	10	7.36
	42	7.26
	100	-
IRREG2	10	11.05
	42	11.07
	100	10.97
IRREG3	10	14.23
	42	14.26
	100	14.28
IRREG4	10	41.31
	42	40.98
	100	40.79
IRREG5	10	78.97
	42	78.32
	100	-

Quadro 0.5 - Potência teórica da onda para estados de agitação regulares nos ensaios com inclinação 30°

Estado de Agitação	Resistência (Hz)	Potência Teórica da Onda (kW/m)
REG1	10	6.10
	42	6.16
	100	5.87
REG2	10	6.56
	42	6.54
	100	6.56
REG3	10	11.71
	42	11.87
	100	11.78
REG4	10	25.37
	42	25.70
	100	25.75
REG5	10	40.61
	42	41.76
	100	42.56
REG6	10	10.51
	42	10.67
	100	10.56
REG7	10	15.05
	42	14.98
	100	14.93

Quadro 0.6 - Potência teórica da onda para estados de agitação regulares nos ensaios com inclinação 30°
(continuação)

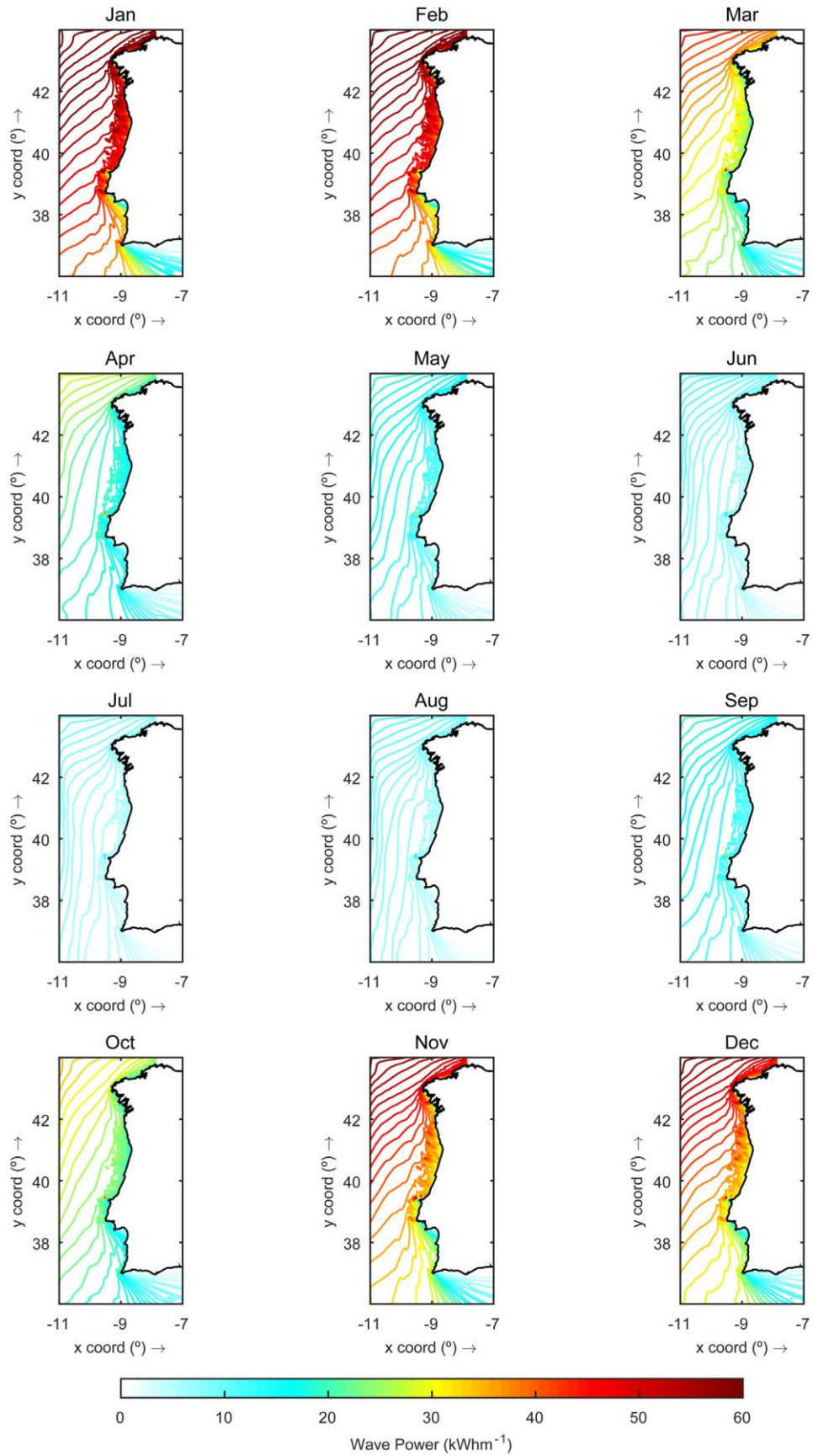
REG8	10	12.68
	42	12.79
	100	12.81
REG9	10	44.74
	42	44.18
	100	43.38
REG10	10	-
	42	-
	100	-
REG11	10	23.97
	42	24.33
	100	24.01
REG12	10	45.91
	42	45.78
	100	45.15
REG13	10	-
	42	-
	100	-
REG14	10	27.26
	42	27.38
	100	27.33
REG15	10	-
	42	-
	100	-

Quadro 0.7 - Potência teórica da onda para estados de agitação irregulares nos ensaios com inclinação 45°

Estado de Agitação	Resistência (Hz)	Potência Teórica da Onda (kW/m)
IRREG1	10	8.44
	100	8.63
IRREG2	10	12.70
	100	12.41
IRREG3	10	16.39
	100	16.26
IRREG4	10	46.77
	100	46.94
IRREG5	10	91.26
	100	91.21

Quadro 0.8 - Potência teórica da onda para estados de agitação regulares nos ensaios com inclinação 45°

Estado de Agitação	Resistência (Hz)	Potência Teórica da Onda (kW/m)
REG1	10	6.45
	100	5.60
REG2	10	7.50
	100	8.48
REG3	10	11.59
	100	11.10
REG4	10	24.80
	100	23.99
REG5	10	39.34
	100	41.16
REG6	10	10.03
	100	10.20
REG7	10	14.35
	100	14.40
REG8	10	12.70
	100	12.70
REG9	10	45.02
	100	45.87


 Figura 0.8 - Potência média das ondas mensal (entre 2005-2014) (adaptado de (Ramos *et al.*, 2018))