

ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM NANOGERADOR TRIBOELÉCTRICO PARA APLICAÇÕES OFFSHORE

VICENTE JOÃO COUTO PINHEIRO DA FIGUEIRA MACHADO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA, RECURSOS HÍDRICOS E
AMBIENTE.**

Orientador: Professor Doutor Paulo Jorge Rosa Santos

Coorientador: Professor Doutor Francisco de Almeida Taveira Pinto

JULHO DE 2019

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2018/2019

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 - 2018/2019 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2019*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo 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 electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À minha Família.

Conhecimento real é saber a extensão da própria ignorância.

Confúcio

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, o Professor Doutor Paulo Jorge Rosa Santos, pela disponibilidade, dedicação, visão meticulosa e apoio constante durante todo o trabalho realizado. Agradecer ainda os conselhos, ensinamentos e encorajamento em alguns momentos. Muito obrigado.

Gostaria de agradecer ao Professor Doutor Francisco de Almeida Taveira Pinto, coorientador da presente dissertação, pela sua disponibilidade e pela sua capacidade de desbloquear alguns aspectos burocráticos durante a realização deste trabalho.

Um grande agradecimento à Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, por ter disponibilizado todos os meios e condições necessárias à concretização da presente dissertação, nomeadamente ao Eng. Tomás Cabral e ao Eng. Daniel Clemente, por me terem ensinado a utilizar os equipamentos do laboratório, por partilharem os seus conhecimentos, e sobretudo, pela disponibilidade constante de ambos para qualquer ajuda que fosse necessária. Agradeço ainda ao Senhor Miguel Guerra pela sua prontidão, boa disposição e vontade de ajudar.

Gostaria de agradecer aos membros da i.nanoE por toda a ajuda prestada relativa ao nanogerador triboelétrico, sobretudo à Doutora Cátia Rodrigues, pela sua paciência, simpatia e disponibilidade para o esclarecimento de dúvidas.

Ao Professor Doutor Hélio Sousa Mendonça do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da FEUP pela ajuda prestada com o sistema de aquisição de dados da célula de carga.

Por fim, gostaria de agradecer aos membros do INEGI (Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial) envolvidos no projecto, nomeadamente ao Eng. Filipe Gonçalves pela ajuda e apoio durante o trabalho experimental.

RESUMO

O oceano Atlântico tem o potencial para se tornar no principal factor de desenvolvimento de Portugal, através dos seus inúmeros recursos biológicos, minerais e energéticos, sendo imperativo o estudo e aplicação de soluções que permitam a exploração sustentável dos mesmos.

A presente dissertação visou o estudo experimental, em tanque de ondas, de uma tecnologia inovadora que poderá permitir tornar os equipamentos *offshore* utilizados na monitorização, assinalamento e vigilância do oceano, energeticamente autossuficientes e autónomos. Este trabalho enquadra-se no âmbito do Projecto “*I.nano.WEC – Innovative nano-technology for Wave Energy Conversion*” (FA 02 2017 002). Este projecto procura desenvolver nanogeradores triboelétricos inovadores e altamente eficientes para aplicações no sector de conversão de energia das ondas. Envolve a colaboração da i.nanoE, da FEUP (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto) e do INEGI (Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial).

Numa primeira fase foram caracterizados os principais recursos oceânicos e o conjunto de equipamentos e sensores indispensáveis para a sua monitorização, assinalamento e vigilância, revendo, posteriormente, o seu modo de funcionamento, principais características técnicas e condicionantes energéticas, teorizando uma futura inclusão dos nanogeradores triboelétricos nestes equipamentos. Foi feita, ainda, uma comparação da tecnologia inovadora, nanogeradores triboelétricos, com os sistemas convencionais de conversão da energia das ondas, realçando os seus pontos fortes e pontos fracos em relação a esses sistemas convencionais.

Numa segunda fase, experimental, foi testada a resposta do nanogerador triboelétrico para condições de agitação marítima e fluvial no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Para ser testado o sistema foi construído um modelo simplificado duma bóia oceânica à escala 1/20 capaz de conter o nanogerador triboelétrico e o sistema de aquisição de dados no seu interior. Procurou-se perceber para que gamas de alturas e períodos de onda a produção de energia é potenciada, e se a energia produzida, é suficiente para servir como unidade de produção de energia de equipamentos *offshore* tendo em conta o consumo real destes equipamentos e dos sensores mais comuns neles incluídos (anexo A e anexo B, respectivamente), para isso foi calculada a densidade de potência do nanogerador triboelétrico.

Concluiu-se que o TENG testado neste trabalho depende exclusivamente das oscilações de balanço e cabeceio do modelo simplificado para produzir energia. A melhor densidade de potência, 0.0008 W/m^2 , foi obtida para o teste com agitação regular e as seguintes condições: altura significativa de onda igual a 0.100 m e frequência de onda de pico de 1.406 Hz, que corresponde à frequência de ressonância do modelo simplificado para o modo de oscilação de balanço (valores no modelo físico).

Importa referir que, tanto o nanogerador triboelétrico, como o projecto em que este estudo está inserido, estão numa fase inicial de desenvolvimento, sendo que foi a primeira vez que um nanogerador triboelétrico foi testado em tanque de ondas. Assim, esta dissertação, apresenta um conjunto alargado de aspectos passíveis de ser melhorados no futuro *design* deste conversor de energia das ondas, tendo em vista, a médio prazo, a sua demonstração em ambiente real.

PALAVRAS-CHAVE: Modelação física, oceano, sistemas autónomos, sistemas autossuficientes, recursos marítimos.

ABSTRACT

The Atlantic Ocean has the potential to become the main development factor for Portugal, through its numerous biological, mineral and energy resources, being imperative the study and application of solutions that allow the sustainable exploitation of them.

This dissertation aimed at the experimental study, in a wave tank, of an innovative technology that may allow the offshore equipment used in monitoring, navigation and surveillance of the ocean, to be self-sufficient and autonomous in terms of power. This work is part of the "I.nano.WEC - Innovative nanotechnology for Wave Energy Conversion" project (FA 02 2017 002). This project aims to develop innovative and highly efficient triboelectric nanogenerators for applications in the wave energy conversion sector. It involves the collaboration of i.nanoE, FEUP (Faculty of Engineering of the University of Porto) and INEGI (Institute of Science and Innovation in Mechanical Engineering and Industrial Engineering).

In the first stage of the study, the main oceanic resources and the set of equipment and sensors indispensable for their monitoring, navigation and surveillance were characterized, and subsequently a review was made of their mode of operation, main technical characteristics and energy constraints, theorizing a future inclusion of triboelectric nanogenerators in this equipment. A comparison of the innovative technology, triboelectric nanogenerators, and the conventional wave energy conversion systems was also made, highlighting its strengths and defects in relation to the conventional systems.

In a second stage of the study, the experimental stage, the response of the triboelectric nanogenerator was tested under sea and river wave conditions in the wave tank of the Hydraulics Laboratory of the Hydraulics, Water Resources and Environment Division of the Engineering Faculty of the University of Porto. In order to test the system, it was built a simplified model of an ocean buoy at a 1/20 geometrical scale capable of containing the triboelectric nanogenerator and the data acquisition system within it. The aim was to understand for which ranges of wave heights and wave periods the energy production is enhanced, and if the energy produced is sufficient to serve as a energy production unit of offshore equipment, taking into account the actual consumption of this equipment and the most common sensors included in them (Annex A and Annex B, respectively). The power density of the triboelectric nanogenerator was calculated for this purpose.

It was concluded that the TENG tested in this work depends exclusively on the roll and pitch oscillations of the simplified model to produce energy. The best power density, 0.0008W/m^2 , was obtained for the test with regular waves and the following conditions: significant wave height equal to 0.100 m and peak wave frequency of 1.406 Hz, which corresponds to the resonance frequency of the simplified model for the roll mode of oscillation (model values).

It should be noted that both the triboelectric nanogenerator and the project in which this study is inserted are both at an early stage of development, and it was the first time that a triboelectric nanogenerator was tested in a wave tank. Thus, this dissertation presents a wide range of aspects that can be improved in the future design of this wave energy converter, with the purpose, to its demonstration in a real environment in a medium term.

KEYWORDS: Physical modelling, ocean, autonomous systems, self-sufficient systems, maritime resources.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. ESTRUTURA E OBJECTIVOS DA DISSERTAÇÃO	2
1.3. RECURSOS DOS OCEANOS	3
1.3.1. TRANSPORTE MARÍTIMO.....	3
1.3.2. PESCA.....	4
1.3.3. AQUACULTURA <i>OFFSHORE</i>	5
1.3.4. EXPLORAÇÃO <i>OFFSHORE</i> DE PETRÓLEO E GÁS.....	6
1.3.5. ENERGIA EÓLICA <i>OFFSHORE</i>	7
1.3.6. TURISMO DE CRUZEIRO.....	8
1.3.7. ENERGIA DAS ONDAS.....	10
1.4. MONITORIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS OCEÂNICAS	11
1.4.1. TEMPERATURA DA ÁGUA	12
1.4.2. SALINIDADE DA ÁGUA.....	12
1.4.3. ONDULAÇÃO	14
1.4.4. CORRENTES OCEÂNICAS.....	15
1.4.5. PARÂMETROS BIOGEOQUÍMICOS.....	16
1.4.6. TEMPERATURA DO AR	18
1.4.7. HUMIDADE DO AR	19
1.4.8. VENTOS	20

2. EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES <i>OFFSHORE</i>	23
2.1. EQUIPAMENTOS <i>OFFSHORE</i>	23
2.1.1. DISPOSITIVOS DE MONITORIZAÇÃO	23
2.1.2. DISPOSITIVOS DE VIGILÂNCIA	24
2.1.3. DISPOSITIVOS DE ASSINALAMENTO	25
2.2. BÓIAS OCEÂNICAS	27
2.2.1. BÓIAS AMARRADAS (<i>MOORED BUOYS</i>).....	28

2.2.2. BÓIAS À DERIVA (<i>DRIFTERS</i>).....	30
2.3. OUTROS EQUIPAMENTOS OFFSHORE	33
2.3.1. AMARRAÇÕES (<i>MOORINGS</i>)	33
2.3.2. SISMÓMETRO DE FUNDO DO MAR	34
2.3.3. PERFILADOR HIDROACÚSTICO DE CORRENTES DE FUNDO DO MAR	35
2.3.4. FLUTUADORES	36
2.4. INSTALAÇÕES OFFSHORE	37
2.4.1. PLATAFORMAS PETROLÍFERAS.....	37
2.4.2. AQUACULTURA <i>OFFSHORE</i>	38
2.4.3. PARQUES EÓLICOS <i>OFFSHORE</i>	39
2.5. AUTOSSUFICIÊNCIA ENERGÉTICA E AUTONOMIA EM LOCAIS REMOTOS OFFSHORE.	42
 3. SISTEMA A DESENVOLVER.....	 45
3.1. ENQUADRAMENTO	45
3.2. SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DE ONDAS	45
3.2.1. LOCALIZAÇÃO	45
3.2.2. DIMENSÃO E/OU ORIENTAÇÃO DO DISPOSITIVO	46
3.2.3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	47
3.2.3.1. Coluna de Água Oscilante (<i>Oscillating Water Column – OWC</i>)	48
3.2.3.2. Corpos Oscilantes (<i>Oscillating Bodies</i>).....	49
3.2.3.3. Dispositivos de Galgamento (<i>Overtopping Devices</i>)	50
3.2.4. MÉTODOS DE EXTRACÇÃO DE ENERGIA.....	50
3.2.4.1. Turbinas a ar	50
3.2.4.2. Turbinas Hidráulicas	51
3.2.4.3. Sistema Hidráulico	51
3.2.4.4. Geradores Lineares	52
3.2.4.5. Geradores Magnetohidrodinâmicos (MHD)	53
3.3. NANOGERADORES TRIBOELÉTRICOS (TENGS).....	53
3.3.1. MODO DE OPERAÇÃO POR CONTACTO	54
3.3.2. MODO DE OPERAÇÃO DESLIZANTE	54
3.3.3. MODO DE OPERAÇÃO POR ESFERA ROLANTE	56
3.4. TENGS ENQUANTO SISTEMAS CONVERSORES DE ENERGIA DAS ONDAS	56
3.5. PRINCIPAIS DESAFIOS	57

4. DINÂMICA DE CORPOS FLUTUANTES	59
4.1. INTRODUÇÃO	59
4.2. GRAUS DE LIBERDADE	59
4.3. HIDROSTÁTICA	61
4.3.1. PRESSÃO HIDROSTÁTICA	61
4.3.2. PRINCÍPIO DE ARQUIMEDES	61
4.3.3. ESTABILIDADE ESTATICA DE CORPOS FLUTUANTES	62
4.3.3.1. Equilíbrio Estático	62
4.3.3.2. Equilíbrio Horizontal	63
4.3.3.3. Equilíbrio Vertical	63
4.3.3.4. Equilíbrio Rotacional	64
4.3.4. METACENTRO	65
4.4. HIDRODINÂMICA	67
4.4.1. CONDIÇÕES FRONTEIRA DO PROBLEMA	67
4.4.2. FORÇAS E MOMENTOS	70
4.4.2.1. Forças Hidrostáticas	71
4.4.2.2. Forças Hidrodinâmicas	71
4.4.2.3. Forças relativas às Ondas Incidentes e de Difracção	73
4.4.2.4. Forças de Arrastamento e Inércia	74
4.4.2.5. Forças de Amarração	75
4.5. EQUAÇÕES DO MOVIMENTO DE UMA BÓIA AMARRADA	76
4.6. PERÍODOS NATURAIS DE OSCILAÇÃO DE UMA BÓIA	78
5. ESTUDO EXPERIMENTAL	85
5.1. ENQUADRAMENTO	85
5.2. MODELAÇÃO FÍSICA	85
5.2.1. INTRODUÇÃO	85
5.2.2. CRITÉRIOS DE SEMELHANÇA	86
5.2.3. EFEITOS DE ESCALA, DE MODELO E DE LABORATÓRIO E ERROS DE MEDIÇÃO	89
5.3. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL	90
5.3.1. EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO	93
5.3.1.1. Sistema de Aquisição de Agitação Marítima	93
5.3.1.2. Sistema de Aquisição de Movimentos	94
5.3.2. CALIBRAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	95

5.4. MODELO FÍSICO EM ESTUDO	96
5.4.1. VERIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO MODELO.....	98
5.4.2. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA TENG.....	106
5.4.3. SETUP E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	110
5.5. PLANO DE ENSAIOS	111
5.7. ANÁLISE DE RESULTADOS	119
5.7.1. RESPOSTA GLOBAL DO SISTEMA SEM ONDAS	119
5.7.2. RESPOSTA GLOBAL DO SISTEMA COM ONDAS	124
5.7.2.1. Agitação Regular	124
5.7.2.2. Agitação Irregular	130
5.7.3. RESPOSTA GLOBAL DO TENG.....	137
5.7.3.1. Agitação Regular	137
5.7.3.2. Agitação Irregular	143
5.7.4. RESPOSTA GLOBAL DA CÉLULA DE CARGA.....	147
 6. CONCLUSÕES	 153
6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	153
6.2. CONCLUSÕES E DIFICULDADES ENCONTRADAS	153
6.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	155
 BIBLIOGRAFIA	 157
 ANEXO A – FICHAS TÉCNICAS: BÓIAS	 163
ANEXO B – FICHAS TÉCNICAS: SENSORES E OUTROS EQUIPAMENTOS OFFSHORE	189
ANEXO C – LISTAGEM DETALHADA DAS CONDIÇÕES DE TESTE ESTUDADAS	207

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Navio de Contentores e bóia de navegação (Almarin, 2019).	4
Fig. 2 – Navio de pesca e bóia de monitorização (IMOS, 2019).	5
Fig. 3 – Exploração de aquacultura <i>offshore</i> (iStockphoto, 2019).	6
Fig. 4 – Bóia de Monitorização e plataforma petrolífera (Technologies, 2019).	7
Fig. 5 – Bóia equipada com um perfilador de ventos próxima dum parque eólico (<i>Magazine</i> , 2013).	8
Fig. 6 – Bóia de assinalamento e monitorização no porto de <i>Newcastle</i> no mar do norte, local de passagem de cruzeiros (Ratcliff, 2015).	9
Fig. 7 – Desenvolvimento global da exploração dos recursos marítimos (Stojanovic <i>et al.</i> , 2013).	9
Fig. 8 – Distribuição Global do potencial energético da energia das ondas em kW por metro de onda (Birol, 2008).	10
Fig. 9 – Média anual da temperatura da superfície do mar e distribuição mundial em [°C] (Baranova, 2015).	12
Fig. 10 – Média anual da salinidade da superfície do mar e distribuição mundial em [PSU] (Baranova, 2015).	13
Fig. 11 – Representação duma Onda (Ilyas <i>et al.</i> , 2014).	14
Fig. 12 – Bóia ondógrafo (Zacarias, 2011).	15
Fig. 13 – Representação das principais correntes oceânicas (IOI, 2010).	16
Fig. 14 – Representação do ciclo biogeoquímico (Oceanography, 2019).	18
Fig. 15 – Média das temperaturas nocturnas do ar registadas no mês de Dezembro de 2010 (Centre, 2015).	19
Fig. 16 – Humidade específica anual média sobre a terra (laranja) e oceano (verde) entre 1979-2003 (NOAA, 2013).	19
Fig. 17 – Humidade relativa anual média sobre a terra de diferentes fontes entre 1979-2003 (NOAA, 2013).	20
Fig. 18 – Bóia de monitorização equipada com um anemómetro de hélice (Phys, 2019).	21
Fig. 19 – Esquema dum sistema de monitorização oceânica alimentado por energia transmitida por uma bóia amarrada (WHOI, 2019).	24
Fig. 20 – Bóia amarrada de vigilância equipada com cameras 360° e um radar.	25
Fig. 21 – Regiões A (a amarelo) e B (a verde) (Chitas, 2017).	26
Fig. 22 – Sistema de balizagem da região A (Chitas, 2017).	26
Fig. 23 – Fotografia de duas bóias amarradas de assinalamento.	27
Fig. 24 – Bóia amarrada de monitorização ODAS (Commerce, 2018).	28
Fig. 25 – Exemplo de uma configuração típica de uma bóia amarrada.	29
Fig. 26 – Bóia amarrada de assinalamento SEALITE (Commerce, 2018).	29
Fig. 27 – SPV <i>drifter</i> e SPV “mini” <i>drifter</i> (NOAA, 2010).	30
Fig. 28 – Esquema do sistema de comunicação de um <i>drifter</i> (NOAA, 2010).	31
Fig. 29 – Distribuição da matriz global de <i>drifters</i> em 2017 (Isern-Fontanet <i>et al.</i> , 2017).	32
Fig. 30 – Exemplo de uma configuração típica de um amarração (WHOI, 2019).	33
Fig. 31 – Pormenor do <i>Profiler</i> de uma amarração (WHOI, 2019).	34
Fig. 32 – Esquema dum Sismómetro de Fundo do Mar (WHOI, 2004).	35
Fig. 33 – Esquema dum Perfilador Hidroacústico de Correntes Doppler (WHOI, 2018).	35
Fig. 34 – Esquema dum ciclo de flutuação Argo (Argo, 2016).	36
Fig. 35 – Esquema dos sistemas anexos a uma plataforma petrolífera (Tideland, 2017).	38
Fig. 36 – Esquema dos sistemas anexos a uma instalação de aquacultura <i>offshore</i> (Aanderaa, 2019).	39

Fig. 37 – Bóia <i>SEALITE Nautilus-2200</i> assinalando o parque eólico <i>Scroby Sands</i> no Reino Unido (Sealite, 2019).	40
Fig. 38 – Vista aérea da <i>wind farm Kentish Flats</i> no Reino Unido (Tideland, 2019)	41
Fig. 39 – Bóia <i>SEAWATCH Wind LiDAR</i> monitorizando um parque eólico <i>offshore</i> localizado na costa da China (Phys, 2019).	41
Fig. 40 – Classificação de dispositivos quanto à distância à linha de costa (André, 2010).	46
Fig. 41 – Classificação de dispositivos de conversão de energia das ondas quanto à orientação em relação às ondas (André, 2010).	47
Fig. 42 – Principais princípios de funcionamento de dispositivos de conversão de energia das ondas: a) Coluna de Água Oscilante, b) Dispositivo de Galgamento, c) Corpos Oscilantes (Ilyas <i>et al.</i> , 2014).	48
Fig. 43 – Mecanismos alternativos de PTO (Drew <i>et al.</i> , 2016).	50
Fig. 44 – Esquema de uma turbina <i>Wells</i> (Takao <i>et al.</i> , 2012).	51
Fig. 45 – Sistema hidráulico típico (Drew <i>et al.</i> , 2016).	52
Fig. 46 – Gerador linear típico (Drew <i>et al.</i> , 2016).	53
Fig. 47 – Gerador magnetohidrodinâmico típico.	53
Fig. 48 – Princípio de funcionamento do TENG por modo por contacto (Barkas <i>et al.</i> , 2019).	54
Fig. 49 – Princípio de funcionamento do TENG por modo deslizante (Barkas <i>et al.</i> , 2019).	55
Fig. 50 – Princípio de funcionamento do TENG por modo deslizante independente (Barkas <i>et al.</i> , 2019).	55
Fig. 51 – Princípio de funcionamento do TENG com uma estrutura de esferas rolantes (Barkas <i>et al.</i> , 2019).	56
Fig. 52 – Graus de liberdade de um corpo sujeito à agitação marítima, adaptado de (Todalshaug, 2017).	60
Fig. 53 – Corpo flutuante (Falnes, 2002).	61
Fig. 54 – Definição dos centros de gravidade e de impulsão e respectivas forças (Journée <i>et al.</i> , 2001).	62
Fig. 55 – Tipos de estabilidade: a) Equilíbrio Estável; b) Equilíbrio Neutro; c) Equilíbrio Instável (Journée <i>et al.</i> , 2001).	63
Fig. 56 – Momento inclinante (Journée <i>et al.</i> , 2001).	64
Fig. 57 – Equilíbrio rotacional para um ângulo de inclinação Φ (Journée <i>et al.</i> , 2001).	65
Fig. 58 – Tipos de Equilíbrio: equilíbrio estável (esquerda) e equilíbrio instável (direita), adaptado de (Moura Paredes, 2008).	66
Fig. 59 – Estabilidade dum corpo flutuante rectangular (Journée <i>et al.</i> , 2001).	66
Fig. 60 – Representação esquemática das condições fronteira (Journée <i>et al.</i> , 2001).	70
Fig. 61 – Representação esquemática duma amarração do tipo catenária (Moura Paredes, 2008).	75
Fig. 62 – Oscilações livres amortecidas: $\xi < 1.0$ (Rosa-Santos, 2010).	79
Fig. 63 – Organograma de funcionamento dos três sistemas utilizados no estudo experimental (adaptado de (Rosa-Santos, 2010).	90
Fig. 64 – Fotografia do tanque de ondas do laboratório de hidráulica da FEUP.	91
Fig. 65 – Esquema do tanque de ondas do laboratório de hidráulica da FEUP (SHRHA, 2018).	92
Fig. 66 – Sistema de geração agitação marítima do Laboratório de Hidráulica da FEUP (Taveira-Pinto <i>et al.</i> , 2007).	92
Fig. 67 – Sala de controlo do tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP.	93
Fig. 68 – Sonda de níveis hidrodinâmicos de haste longa (esquerda), unidade de condicionamento do sinal (direita).	93
Fig. 69 – Câmera ProReflex MCU (esquerda), marcas reflectoras (direita).	94

Fig. 70 – Exemplo de uma recta de calibração da sonda de nível hidrodinâmico obtida no estudo experimental.....	95
Fig. 71 – Instrumentos de calibração do sistema Qualisys.....	96
Fig. 72 – Modelo simplificado.....	97
Fig. 73 – Pormenor da amarração do modelo simplificado.	97
Fig. 74 – Fotografia da bóia SEALITE ATLANTIC 2600.....	98
Fig. 75 – Modelo simplificado no pequeno tanque onde foram realizados os ensaios de extinção.....	99
Fig. 76 – Representação esquemática da experiência de inclinação transversal.....	100
Fig. 77 – Variação da inclinação transversal do modelo simplificado.....	100
Fig. 78 – Vista em 2D da Câmera #1 e #2 do modelo simplificado, <i>software</i> QTM.	101
Fig. 79 – Vista em 3D do modelo simplificado, <i>software</i> QTM.	101
Fig. 80 – Amplitude da oscilação de balanço do modelo simplificado.....	102
Fig. 81 – Espectro resultante da análise de <i>Fourier</i> , para a oscilação de balanço do modelo simplificado.	103
Fig. 82 – Curva de decaimento para a oscilação de balanço do modelo simplificado.	103
Fig. 83 – Amplitude da oscilação de arfagem do modelo simplificado.	104
Fig. 84 – Espectro resultante da análise de <i>Fourier</i> , para a oscilação de arfagem do modelo simplificado.	104
Fig. 85 – Fotografia das diferentes configurações do lastro do modelo simplificado: (a) configuração 1; (b) configuração 2; (c) configuração final.	105
Fig. 86 – Amplitude da oscilação de balanço do modelo simplificado com o peso de lastro adicionado.	106
Fig. 87 – Espectro resultante da análise de <i>Fourier</i> , para a oscilação de balanço do modelo simplificado com o peso de lastro adicionado.	106
Fig. 88 – Fotografia do sistema completo: TENG + <i>datalogger</i> (esquerda) e pormenor do <i>datalogger</i> : sistema de aquisição + bateria (direita).	107
Fig. 89 – Arranjo do sistema TENG no interior do modelo simplificado.	108
Fig. 90 – Fotografia da inclinação apresentada pelo modelo simplificado para a configuração inicial do TENG.	109
Fig. 91 – Impressão da peça côncava (esquerda) e peça côncava já completa (direita).....	109
Fig. 92 – <i>Design</i> inicial do TENG (esquerda) e <i>design</i> final do TENG após as alterações mencionadas (direita).	110
Fig. 93 – Esquema do <i>setup</i> experimental.....	110
Fig. 94 – Localização da bóia de Leixões (ponto L) (LNEC, 2017).	112
Fig. 95 – Distribuição conjunta de H_s , T_z e T_p . Dados da bóia de Leixões (ponto L) (LNEC, 2017)...	113
Fig. 96 – Síntese das metodologias paramétricas para previsão da altura e do período de onda da agitação gerada pelo vento (Gomes, 2014).	114
Fig. 97 – Síntese das metodologias paramétricas utilizadas para previsão da altura de onda gerada pela passagem de embarcações (Gomes, 2014).....	115
Fig. 98 – Condições de teste vs. Condições limite da instalação experimental para ondas regulares.	118
Fig. 99 – Condições de teste vs. Condições limite da instalação experimental para ondas irregulares.	119
Fig. 100 – Modelo simplificado livre (esquerda) e modelo simplificado amarrado (direita).	119
Fig. 101 – Variação da amplitude das oscilações de balanço (a) e arfagem (b) do modelo simplificado livre.....	120

Fig. 102 – Variação da amplitude das oscilações de balanço (a) e arfagem (b) do modelo simplificado amarrado.	121
Fig. 103 – Espectro resultante da análise de <i>Fourier</i> , para a oscilação de balanço do modelo simplificado livre (a) e amarrado (b).....	122
Fig. 104 – Espectro resultante da análise de <i>Fourier</i> , para a oscilação de arfagem do modelo simplificado livre (a) e amarrado (b).....	123
Fig. 105 – Série temporal da elevação da superfície livre da água. Agitação regular: $T = 6$ s; $H = 2$ m (valores em protótipo).	125
Fig. 106 – Série temporal da rotação de balanço do modelo simplificado. Agitação regular: $T = 6$ s; $H = 2$ m (valores em protótipo).	125
Fig. 107 – Série temporal do deslocamento vertical de arfagem do modelo simplificado. Agitação regular: $T = 6$ s; $H = 2$ m (valores em protótipo).	125
Fig. 108 – Curva do factor de amplificação dinâmica de balanço para a altura de onda de $H = 0.75$ m (valores em protótipo).	126
Fig. 109 – Curva do factor de amplificação dinâmica de arfagem para a altura de onda de $H = 0.750$ m (valores em protótipo).	127
Fig. 110 – Curva do factor de amplificação dinâmica de balanço para a altura de onda de $H = 2.00$ m (valores em protótipo).	128
Fig. 111 – Curva do factor de amplificação dinâmica de arfagem para a altura de onda de $H = 2.00$ m (valores em protótipo).	128
Fig. 112 – Comparação das curvas do factor de amplificação dinâmica de balanço para as duas alturas de onda testadas (valores em protótipo).....	129
Fig. 113 – Comparação das curvas do factor de amplificação dinâmica de arfagem para as duas alturas de onda testadas (valores em protótipo).....	129
Fig. 114 – Série temporal da elevação da superfície livre da água. Agitação irregular: $T = 11$ s; $H = 2.5$ m.....	130
Fig. 115 – Série temporal da amplitude dos movimentos de balanço do modelo simplificado. Agitação irregular: $T = 11$ s; $H = 2.5$ m (valores em modelo).	130
Fig. 116 – Série temporal da amplitude dos movimentos de arfagem do modelo simplificado. Agitação irregular: $T = 11$ s; $H = 2.5$ m (valores em modelo).	131
Fig. 117 – Análise espectral da: (a) da agitação marítima e oscilações de balanço e (b) factor de amplificação dinâmica. Agitação irregular: $T_P = 7.1$ s; $H = 0.5$ m (valores em protótipo)....	132
Fig. 118 – Análise espectral da: (a) da agitação marítima e oscilações de balanço e (b) factor de amplificação dinâmica. Agitação irregular: $T_P = 7.1$ s; $H = 1.5$ m (valores em protótipo)....	133
Fig. 119 – Análise espectral (a) da agitação marítima e oscilações de balanço e (b) factor de amplificação dinâmica. Agitação irregular: $T_P = 8.4$ s; $H = 1.5$ m (valores em protótipo)....	134
Fig. 120 – Análise espectral (a) da agitação marítima e oscilações de balanço e (b) factor de amplificação dinâmica. Agitação irregular: $T_P = 9.7$ s; $H = 2.5$ m (valores em protótipo)....	135
Fig. 121 – Comparação entre os factores de amplificação dinâmica obtidos nos testes de agitação marítima irregular (valores em protótipo).	136
Fig. 122 – Série temporal da tensão gerada pelo TENG. Agitação regular: $T = 0.83$ s; $H = 0.100$ m.	138
Fig. 123 – Tensão gerada por onda para os testes realizados com agitação regular com altura de onda de 0.038 m (valores em modelo).	138
Fig. 124 – Tensão gerada por onda nos testes realizados com agitação regular e uma altura de onda de 0.100 m.	139

Fig. 125 – Média dos picos de tensão e média do integral da área total para os testes de agitação regular com altura de onda de 0.038 m (valores em modelo).....	140
Fig. 126 – Potência máxima dos testes de agitação regular com altura de onda de 0.038 m (valores em modelo).	141
Fig. 127 – Média dos picos de tensão e média do integral da área total para os testes de agitação regular com altura de onda de 0.100 m (valores em modelo).....	142
Fig. 128 – Potência máxima dos testes de agitação regular com altura de onda de 0.100 m (valores em modelo).	142
Fig. 129 – Comparação dos <i>outputs</i> de voltagem (mV) para as diferentes alturas de onda testadas (agitação marítima irregular).....	144
Fig. 130 – Comparação da largura de captura relativa para as diferentes alturas de onda testadas (agitação marítima irregular).....	145
Fig. 131 – Série temporal da tensão gerada pelo TENG com a configuração final. Agitação irregular: $T_P = 1.88$ s; $H_{mo} = 0.125$ m (valores em modelo).	146
Fig. 132 – Série temporal da tensão gerada pelo TENG com a configuração inicial. Agitação irregular: $T_P = 1.88$ s; $H_{mo} = 0.125$ m (valores em modelo).	147
Fig. 133 – Célula de carga (esquerda) e sistema de aquisição de dados da célula de carga (direita).	148
Fig. 134 – Recta obtida na calibração da célula de carga.	148
Fig. 135 – Ensaio 1 ($H=0.100$ m e $T= 0.71$ s, modelo). Valores medidos na célula de carga.	149
Fig. 136 – Ensaio 2 ($H=0.100$ m e $T= 0.73$ s, modelo). Valores medidos na célula de carga.	149
Fig. 137 – Forças aplicadas no cabo de amarração. Ensaio 3 ($H=0.100$ m e $T= 0.83$ s, modelo).	149
Fig. 138 – Forças aplicadas no cabo de amarração. Ensaio 4 ($H=0.038$ m e $T=0.63$ s, modelo).	149
Fig. 139 – Forças aplicadas no cabo de amarração. Ensaio 5 ($H=0.038$ m e $T=0.73$ s, modelo).	150
Fig. 140 – Forças aplicadas no cabo de amarração. Ensaio 6 ($H=0.038$ e $T=0.83$ s, modelo).	150

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre nanogeradores triboelétricos, células solares policristalinas e células solares de película fina.	43
Tabela 2 – Forças e Momentos que actuam sobre um corpo flutuante.	71
Tabela 3 – Exemplos de aplicação de alguns critérios de semelhança (Taveira-Pinto, 2012).	87
Tabela 4 – Factores de escala geométricos, cinemáticos e dinâmicos obtidos com base na semelhança de Froude.	89
Tabela 5 – Resultados da experiência da inclinação transversal.	100
Tabela 6 – Resultados da experiência de determinação do período natural da oscilação de balanço (apenas modelo simplificado).	105
Tabela 7 – Resultados da experiência de determinação do período natural da oscilação de arfagem (apenas modelo simplificado).	105
Tabela 8 – Resultados da experiência de determinação do período natural da oscilação de balanço (modelo simplificado com peso de lastro).	106
Tabela 9 – Estatísticas das series totais de H_s e T_z , com base em dados medidos pela bóia de Leixões (LNEC, 2017).	113
Tabela 10 – Alturas de onda significativa, H_s , e períodos de onda associados, T_s , e períodos de onda de pico T_P , para um ponto central da albufeira de Crestuma-Lever (Gomes, 2014).	115
Tabela 11 – Metodologias paramétricas para o cálculo da altura de onda de interferência para as embarcações Douro <i>Queen</i> (Gomes, 2014).	116
Tabela 12 – Metodologias paramétricas para o cálculo da altura de onda de interferência para as embarcações Douro <i>Cruiser</i> (Gomes, 2014).	116
Tabela 13 – Metodologias paramétricas para o cálculo da altura de onda de interferência para as embarcações de recreio (Gomes, 2014).	116
Tabela 14 – Plano de ensaios da primeira fase do estudo – Estado de agitação regular.	117
Tabela 15 – Plano de ensaios da segunda fase do estudo – Estado de agitação irregular.	118
Tabela 16 – Síntese dos resultados dos ensaios sem ondas com modelo livre e amarrado (valores em modelo).	124
Tabela 17 – Síntese dos resultados do estudo da curva do factor de amplificação dinâmica para uma altura de onda de $H = 0.750$ m.	127
Tabela 18 – Síntese dos resultados do estudo da curva do factor de amplificação dinâmica para uma altura de onda de $H = 2.00$ m.	128
Tabela 19 – Síntese das alturas de onda obtidas nos testes com agitação irregular (valores em modelo).	131
Tabela 20 – Síntese das frequências de pico e dos factores de amplificação dinâmico de balanço obtidos para os testes com agitação irregular (valores em protótipo).	137
Tabela 21 – Síntese dos resultados das tensões geradas nos ensaios com agitação regular e uma altura de onda de $H = 0.038$ m (valores em modelo).	139
Tabela 22 – Síntese dos resultados da tensão gerada nos ensaios com agitação regular e uma altura de onda de $H = 0.100$ m (valores em modelo).	140
Tabela 23 – Síntese dos resultados: potência máxima, densidade de potência e energia. Agitação regular, altura de onda de $H = 0.038$ m (valores em modelo).	141
Tabela 24 – Síntese dos resultados: potência máxima, densidade de potência e energia. Agitação regular, altura de onda de $H = 0.100$ m (valores em modelo).	143
Tabela 25 – Síntese dos resultados obtidos nos ensaios com agitação irregular.	143
Tabela 26 – Tabela comparativa dos ensaios com condições de agitação marítima irregular.	144

Tabela 27 – Tabela comparativa da largura de captura relativa dos ensaios com condições de agitação marítima irregular.....	146
Tabela 28 – Comparação dos resultados obtidos para as duas configurações do TENG. Agitação irregular: $T_P = 1.89$ s; $H_{m0} = 0.125$ m (valores em modelo).....	147
Tabela 29 – Forças aplicadas no cabo de amarração nos testes considerados válidos (valores em modelo).....	150
Tabela 30 – Forças aplicadas no cabo de amarração nos testes considerados válidos (valores em protótipo).....	151

SÍMBOLOS

$\bar{A}_{kj}$ – Coeficiente de massa adicional;

$\bar{B}_{kj}$ – Coeficiente de amortecimento por radiação;

$\vec{F}_D$ – Força das ondas de difracção no corpo fixo;

$\vec{F}_R$ – Força de radiação do movimento oscilatório do corpo em águas em repouso;

$\vec{F}_S$ – Força de impulsão exercida no corpo flutuante;

$\vec{F}_W$ – Força das ondas incidentes no corpo fixo;

$\bar{F}_e$ – Forças elásticas;

$\bar{F}_g$ – Forças devidas à aceleração da gravidade;

$\bar{F}_i$ – Forças de inércia;

$\bar{F}_{pr}$ – Forças de pressão;

$\bar{F}_\mu$ – Forças de viscosidade;

$\bar{F}_\sigma$ – Forças de tensão superficial;

$\vec{M}_D$ – Momento das ondas de difracção no corpo fixo;

$\vec{M}_R$ – Momento de radiação do movimento oscilatório do corpo em águas em repouso;

$\vec{M}_S$ – Momento de impulsão exercido no corpo flutuante;

$\vec{M}_W$ – Momento das ondas incidentes no corpo fixo;

$\ddot{x}_j$ – Aceleração do corpo flutuante segundo o modo de oscilação j ;

$\dot{x}_j$ – Velocidade do corpo flutuante segundo o modo de oscilação j ;

h_c – Calado da bóia devido à pré-tensão e peso da amarra;

$\vec{\Omega}$ – Vector velocidade angular dum corpo flutuante;

A_{33} – Massa adicionada segundo o modo de oscilação de arfagem em fase com a aceleração dessa oscilação;

A_{44} – Momento de inércia adicionado para o modo de oscilação de balanço em fase com a aceleração angular dessa oscilação;

A_{WL} – Área do plano de água;

A_{kj} – Matriz de inércia adicionada para frequência infinita;

B_{33} – Momento de amortecimento hidrodinâmico para o modo de arfagem associado à velocidade angular dessa oscilação;

B_{44} – Momento de amortecimento hidrodinâmico para o modo de balanço associado à velocidade angular dessa oscilação;

B_ϕ – Centro de impulsão para o ângulo de inclinação ϕ ;

C_A – Coeficiente da área no plano de água;

C_B – Coeficiente de bloco;

- D – Coeficiente de arrastamento do corpo flutuante;
- C_I – Coeficiente de massa adicionada do corpo flutuante;
- C_{kj} – Matriz de restituição hidrostática;
- F_H – Componente horizontal da força da amarra;
- F_V – Componente vertical da força da amarra;
- $F_{k,f}$ – Qualquer uma das n forças externas a actuar nesse elemento;
- F_k – Forças e momentos exteriores que actuam na bóia segundo o modo k .
- $\overline{GM}_l$ – Altura metacêntrica longitudinal;
- $\overline{GM}_t$ – Altura metacêntrica transversal;
- $\overline{GN}_\phi$ – Altura metacêntrica;
- $H_{m\acute{a}x}$ – Altura de onda máxima que pode ser gerada numa profundidade de água sem rebentação;
- I_T – Momento de inércia do plano de água;
- I_∇ – Impulsão;
- K_{11} – Coeficiente de restituição para o modo de oscilação de avanço;
- K_{33} – Coeficiente de restituição para o modo de oscilação de arfagem;
- K_{55} – Coeficiente de restituição para o modo de oscilação de cabeceio;
- K_R – Coeficiente de decaimento do modo de oscilação de balanço
- M_H – Momento inclinante;
- M_S – Momento endireitante;
- M_{kj} – Matriz de massas e momentos de inércia;
- N_ϕ – Metacentro;
- $P_{m\acute{a}x}$ – Potência máxima gerada;
- R_{kj} – Funções de resposta a impulso,
- $T_{R,d}$ – Período natural das oscilações harmónicas de balanço com amortecimento;
- T_R – Período natural das oscilações harmónicas de balanço;
- $\vec{U}$ – Vector velocidade dum corpo flutuante;
- X_{Sk} – Componente das forças e dos momentos hidroestáticos;
- X_m – Grandeza no modelo;
- X_p – Grandeza no protótipo;
- X_{rkj} – Força ou momento de radiação;
- a_{kj} – Matriz de massas e momentos de inércia adicionados;
- b_{kj} – Matriz de amortecimento;
- d_1 – Deslocamento arbitrário para o modo de oscilação de avanço;

- d_5 – Deslocamento arbitrário para o modo de oscilação de cabeceio;
- i_x – Raio de giração transversal;
- $\vec{n}$ – Vector unitário normal à superfície submersa orientado para o interior do corpo;
- $\vec{r}$ – Vector posição da superfície dS no sistema de coordenadas $O(x, y, z)$;
- $u_j(t)$ – Velocidade de oscilação do corpo na direcção j ;
- x_j – Amplitude do deslocamento do corpo flutuante segundo o modo de oscilação j .
- Φ_A – Potencial relacionado com a existência de ondas incidentes e sua interacção com o corpo.
- Φ_D – Potencial relacionado com a perturbação que o corpo induz na onda incidente;
- Φ_R – Potencial de radiação do movimento oscilatório do corpo flutuante em águas em repouso;
- Φ_{Rj} – Potencial de radiação devido a um movimento unitário forçado na direcção j ;
- Φ_{Rk} – Potencial de radiação devido a um movimento unitário forçado na direcção k ;
- Φ_W – Potencial relacionado com a onda incidente antes de sofrer perturbações devidas à presença do corpo;
- Φ_d – Potencial de difracção das ondas no corpo estacionário;
- Φ_j – Potenciais desconhecidos;
- λ_R – Constante;
- λ_x – Factor de escala;
- ξ_j – Amplitude complexa do deslocamento no grau de liberdade j ;
- ω_H – Frequência angular natural do modo de oscilação de arfagem;
- ω_R – Frequência angular natural do modo de oscilação de balanço;
- ΔT – Aumento do calado do corpo flutuante;
- A – Amplitude da onda incidente;
- A – Área do corpo que se opõe ao escoamento;
- B – Centro de impulsão inicial;
- Ca – Número de *Cauchy*;
- dS – Elemento infinitesimal;
- dz – Fatias do corpo flutuante;
- Eu – Número de *Euler*;
- Fr – Número de *Froude*;
- g – Aceleração da gravidade;
- h – Altura de água;
- L – Dimensão característica;
- M – Massa da bóia;
- M – Metacentro inicial para $\Phi=0^\circ$;

p – Pressão (força/área);
 Re – Número de *Reynolds*;
 S – área da superfície submersa dum corpo flutuante;
 s – Comprimento da amarra até uma dada abcissa;
 St – Número de *Strouhal*;
 u – Amplitude da velocidade horizontal do fluido;
 U – Velocidade do escoamento;
 V – Tensão eléctrica medida;
 V_{oc} – Média dos picos de tensão eléctrica;
 Vol – Volume do corpo que se opõe ao escoamento;
 W – Peso da bóia;
 We – Número de *Weber*;
 $\eta(t)$ – Níveis instantâneos de elevação da superfície livre da água;
 τ – Direcção da onda;
 A – Área de contacto entre as esferas e o nano-material;
 AE/l – Rigidez axial do cabo de amarração;
 E – Energia produzida;
 L – Comprimento de onda;
 P – Potência gerada;
 P – Pré-tensão do cabo de amarração (definido como $W/2$);
 R – Resistência equivalente do circuito;
 S – Densidade de potência;
 T – Calado;
 W – Peso da bóia;
 d – Profundidade de água;
 dt – Intervalo de tempo considerado;
 l – Comprimento do cabo de amarração;
 m – Massa do elemento (neste caso o fluido);
 t – Tempo
 w – Peso submerso da amarra;
 ϕ – Ângulo de inclinação;
 ∇ – Volume da parte submersa do corpo flutuante;
 ∇ – Volume de água deslocada pelo corpo flutuante;

γ – Factor correctivo;
 ε – Módulo de elasticidade de volume;
 μ – Coeficiente de viscosidade dinâmica;
 ν – Coeficiente de viscosidade cinemática;
 ρ – Massa volúmica do fluido;
 σ – Tensão superficial;
 τ – Tempo;
 ω – Frequência angular;

ACRÓNIMOS

ADCP – Acoustic Doppler Current Profiler
AIS – Automatic Identification System
CAF – Factor de Ajuste Cambial
CTD – Conductivity, Temperature and Depth
DBCP – Data Buoy Cooperation Panel
DEC – Departamento de Engenharia Civil
DO – Dissolved Oxygen
FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
GDP – Global Drifter Program
GPS – Global Positioning System
GTS – Global Telecommunication System
IALA – International Association of Aids to Navigation and Lighthouse Authority
IMO – International Maritime Organization
IMOS – Integrated Marine Observing System
INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
IOI – International Ocean Institute
LIDAR – Light Detection and Ranging
MIEC – Mestrado Integrado em Engenharia Civil
NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration
NOS – National Ocean Service
NWS – National Weather Service
OBS – Ocean-Bottom Seismometer

OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico

ODAS – Ocean Data Acquisition Systems,

OOI – Ocean Observatories Initiative

OWC – Oscillating Water Column

PTO – Power Take-Off

PTT – Platform Terminal Transmitter

RAO – Response Amplitude Operator

SSS – Sea Surface Salinity

SST – Sea Surface Temperature

SVP – Surface Velocity Program

TENG – Triboelectric Nanogenerator

WAB –Wave Activated Bodies

WEC –Wave Energy Converters

WHOI – Woods Hole Oceanographic Institution

WMO – World Meteorological Organization

ABREVIATURAS

Dept – Departamento

e. g. – *exempli gratia*

Fig – Figura

i. e. – *id est*

Ref – Referência

Tab – Tabela

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

O oceano regula o clima global, fornece aos seres humanos recursos naturais como alimentos, materiais, substâncias importantes e energia, e é essencial para o comércio internacional e actividades recreativas e culturais. Juntamente com o desenvolvimento humano e o crescimento económico, o livre acesso e a disponibilidade de recursos e serviços oceânicos têm exercido uma forte pressão sobre os sistemas marinhos, desde a sobrepesca, o aumento da extracção de recursos e a alteração das zonas costeiras até vários tipos de poluição irreflectida.

A definição de um objectivo para o desenvolvimento sustentável dos oceanos é essencial assim como a criação de um conjunto abrangente de objectivos de sustentabilidade e de indicadores eficazes, desenvolvidos no âmbito de um processo global de planeamento espacial de forma a auxiliar na avaliação do estado actual dos sistemas marinhos, a diagnosticar as tendências actuais e a fornecer informações para uma governação dos oceanos inclusiva, prospectiva e sustentável. Neste contexto, as instalações e equipamentos *offshore* podem ter um papel muito relevante na medida em que garantem eficazmente a monitorização, vigilância e assinalamento do ambiente dinâmico dos oceanos e dos parâmetros ecológicos, e são também uma infraestrutura essencial para a exploração dos recursos oceânicos.

Com a exploração do oceano a estender-se até ao oceano aberto e profundo, e sendo esta monitorização um processo a longo prazo, as instalações e equipamentos *offshore* tem de garantir aprovisionamento energético adequado, muito importante para o funcionamento normal de todos os sensores e instrumentação. É fundamental que estes dispositivos tenham um baixo custo de manutenção e alta fiabilidade também. Actualmente é utilizada principalmente a bateria como fonte de energia dos equipamentos *offshore*. Esta tem de ser substituída frequentemente quando a sua potência é baixa, o que se torna bastante dispendioso especialmente quando o equipamento está num local de remoto e difícil acesso. Embora se tenham feito estudos com vista a estender a vida útil das baterias do ponto de vista da eficiência energética isso não resolve o problema dos limites de potência.

O fornecimento de energia pode ser garantido, também, através painéis solares associados a baterias, mas mais uma vez que este tipo de tecnologia tem bastantes condicionantes o que restringe a quantidade e o desempenho dos instrumentos.

O recurso a energia das ondas oferece uma maneira conveniente, e possivelmente mais eficiente, para que as instalações e equipamentos *offshore* se tornem autossuficientes em termos energéticos. Assim sendo, a presente dissertação, visa o estudo experimental, em tanque de ondas, de uma tecnologia inovadora que permite tornar os equipamentos utilizados na monitorização, assinalamento e vigilância

do oceano energeticamente autossuficientes e autónomos, em particular, será testado em modelo físico a integração de um nanogerador triboelétrico numa bóia de navegação *offshore*. Este trabalho enquadra-se no âmbito do Projecto “*I.nano.WEC – Innovative nano-technology for Wave Energy Conversion*” (FA 02 2017 002). Este projecto procura desenvolver nanogeradores triboelétricos inovadores e altamente eficientes desenvolvidos para aplicações no sector de conversão de energia de ondas.

1.2. ESTRUTURA E OBJECTIVOS DA DISSERTAÇÃO

No capítulo 1, introdutório, expõem-se brevemente os principais recursos do oceano e os equipamentos *offshore* de assinalamento, vigilância e monitorização que a eles estão associados. Procurou-se também referir a importância da monitorização das variáveis oceânicas e das variáveis meteorológicas à superfície do oceano, tendo por base conceitos como o desenvolvimento sustentável, e descrevendo o conjunto de sensores necessários para quantificar e avaliar estas variáveis. Sensores estes que, em teoria, podem obter a sua energia através do uso de nanogeradores triboelétricos.

O capítulo 2 procura descrever os principais equipamentos e instalações *offshore*, referindo o seu modo de funcionamento e as suas aplicações, procurando transmitir que estes equipamentos possuem algumas limitações energéticas que podem, em teoria, ser resolvidas através dos nanogeradores triboelétricos.

O capítulo 3 detalha os sistemas convencionais de conversão de energia das ondas, segundo os métodos mais comuns de extracção dessa energia, para que, por comparação com o sistema em estudo, detalhado também neste capítulo, se possa compreender a sua inovação, as suas qualidades e a sua eficiência de conversão da energia das ondas.

No capítulo 4 é feita uma exposição da teoria relativa à dinâmica de corpos flutuantes, importante no entendimento da resposta do modelo simplificado à agitação marítima. Compreendendo as fórmulas que determinam o período natural desses corpos para os diferentes modos de oscilação em estudo é possível *a posteriori* testar esses mesmos períodos de onda no estudo experimental, potenciando o *output* energético do nanogerador triboelétrico.

No capítulo 5 foi desenvolvido o estudo experimental. Após uma breve introdução teórica, referente à modelação física, foi descrita a instalação experimental utilizada no estudo do modelo simplificado, o processo construtivo desse mesmo modelo e os procedimentos experimentais. Através da análise de condições reais de agitação marítima e de agitação fluvial de diferentes locais foi elaborado um plano de ensaios e, por fim, após o cumprimento deste plano, foi feita a análise detalhada dos resultados obtidos.

No capítulo 6 considerações finais, conclusões e desenvolvimentos futuros, conclui-se o presente estudo, apontando as dificuldades encontradas, as melhorias no desenvolvimento do nanogerador triboelétrico e delineando futuros estudos sobre o tópico.

No anexo A são descritas múltiplas bóias oceânicas reais de assinalamento e monitorização através das suas principais características técnicas como a função, dimensão, telemetria, energia/consumos, etc. No anexo B são descritos os vários sensores oceânicos, referidos ao longo do presente estudo, através das suas principais características técnicas como a função, dimensão, telemetria, energia/consumos, etc. No anexo C estão descritos os ensaios elaborados.

Concluindo, o presente trabalho, tem como principal objectivo desenvolver e testar experimentalmente um sistema inovador conversor da energia das ondas, o TENG (*triboelectric nanogenerator*), através de um conjunto de testes experimentais no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, com

o auxílio dum modelo físico simplificado duma bóia oceânica usada para assinalamento, à escala geométrica 1/20, para que se possa confirmar a viabilidade do sistema em questão, e apresentar possíveis melhorias e alterações no mesmo.

1.3. RECURSOS DOS OCEANOS

A gestão dos oceanos requer uma abordagem global, pois o oceano é comum a todos. Embora muitos outros problemas globais possam ser resolvidos através da coordenação da acção local, a governação sustentável dos oceanos é demasiado complexa e envolve vários interesses potencialmente conflituosos para serem deixados para abordagens fragmentadas. Embora as abordagens regionais cooperativas sejam importantes para a implementação da legislação e das políticas, não são adequadas para fornecer o quadro geral. Os interesses envolvem questões cruciais como a pesca, a exploração *offshore* de petróleo e gás, as energias renováveis dos oceanos, o transporte marítimo e o turismo (Visbeck *et al.*, 2014).

Assim sendo, é necessário compreender a vastidão de diferentes recursos que os oceanos fornecem para, por sua vez, se perceber a importância e necessidade da utilização de diferentes equipamentos *offshore* de monitorização, vigilância e assinalamento tendo em vista uma exploração adequada desses mesmos recursos.

Os oceanos são uma componente crítica no suporte de vida dos sistemas terrestres, sendo o principal regulador do clima global, absorvendo cerca de 90% do aquecimento da Terra e cerca de 30% das emissões antropogénicas de dióxido de carbono. Ecossistemas marinhos saudáveis fornecem serviços como filtragem de água, reciclagem de nutrientes, áreas recreativas e apoio à biodiversidade. Os oceanos também fornecem mais de metade do oxigénio que os seres humanos respiram (Recuero Virto, 2018). Para assegurar oceanos saudáveis é vital alcançar o desenvolvimento sustentável.

O desenvolvimento sustentável é definido como:

“O desenvolvimento que procura satisfazer as necessidades da geração actual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem o seu próprio desenvolvimento social e económico e de realização humana e cultural, fazendo, ao mesmo tempo, um uso razoável dos recursos da terra e preservando as espécies e os habitats naturais” (OCDE 1999).

Considerando assim que, o desenvolvimento sustentável, assenta no uso equilibrado dos recursos, e na preservação desses mesmos recursos, para garantir qualidade e bem-estar a longo prazo e tendo em conta que são necessárias soluções globais coordenadas, focadas em objectivos de desenvolvimento sustentável das zonas costeiras e oceanos, ou seja, a existência de políticas e convenções internacionais específicas para implementação a nível nacional (Visbeck *et al.*, 2014), torna-se necessário monitorizar o oceano e os seus recursos através de meios *in situ* por forma a garantir que estas normas e objectivos para o desenvolvimento sustentável sejam cumpridos.

1.3.1. TRANSPORTE MARÍTIMO

O transporte marítimo de mercadorias tem sido amplamente utilizado ao longo da história registada e está em franca expansão, este é mais barato do que o transporte por via aérea, apesar das flutuações das taxas de câmbio e da aplicação de uma taxa adicional às taxas de frete para as empresas de transporte, conhecida como factor de ajuste cambial (CAF). É uma indústria altamente globalizada, tanto na operação como na propriedade (Rodrigues, 2010). O impacto ambiental do transporte marítimo inclui emissões de gases de efeito estufa, acústica e poluição por petróleo. A Organização Marítima

Internacional (IMO) estima que as emissões de dióxido de carbono do transporte marítimo foram equivalentes a 2,2% das emissões globais causadas pelo homem em 2012 e espera que elas aumentem 50 a 250% até 2050, se nenhuma acção for tomada (IMO, 2015). São empregues todo o tipo de equipamentos *offshore* relacionados com o transporte marítimo. Este é auxiliado por sistemas de assinalamento, como as bóias de navegação, Fig. 1, que se destinam a assinalar perigos específicos de determinadas zonas da costa, e ajudar nas aproximações a portos, barras de rios, fundeadouros, aconselhando determinados procedimentos no sentido de aumentar o grau de segurança das embarcações. Estas bóias são tipicamente construídas como um casco circular, e dotadas de uma luz central para proporcionar visibilidade panorâmica e uma buzina de nevoeiro, podendo igualmente ter estações de comunicação via satélite.

Por outro lado, existem variados sistemas de monitorização ambiental que também estão associados ao transporte marítimo, bem como dispositivos de recuperação mecânica de derramamento de óleo (*skimmers*) que permitem recuperar óleo acidentalmente libertado no oceano. As bóias de monitorização equipadas com estações meteorológicas, correntómetros, e ondógrafos permitem obter todas as informações necessárias para garantir que a navegação marítima se execute em segurança, pois permitem a preparação de planos de contingência, modelos operacionais e previsões, onde quer que as actividades *offshore* sejam conduzidas.



Fig. 1 – Navio de Contentores e bóia de navegação (Almarin, 2019).

1.3.2. PESCA

A pesca nos oceanos é uma actividade humana bastante significativo na medida em que proporciona emprego directo a cerca de 200 milhões de pessoas e o pescado representa 19% do consumo humano total de proteínas animais (Botsford *et al.*, 1997), ou seja, é uma importante fonte de proteína para uma grande parte da população mundial. O peixe é um recurso renovável, mas pode desaparecer se não for bem gerido. Os recursos pesqueiros em todo o mundo estão ameaçados pela sobre-exploração. Mais de 75% da produção mundial de peixe é utilizada para consumo humano directo. O mercado mundial de peixe e óleo de peixe deverá atingir um valor de 14,28 mil milhões de dólares até 2022 (Kumar *et al.*, 2019). O artigo 61º da Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (UNCLOS) e a Conservação dos Recursos Vivos estabelecem que o Estado costeiro, tendo em conta as melhores provas científicas de que dispõe, deve assegurar, através de medidas adequadas de conservação e gestão, que a manutenção dos recursos vivos na zona económica exclusiva não seja ameaçada pela sobre-exploração (Kumar *et al.*, 2019). Assim sendo, para além dos mesmos equipamentos de assinalamento que se

aplicam no transporte marítimo, a pesca envolve diversos equipamentos *offshore* de monitorização para que este artigo seja cumprido, Fig. 2. Equipamentos estes providos de sistemas multisensores, que integram diferentes sensores físico-químicos para medir a temperatura, salinidade, oxigénio dissolvido, pH, mas também sistemas de imagem de alta resolução, que recolhem imagens de fito e zooplâncton, para avaliar a sua abundância e biodiversidade, e sistemas de acústica, com capacidade de fazer recolha de dados hidroacústicos, como informação para avaliar a presença de mamíferos marinhos e fazer estimativas sobre a abundância de peixes (MarinEye, 2017).



Fig. 2 – Navio de pesca e bóia de monitorização (IMOS, 2019).

1.3.3. AQUACULTURA OFFSHORE

A sobreexploração da pesca natural levou ao quase esgotamento deste recurso marítimo. A aquacultura é uma forma de produção de alimentos marítimos alternativa e em rápido crescimento, Fig. 3, que tem produzido com sucesso uma quantidade substancial de peixes e mariscos para ajudar a alimentar a crescente população mundial. No entanto, este método de produção de alimentos é confrontado com muitos desafios, alguns dos quais incluem o aumento dos custos, regulamentos governamentais mais rigorosos, e limitado abastecimento de água. Esses desafios criaram a necessidade de desenvolver tecnologia avançada de monitorização e alimentação, a fim de criar condições de crescimento controladas e sustentáveis. Assim sendo, os sistemas de monitorização ambiental são essenciais na aquacultura. A informação é utilizada pelas explorações aquícolas para planear e ajustar também a alimentação, evitando assim o derramamento de alimentos, bem como para garantir as condições adequadas para a manutenção das espécies da exploração em questão. Estes sistemas monitorizam as velocidades e direcções da corrente, temperatura da água, salinidade, turbidez e oxigénio dentro e fora das jaulas, pH da clorofila, entre outros. (Aanderaa, 2019). Para além dos dispositivos de monitorização referidos, também são necessários dispositivos normais de vigilância e assinalamento nestas instalações *offshore*.



Fig. 3 – Exploração de aquacultura *offshore* (iStockphoto, 2019).

1.3.4. EXPLORAÇÃO OFFSHORE DE PETRÓLEO E GÁS

O petróleo é a maior fonte de energia primária do mundo, estimando-se que as actuais reservas mundiais de petróleo rondem os 1,650 mil milhões de barris. O petróleo bruto é uma mistura complexa de compostos de hidrocarbonetos encontrados na rocha subterrânea que levou milhões de anos a ser criado. O petróleo bruto natural extraído por perfuração profunda em zonas *offshore* não é muito útil no seu estado natural, necessitando de ser refinado. (Kumar *et al.*, 2015). A produção de gás natural é biogénica e similar à do petróleo bruto. É uma mistura de hidrocarbonetos constituída principalmente por metano (CH₄).

A perfuração *offshore* é uma técnica de extracção que permite ter acesso a depósitos de petróleo ou gás natural sob o fundo do oceano, oferecendo acesso a reservas anteriormente inexploradas. Os locais de perfuração *offshore* situam-se normalmente sobre a plataforma continental e o tipo de plataforma usado na perfuração depende da profundidade do local, do tipo de petróleo ou gás e das condições prevalentes.

Estas perfurações causam bastantes impactes ambientais, sendo os derrames de petróleo em torno das plataformas comuns, especialmente no fundo do mar, onde a perfuração pode estimular a infiltração, tanto de petróleo como de metais potencialmente pesados. A perfuração de petróleo *offshore* também perturba a ecologia do oceano onde a perfuração está localizada. Assim, é necessário um conjunto de equipamentos de monitorização dos impactos oceânicos causados por estas plataformas, Fig. 4, assim como equipamentos de recuperação mecânica de derramamento de óleo. Estes equipamentos fornecem, também, às empresas de petróleo e gás informações ambientais em tempo real, o que lhes permite tomar decisões mais precisas e oportunas que afectam as operações da plataforma, a segurança das equipas e o ambiente local. Os dados meteorológicos em tempo real permitem que o pessoal esteja constantemente ciente dos perigos potenciais, tais como o aumento da velocidade das correntes, velocidade do vento ou alturas de onda (Technologies, 2019).

Finalmente, são também necessários equipamentos de assinalamento na plataforma, como lanternas, sinais de nevoeiro, radares, sistemas de monitorização de curto alcance e bóias de navegação por forma a garantir a segurança no transporte e navegação marítima passageira (Student-Energy, 2018).



Fig. 4 – Bóia de Monitorização e plataforma petrolífera (Technologies, 2019).

1.3.5. ENERGIA EÓLICA OFFSHORE

O sector eólico é actualmente uma das principais fontes de produção de energia renovável. Como o recurso eólico é abundante e consistente em muitas regiões, pode fornecer uma produção de energia confiável, estima-se que a potencia media anual eólica extraível globalmente seja equivalente a 2-6 TW (Wang *et al.*, 2018). Embora os combustíveis fósseis continuem a fornecer a maior parte das necessidades energéticas em todo o mundo, a energia eólica *offshore* faz parte energias alternativas, ambientalmente correctas e socialmente sustentáveis que se devem desenvolver e implementar continuamente (Ahsan *et al.*, 2019). Nesse enquadramento foram desenvolvidas por todo o mundo vários parques eólicos *offshore* pois os ventos marítimos tendem a soprar com mais força e uniformidade que em terra. A energia potencial produzida pelo vento é directamente proporcional ao cubo da velocidade do vento. Como resultado, o aumento da velocidade do vento de apenas alguns quilómetros por hora pode produzir uma quantidade significativamente maior de electricidade. Assim sendo, são necessários dispositivos de monitorização para se poder determinar o potencial eólico e estimar a rentabilidade destas instalações, sendo frequentemente usadas para esse efeito bóias equipadas com um perfilador de ventos, Fig. 5. Finalmente, e tal como qualquer outra instalação *offshore*, os parques eólicos necessitam dum conjunto de dispositivos de assinalamento designadamente, bóias, luzes e marcas garantem a segurança da navegação de embarcações passageiras.



Fig. 5 – Bóia equipada com um perfilador de ventos próxima dum parque eólico (*Magazine*, 2013).

1.3.6. TURISMO DE CRUZEIRO

O turismo oceânico e costeiro é amplamente considerado como uma das áreas de crescimento mais rápido do turismo contemporâneo (Hall, 2001). A taxa de crescimento do turismo de cruzeiro global tem aumentado consistentemente nos últimos anos tendo-se verificado um aumento de 20,5% de passageiros de cruzeiro em cinco anos. Mais especificamente, 27.7 milhões de pessoas fizeram cruzeiros em 2018. O turismo de cruzeiros tem o mesmo tipo de impactos negativos que o transporte marítimo. Para além da poluição do ar causada pelos gases que liberta, os navios de cruzeiro são uma enorme fonte de poluição da água, deitando lixo, combustível e esgotos directamente no oceano. Os enormes danos físicos e biológicos causados aos ecossistemas marinhos é um aspecto a ter em conta (Johnson, 2002).

O aumento do turismo de cruzeiros, combinado com as considerações ambientais descritas, levanta uma série de questões-chave de sustentabilidade. Diferentes estratégias e iniciativas de gestão, que tanto os operadores como os destinos, devem empregar para cumprir as suas obrigações em matéria de desenvolvimento sustentável são necessárias e, nesse enquadramento, são essenciais dispositivos de monitorização oceânica (Johnson, 2002).



Fig. 6 – Bóia de assinalamento e monitorização no porto de *Newcastle* no mar do norte, local de passagem de cruzeiros (Ratcliff, 2015).

Pela observação da Fig. 7 é possível concluir que a exploração humana dos principais recursos oceânicos está em crescimento, embora a ritmos diferentes. Sabendo que associado a estes recursos está um vasto conjunto de equipamentos *offshore*, podemos facilmente concluir que o número de equipamentos que são necessários irá aumentar, acompanhando o crescimento dos diferentes recursos descritos anteriormente.

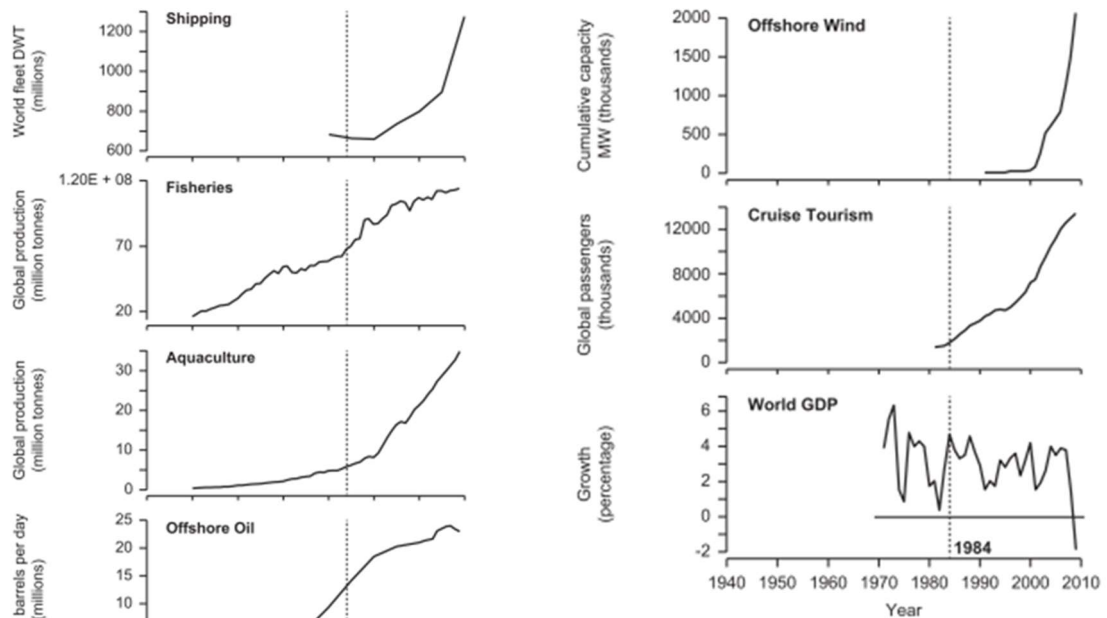


Fig. 7 – Desenvolvimento global da exploração dos recursos marítimos (Stojanovic *et al.*, 2013).

1.3.7. ENERGIA DAS ONDAS

Nos dias de hoje, com a atenção mundial virada para as alterações climáticas e a subida dos níveis de dióxido de carbono na atmosfera e o efeito estufa, a necessidade de gerar electricidade a partir de fontes de energia renováveis é, uma vez mais, uma importante área de pesquisa. Destas fontes de energia renováveis, as principais são a eólica, a solar e a hidroelétrica.

A necessidade de promover políticas energéticas que assegurem um desenvolvimento sustentável a longo prazo é essencial no contexto actual, e nesse sentido, têm sido impostas obrigações legais através de directivas comunitárias com o intuito de restringir as emissões poluentes que derivam maioritariamente dos combustíveis fósseis e aumentar a percentagem de energia produzida por fontes não poluentes. A Agência Internacional de Energia (IEA) prevê um aumento de 56% das necessidades mundiais de energia primária entre 2005 e 2030, à razão de 1,8% ao ano (Birol, 2008). Estes objectivos ambiciosos só podem ser atingidos a partir dum forte investimento na área das fontes de energia renovável, encontrando assim alternativas para obtenção de energia através de fontes limpas e sustentáveis.

É neste contexto que a extracção da energia proveniente dos oceanos, dada a sua elevada disponibilidade e densidade energética, se justifica. Estima-se que o consumo mundial de energia aumente consideravelmente nas próximas décadas e que, no mesmo período, o consumo de energia na União Europeia aumente a um ritmo quase semelhante. Espera-se que a contribuição desta fonte até ao próximo ano de 2020 represente 0,15% do consumo de electricidade na Europa e aumente até 14 TW.h à escala global (O'Hagan *et al.*, 2016).

A potência de uma onda harmónica é proporcional ao quadrado da sua amplitude e ao período do seu movimento. Ou seja, ondas com períodos entre os 7-10s e alturas de onda na ordem de ~2m têm fluxos de energia que excedem 40-50 kW por metro de frente de onda. A previsibilidade, consistência, e densidade energética (recurso disponível por unidade de área) das ondas, que é 10 vezes mais elevada do que a energia eólica e 100 vezes mais elevada do que a energia solar, são características que demonstram o inegável potencial energético das ondas. Para este recurso, em zonas de mar alto, valores típicos anuais de energia transportada por onda rondam os 20 a 70 kW por metro de frente de onda, Fig. 8 (Cruz *et al.*, 2004).

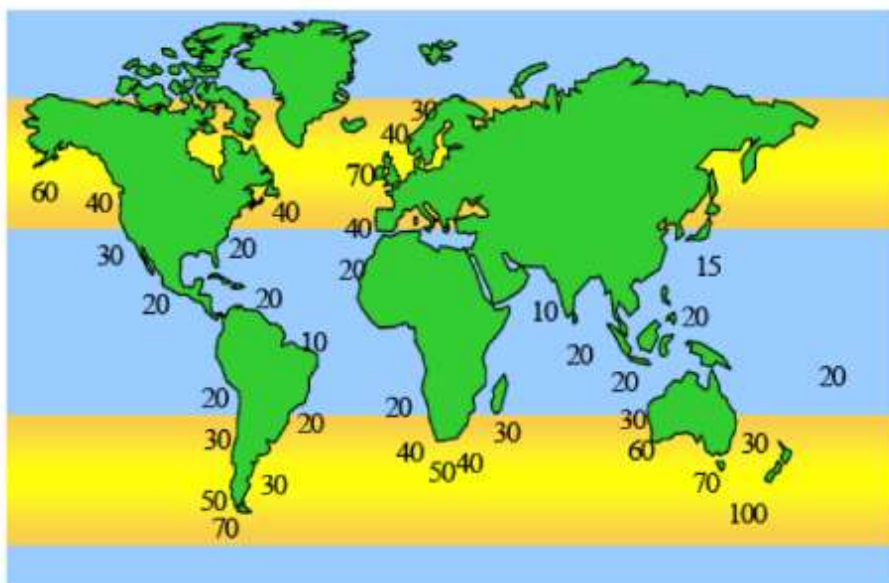


Fig. 8 – Distribuição Global do potencial energético da energia das ondas em kW por metro de onda (Birol, 2008).

As tecnologias de conversão de energia oceânica enfrentam quatro obstáculos principais: desenvolvimento tecnológico, finanças e mercados, questões ambientais e administrativas e disponibilidade da rede. Actualmente, as barreiras tecnológicas representam a questão mais importante no sector da energia oceânica, representando cerca de 35% das principais prioridades para as indústrias da energia das ondas e das marés. A superação das questões tecnológicas é fundamental para identificar soluções e ultrapassar os obstáculos que atrasam o desenvolvimento do sector, concretamente a viabilidade financeira (Magagna *et al.*, 2015).

Todavia, o desenvolvimento tecnológico no domínio do aproveitamento da energia das ondas apresenta ainda vários desafios. Características como a irregularidade da amplitude, da fase e da direcção das ondas, tornam difícil atingir o máximo da eficiência do sistema de conversão, numa vasta gama de frequências. Bem como a elevada carga estrutural em condições climáticas extremas, e elevada manutenção dos dispositivos devido ao ambiente hostil e corrosivo do oceano. Mesmo assim, em contraste com as outras formas de energia renovável, o número de concepções para a conversão desta forma de energia é muito grande; porém, em geral, exigem investimentos de tal ordem que tornam o preço da energia eléctrica produzida muito superior ao das tecnologias convencionais já existentes.

Portanto, o maior desafio é fornecer um sistema que seja económico e, também, forte o suficiente para sobreviver aos climas oceânicos extremos (Ilyas *et al.*, 2014).

Tendo em conta os desafios mencionados, são necessários dispositivos de monitorização que auxiliem no estudo e na determinação dos locais com mais potencial para a instalação de grupos de dispositivos conversores de energia das ondas, bem como para se estimar a rentabilidade dessas possíveis instalações *a priori*, sendo frequentemente usadas para esse efeito bóias ondógrafos. Por outro lado, seguindo uma abordagem de aproveitamento da energia em menor escala, os conversores de energia de ondas podem ser incluídos em equipamentos oceânicos *offshore* para lhes fornecer energia *in situ*, melhorando a sua autonomia e garantindo a autossuficiência dos seus componentes electrónicos.

1.4. MONITORIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS OCEÂNICAS

A ciência procura medir com exactidão para tentar prever as mudanças futuras. Estas mudanças previstas no sistema global dos oceanos e da atmosfera, são essenciais para definir o rumo tomado pela humanidade. O aumento dos gases com efeito de estufa e a subida do nível médio da água do mar resultante poderá ter impactos diferenciados, dependendo dos níveis de subsidência ou do potencial de salinização e adaptação; os impactos crescentes dos riscos naturais, incluindo tempestades, furacões e ciclones tropicais, as mudanças dramáticas no oceano planetário, tais como potencial interrupção abrupta da circulação termoalina, acidificação dos oceanos e mudanças de faixa para espécies marinhas são consequência das manifestações de um clima oceânico em mudança. A totalidade da mudança e a sua magnitude para o oceano mundial dificilmente serão mensuráveis numa única métrica. No entanto, é desejável determinar as características gerais da mudança para tornar explícitas as ligações entre as actividades humanas e os oceanos em mudança (Stojanovic *et al.*, 2013).

Assim sendo, deverá ser estabelecido um conjunto adequado de indicadores para medir as variáveis oceânicas e as variáveis meteorológicas à superfície, bem como a definição de objectivos específicos a nível mundial, regional e nacional e a medição e acompanhamento dos progressos realizados em relação a esses objectivos através do indicador global estabelecido será essencial.

1.4.1. TEMPERATURA DA ÁGUA

A temperatura da água é um indicador básico na monitorização oceano. Com os dados de temperatura, é possível monitorizar a carga ou descarga térmica e determinar mudanças na circulação termoalina, que afecta a saúde das espécies e organismos aquáticos. Muitos organismos aquáticos são sensíveis a altas temperaturas. A solubilidade do oxigénio é menor em água mais quente, limitando assim o fornecimento de oxigénio (YSI, 2019). A temperatura da superfície do mar (*sea surface temperature*, SST) é a variável oceânica que mais afecta a atmosfera e, portanto, qualquer tentativa de previsão da variabilidade do sistema oceano-atmosfera será sempre limitada pela capacidade de entender (e prever) os processos que a modificam. Melhorar essa previsão requer um tratamento mais realístico dos fluxos de calor e movimento entre o oceano-atmosfera e um conjunto de diferentes métodos de medição.

As medições *in situ* da SST a partir de sensores termistor de alta precisão instalados em equipamentos *offshore*, como bóias e flutuadores, têm sido amplamente utilizadas para validar as medições SST via satélite (Castro *et al.*, 2012). Nesses sensores a resistência do termistor muda com a temperatura e, utilizando um algoritmo é possível converter a resistência medida em temperatura (YSI, 2019). O termistor é, normalmente, fixado no interior duma placa na parte inferior do equipamento *offshore*. Uma cobertura de isolamento térmico evita a transferência excessiva de calor do ar circundante e reduz os erros de medição a um valor aceitável. A medição é geralmente feita a uma profundidade nominal de 1 m (Meindl, 1996). Na Fig. 9 está representado um mapa mundial com a média anual da temperatura da superfície do mar medida através de uma rede global de sensores termistor.

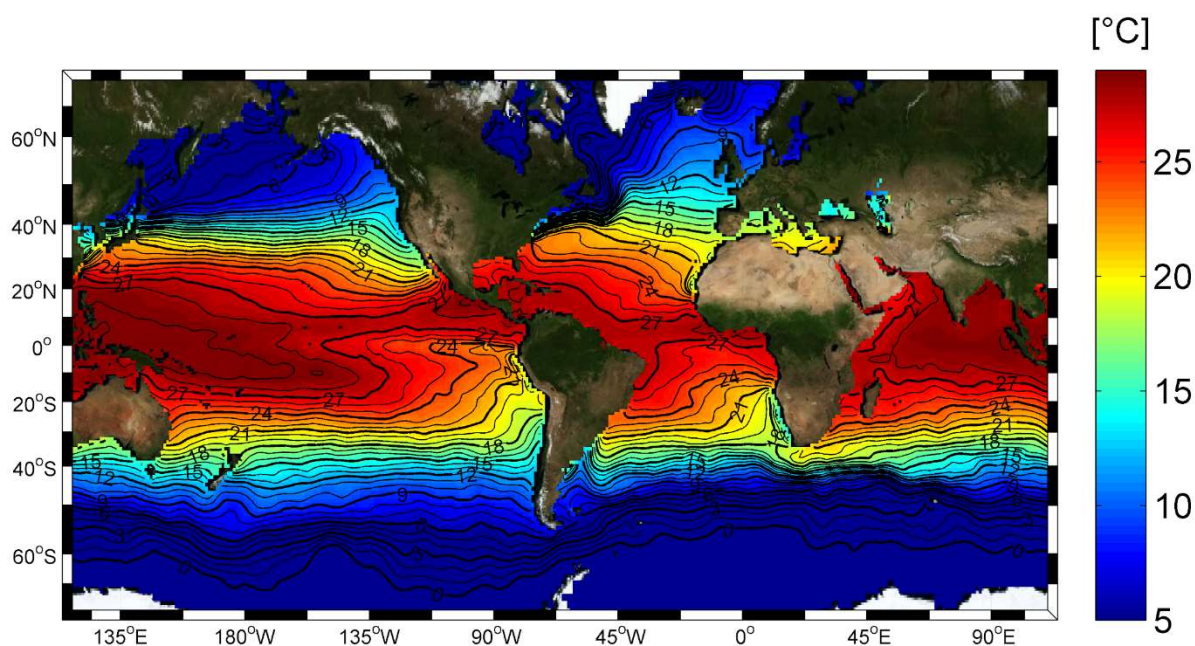


Fig. 9 – Média anual da temperatura da superfície do mar e distribuição mundial em [°C] (Baranova, 2015).

1.4.2. SALINIDADE DA ÁGUA

A salinidade da superfície do mar (*sea surface salinity*, SSS) é um parâmetro de elevada importância crítica que relaciona o ciclo global da água com a circulação termoalina (Tang *et al.*, 2014). Os padrões globais de salinidade estão ligados à precipitação e à evaporação. A salinidade afecta a densidade da água do mar, que por sua vez governa a circulação oceânica e o clima. As variações de salinidade são impulsionadas pela precipitação, evaporação, escoamento superficial e congelamento e fusão de gelo.

Tal como no caso da SST, as medições da salinidade à superfície do mar obtidas através de satélites são validadas com medições *in situ* por sensores em flutuadores ou bóias.

Nestes sensores a SSS é medida de forma indirecta a partir da condutividade eléctrica, que traduz a capacidade de um material conduzir corrente eléctrica, sendo também um indicador da qualidade da água, pois permite determinar a concentração de soluções, contaminantes e determinar a pureza da água. Normalmente são usados sensores CTD (*conductivity, temperature and depth*) para determinar como a condutividade da água e a temperatura no oceano variam em profundidade, sendo por esse motivo uma ferramenta primária para medir as propriedades físicas do oceano. As medições de temperatura e salinidade do CTD são ambas utilizadas para determinar a densidade da água do mar, que é a principal força motriz das principais correntes oceânicas. O princípio pelo qual o sensor mede a condutividade é simples: são colocadas placas/fios na amostra, é aplicado um potencial através deles (normalmente uma tensão de onda senoidal) e a corrente é medida. A condutividade é determinada a partir dos valores de tensão e corrente de acordo com a lei de Ohm. A unidade básica de condutividade são os siemens (S), por vezes referidos como mho. As medições de condutividade, juntamente com a temperatura, permitem que os valores de salinidade sejam calculados através de algoritmos. O sensor CTD mede também a profundidade da água através de um extensómetro não ventilado. A profundidade é calculada a partir da pressão exercida pela coluna de água subtraindo a pressão atmosférica, sendo que a pressão barométrica, a densidade e a temperatura influenciam a medição de profundidade na água (YSI, 2019).

Na Fig. 10 está representado um mapa mundial com a distribuição da média anual da salinidade da superfície do mar medida através de uma rede global de sensores CTD.

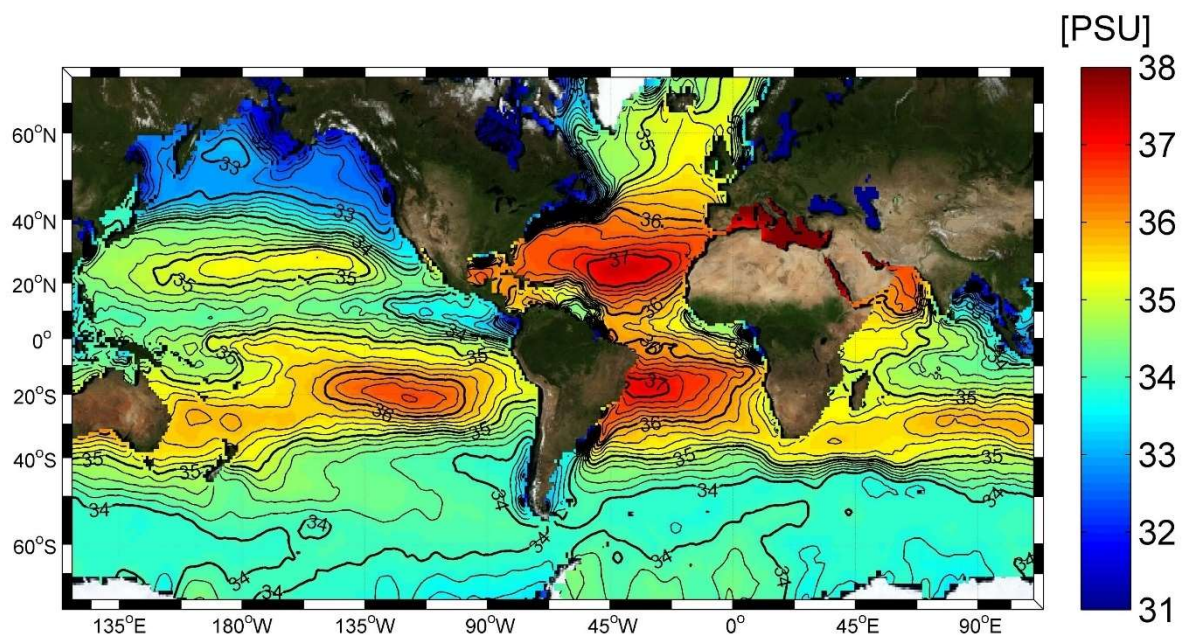


Fig. 10 – Média anual da salinidade da superfície do mar e distribuição mundial em [PSU] (Baranova, 2015).

Embora as variáveis oceânicas SST e SSS estejam intimamente relacionadas, a distribuição espacial da salinidade da superfície do mar no oceano é significativamente diferente da da temperatura à superfície. Isso ocorre principalmente porque as fontes superficiais de variabilidade da temperatura são diferentes das da salinidade: o oceano é aquecido nos trópicos e arrefecido a altas latitudes, enquanto a salinidade

é predominantemente modificada pela concentração/diluição relacionada com a evaporação, precipitação e o fluxo de escoamento superficial dos rios.

1.4.3. ONDULAÇÃO

As ondas do mar são uma forma indirecta da energia solar. O aquecimento diferenciado da atmosfera gera diferenças de pressão, dando origem ao vento, e este, a partir de uma complexa interacção com a superfície do mar, dá origem às ondas. Os mecanismos precisos de transferência da energia dos ventos para as ondas são bastante complexos.

Identificam-se os seguintes processos: o fluxo de ar sobre a superfície do mar transfere energia para a água através de tensões tangenciais, resultando na formação e no crescimento de pequenas perturbações na superfície livre, alterações dos campos de pressão e das tensões tangenciais, em decorrência de fluxos turbulentos de ar, levam a uma intensificação do processo e à formação das ondas que, a partir dum certo tamanho, sofrem uma acção ainda mais intensa do fluxo de ar levando mais uma vez ao seu crescimento (Falcão, 2010). A quantidade de energia transmitida depende da velocidade do vento, do seu tempo de actuação e da extensão da área sobre a qual o vento actua, designada por *fetch* (Falcão, 2010).

Uma onda pode viajar milhares de quilómetros com ínfimas perdas de energia em águas profundas, tornando-se progressivamente mais “regular” (Duckers, 2004). Perto da costa a potência por metro de crista de onda decresce devido à cada vez maior interacção com o fundo, podendo, porém, ser compensada por fenómenos naturais de refacção e difracção que provocam concentrações de energia (*hot spots*). As ondas, Fig. 11, são descritas fisicamente pelo seu comprimento, λ , e altura, H . Cerca de 95% da energia nas ondas está disponível entre a superfície e uma profundidade igual a um quarto do comprimento (Ilyas *et al.*, 2014).

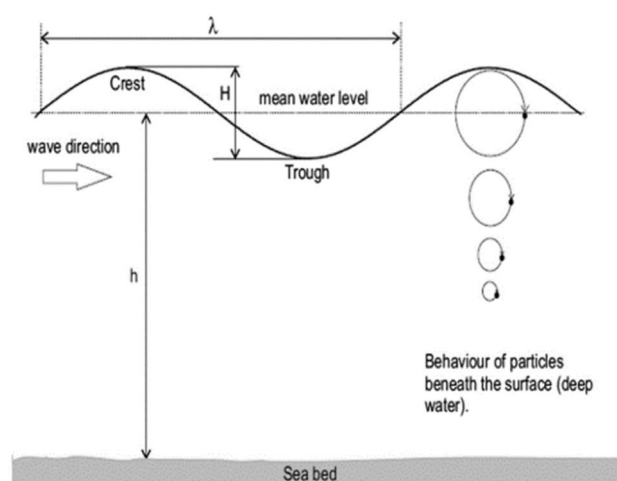


Fig. 11 – Representação duma Onda (Ilyas *et al.*, 2014).

Para a medição das ondas utilizam-se bóias ondógrafo, Fig. 12, que estão equipadas com sensores que medem a aceleração vertical do movimento da superfície livre da água do mar, o que permite posteriormente obter informação relativa à altura (H) e ao período (T) das ondas. As bóias direccionais têm um sensor adicional, que permite obter também informação sobre a direcção de propagação das

ondas. Os dados adquiridos são transmitidos, via rádio, para uma estação receptora. O conjunto formado pela bóia ondógrafo e pela estação receptora é designado por estação ondógrafo (Gomes, 2007).

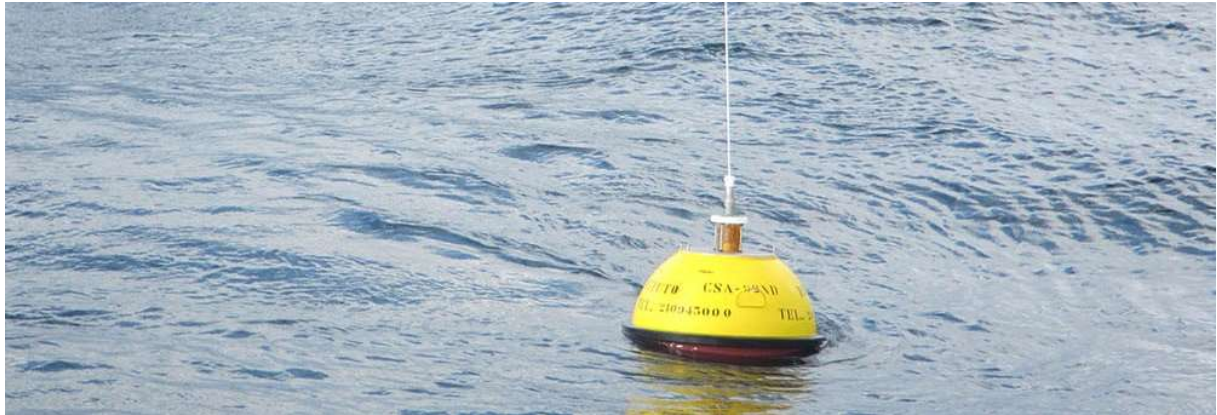


Fig. 12 – Bóia ondógrafo (Zacarias, 2011).

1.4.4. CORRENTES OCEÂNICAS

As correntes oceânicas, Fig. 13, são impulsionadas por diferentes factores. As marés, provocadas pela atracção gravitacional do sol e da lua nos oceanos da terra, criam correntes nos oceanos, que se intensificam perto da costa, nomeadamente nas baías e estuários, que se designam de "correntes de maré". As correntes de maré são o único tipo de correntes cujas características variam num padrão muito regular e podem ser previstas com rigor. Os ventos também provocam correntes na superfície do oceano ou perto dela, que podem em alguns casos atingir velocidades de 2 a 2,5 m/s. Por último, a circulação termoalina é um componente importante da circulação oceânica geral, é um processo provocado pelas diferenças de densidade na água associadas à temperatura (termo) e à salinidade (alina) em diferentes partes do oceano. Este processo inclui a formação duma massa de água na superfície, o seu transporte pelo interior do oceano e o escoamento de retorno à região de origem, ou seja, a água do mar em profundidade é continuamente substituída por água da superfície. Embora este processo seja relativamente lento, enormes volumes de água são movimentados, que transportam calor, nutrientes, sólidos e outros materiais a grandes distâncias. A circulação termoalina também conduz as águas superficiais mais quentes para longe dos subtrópicos, o que modera o clima da Islândia e de outras áreas costeiras da Europa por exemplo. Pode ter múltiplos estados e transições catastróficas de um estado para outro, e tais mudanças estão intimamente ligadas às mudanças climáticas na terra (Huang, 2015).

As correntes oceânicas são normalmente medidas *in situ* através de perfiladores hidroacústicos de correntes *Doppler*. Estes sensores são instalados no fundo oceânico e têm a capacidade de medir colunas de água de grandes dimensões.

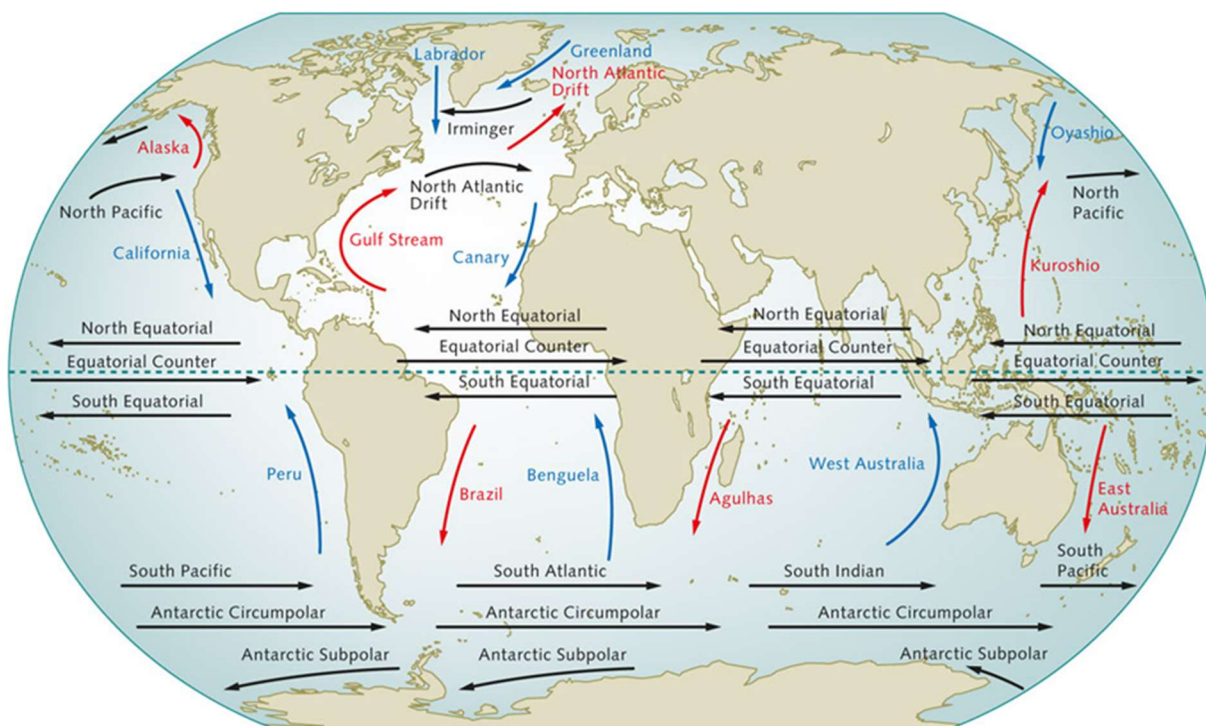


Fig. 13 – Representação das principais correntes oceânicas (IOI, 2010).

1.4.5. PARÂMETROS BIOGEOQUÍMICOS

O ciclo biogeoquímico, Fig. 14, é o percurso realizado no meio ambiente pelos elementos químicos essenciais à vida, e tem características cíclicas. Neste ciclo de elementos, que formam os organismos vivos (“bio”) e o ambiente geológico (“geo”), intervêm mudanças químicas. Ao longo do ciclo, cada elemento é absorvido e reciclado por componentes bióticos (seres vivos) e abióticos (ar, água, solo) da biosfera. Os oceanos desempenham um papel fundamental no ciclo biogeoquímico dos elementos do nosso planeta. É necessário compreender a distribuição de vida e elementos químicos no oceano, compreender as relações entre esses padrões e os processos físicos que os afectam, os organismos e a estrutura dos ecossistemas marinhos, o destino do carbono e outros elementos no oceano. É necessário também identificar os processos que afectam a distribuição e ciclo de um elemento através do oceano e distinguir as implicações destes processos na abundância dos organismos vivos (Oceanography, 2019). Para esse efeito existe um elevado número de sensores, que medem diferentes parâmetros como: pH, dióxido de carbono, oxigénio dissolvido, amónio, hidrocarboneto, cloreto, clorofila, rodamina, nitrato, etc.

Os sensores de pH medem o pH (escala de hidrogénio total) na faixa de pH marinho de 7-9. O pH é uma medida da concentração total de íons de hidrogénio no oceano. Por dezenas de milhões de anos, os oceanos da Terra têm mantido um nível de pH relativamente estável. Desde o início da revolução industrial estima-se que o pH da superfície oceânica tenha diminuído de aproximadamente 8,25 para 8,14. Embora isto possa parecer uma alteração muito pequena do pH, já está a afectar os organismos marinhos (Oceanography, 2019).

Os sensores de CO₂ medem a pressão parcial do dióxido de carbono na água. A distribuição da pressão parcial de CO₂ aumenta devido à troca de gases com a atmosfera na superfície do oceano por decomposição de material vegetal e devido à dissolução de carbonato de cálcio, e depende da remoção por fotossíntese, por formação de carbonato de cálcio e por aquecimento solar. Actualmente, o aumento

do CO₂ atmosférico é cerca de 30 vezes maior do que em qualquer outro momento da história geológica passada da Terra. Os oceanos estão a absorver cerca de 30% do CO₂ atmosférico, resultando em mudanças na química ácido-base da água do mar e uma diminuição no pH do oceano (mais ácido). Essas mudanças químicas são chamadas de "acidificação dos oceanos" (Oceanography, 2019).

Um sensor de oxigénio dissolvido mede a quantidade de oxigénio dissolvido presente numa solução aquosa. Existem dois tipos primários de tecnologias de detecção de oxigénio dissolvido disponíveis: o método de detecção com base óptica, conhecido como luminescente, e o eléctrodo electroquímico *Clark* ou eléctrodo coberto por membrana. O oxigénio dissolvido refere-se ao nível de oxigénio livre, não composto, presente na água. É um dos parâmetros mais importantes na avaliação da qualidade da água devido à sua influência nos organismos que vivem dentro de um corpo de água. Um nível de oxigénio dissolvido demasiado elevado ou demasiado baixo pode prejudicar a vida aquática e afectar a qualidade da água (YSI, 2019).

O sensor de amónio consiste num eléctrodo de fio de prata inserido numa solução. A solução interna é separada do meio da amostra por uma membrana não actínica, que interage selectivamente com os iões de amónio. O amónio (NH₄⁺) é uma forma de nitrogénio que as plantas aquáticas podem absorver e incorporar em proteínas, aminoácidos e outras moléculas. Altas concentrações de amónio podem aumentar o crescimento de algas e plantas aquáticas. As bactérias também podem converter amónio em nitrato no processo de nitrificação, o que reduz o oxigénio dissolvido. A proporção presente na água é altamente afectada pelo pH (YSI, 2019).

A monitorização de hidrocarbonetos na água é de importância crescente perto de plataformas de exploração de petróleo, marinas, canais de navegação, minas e águas afectadas por derramamento de petróleo. Um sensor de petróleo bruto contém uma fonte de LED e um sensor de combustíveis refinados com uma fonte de LED UV profunda, conseguindo detectar óleo em toda a coluna de água na monitorização *offshore* (YSI, 2019).

Os sensores de cloreto utilizam uma membrana no estado sólido ligada a um fio condutor. Quando a sonda é imersa em água, é estabelecido um potencial através da membrana que depende da quantidade de cloreto no meio. O cloreto (Cl⁻) é um componente do sal encontrado naturalmente em minerais e oceanos. Os sais de cloreto são tipicamente solúveis na água, e altas concentrações de cloreto em corpos de água podem afectar negativamente os peixes e as comunidades aquáticas (YSI, 2019).

A clorofila floresce quando é irradiada com luz de um determinado comprimento de onda. Para medições de campo, são usados fluorímetros *in situ* que promovem o florescimento de clorofila através da iluminação da água com um feixe de luz de comprimento de onda adequado. A clorofila é encontrada em células vivas de organismos fotossintéticos, tais como fitoplâncton e cianobactérias (algas azuis-verdes). A quantidade de clorofila encontrada numa amostra de água é utilizada como medida da concentração de fitoplâncton. Estas medições contribuem para a compreensão da "saúde" biológica geral do sistema, tal como o seu estado trófico ou produção primária. As medições de clorofila podem também identificar eventos de proliferação de algas e seus efeitos na qualidade da água e antecipar a proliferação de algas tóxicas (YSI, 2019).

A rodamina, tal como a clorofila, floresce quando irradiada com luz de um determinado comprimento de onda, logo são utilizados uma vez mais fluorímetros. A rodamina é um corante vermelho que indica como a água se move, sendo por esse motivo útil para rastrear poluentes (YSI, 2019).

O sensor de nitrato é semelhante ao sensor de amónio, mas é utilizada uma membrana de polímero, que interage selectivamente com os iões nitrato. O nitrato (NO₃⁻) forma-se na água quando as bactérias

usam oxigénio dissolvido para oxidar o amónio. Altas concentrações de nitrato podem aumentar o crescimento de algas e plantas aquáticas (YSI, 2019).

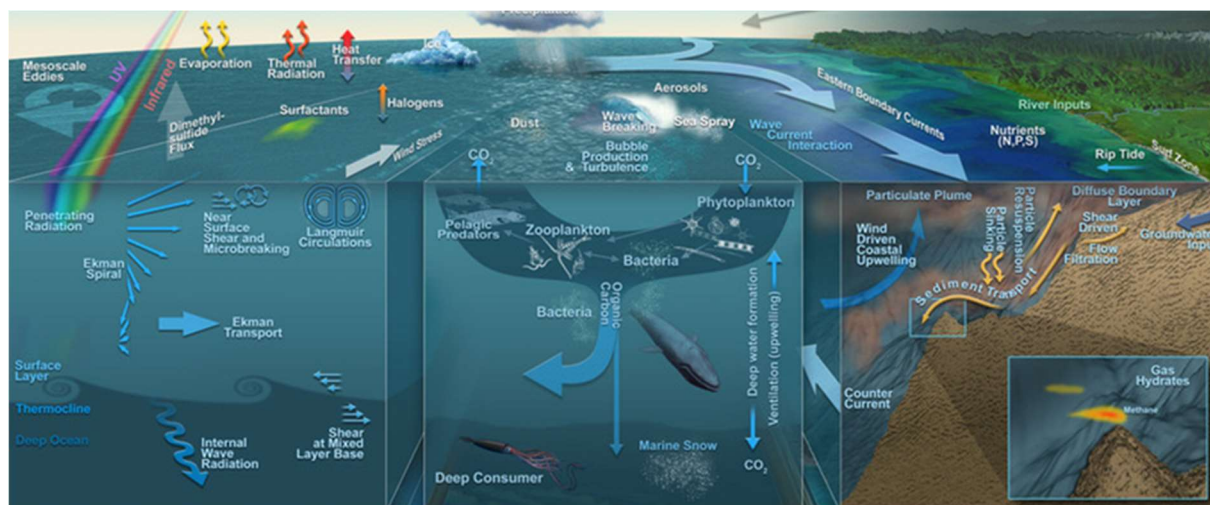


Fig. 14 – Representação do ciclo biogeoquímico (Oceanography, 2019).

1.4.6. TEMPERATURA DO AR

As observações da temperatura do ar oceânico a partir de navios e bóias são de grande utilidade na quantificação das alterações climáticas. No entanto, devido aos erros decorrentes do aquecimento solar, nos instrumentos de medição directamente e no ambiente de bordo em geral, as temperaturas do ar diurnas são consideradas pouco fiáveis, pelo que são utilizadas apenas observações nocturnas (Kent *et al.*, 1993).

Os termómetros instalados em navios, plataformas e equipamentos *offshore* mostram que o ar perto da superfície do oceano está a ficar cada vez mais quente, aumentando a sua capacidade de evaporar água, o que se traduz num aumento dos eventos de precipitação intensa e inundações em terra.

Assim, um conjunto de dados é produzido utilizando medições *in situ* da temperatura nocturna do ar oceânico efectuadas no período compreendido entre uma hora após o pôr-do-sol e uma hora antes do nascer do sol. As medições que não passam nas verificações de qualidade são rejeitadas e convertidas em anomalias. Através da análise destas grelhas mensais de vários anos podemos perceber as evoluções na temperatura do ar. A Fig. 15 apresenta um exemplo dessa mesma grelha, para o mês de Dezembro de 2010 (Centre, 2015).

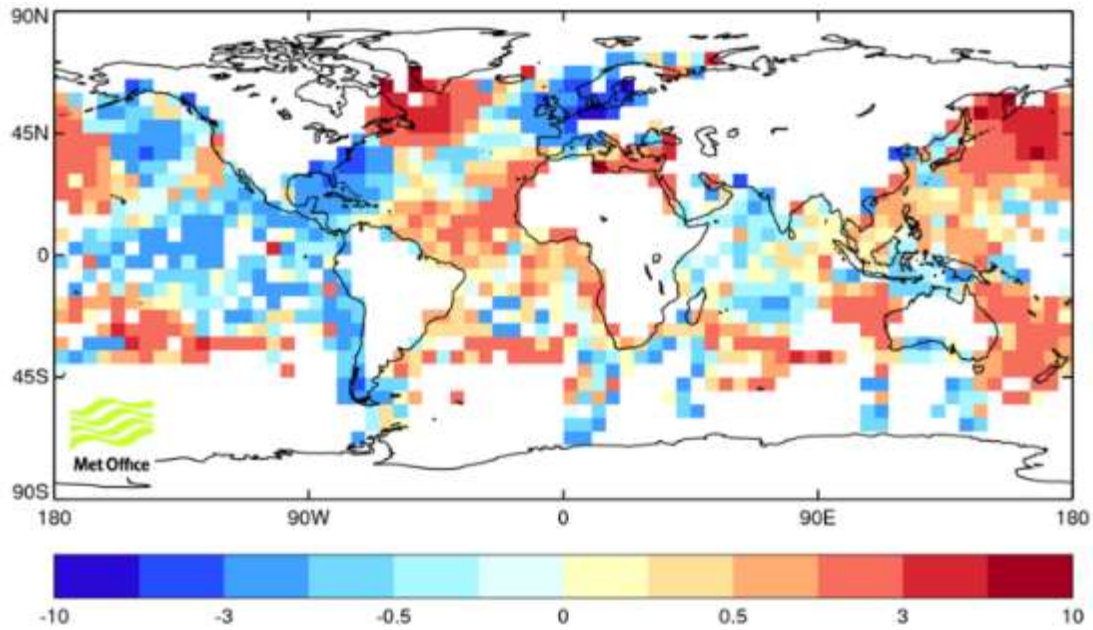


Fig. 15 – Média das temperaturas noturnas do ar registadas no mês de Dezembro de 2010 (Centre, 2015).

1.4.7. HUMIDADE DO AR

A distribuição de vapor de água na atmosfera tem influência nas alterações climáticas através do balanço energético e da evaporação. O vapor de água, além de ajudar a regular a temperatura da superfície da Terra, é também uma etapa fundamental do ciclo da água, transportando água e calor através da atmosfera de um lugar da Terra para outro. A quantidade de vapor de água no ar - a humidade - influencia a sensação de calor do ar. Em geral, o vapor de água na atmosfera aumentou na terra e no oceano em relação à década de 1970, Fig. 16, (a humidade específica está a aumentar). Espera-se que a quantidade de vapor de água na atmosfera aumente à medida que a atmosfera aquece. A humidade relativa na altura padrão de 2 m é de aproximadamente 0,80 sobre os oceanos. No entanto a humidade relativa está a diminuir, Fig. 17, o que parece impossível. As causas disso ainda não são bem compreendidas, mas as diferenças na taxa de aquecimento entre a terra e o oceano e a disponibilidade de água na superfície da terra podem ser factores (NOAA, 2013).

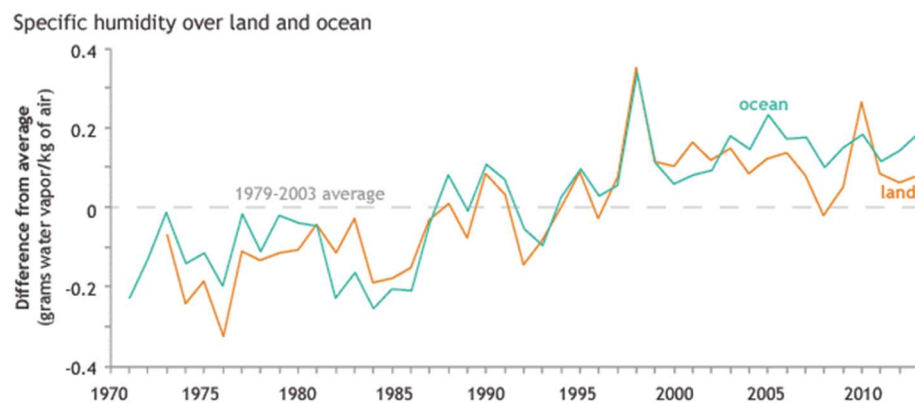


Fig. 16 – Humidade específica anual média sobre a terra (laranja) e oceano (verde) entre 1979-2003 (NOAA, 2013).

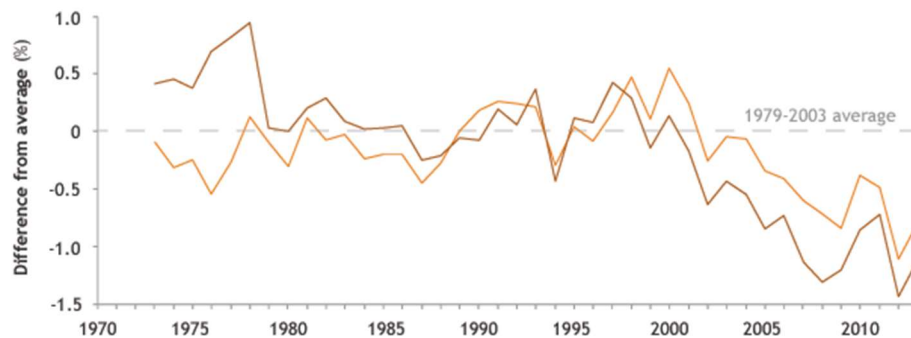


Fig. 17 – Humidade relativa anual média sobre a terra de diferentes fontes entre 1979-2003 (NOAA, 2013).

Para acompanhar estes fenómenos são necessários sensores de humidade, estes medem a humidade relativa do ar. Consistem num substrato no qual uma fina película de polímero ou óxido de metal é depositada entre dois eléctrodos condutores. A superfície de detecção é revestida com um eléctrodo de metal poroso para protegê-la contra contaminação e exposição à condensação. Como substrato é tipicamente usado o vidro a cerâmica ou o silicone. A mudança incremental na constante dielétrica de um sensor de humidade capacitivo é directamente proporcional à humidade relativa do ambiente circundante.

1.4.8. VENTOS

O vento é causado por diferenças na pressão atmosférica. Assim, quando existe uma diferença na pressão atmosférica, o ar move-se da área de maior pressão para a de menor pressão, resultando em ventos de várias velocidades. Num planeta em rotação, o movimento do ar também será influenciado pelo efeito *Coriolis*, excepto exactamente no equador. Globalmente, os dois principais factores que impulsionam os padrões de vento em larga escala (a circulação atmosférica) são o aquecimento diferencial entre o equador e os pólos e a rotação do planeta (NWS, 2015). Como foi anteriormente discutido, o vento é responsável pela formação da ondulação e pelas correntes na superfície do oceano.

A velocidade do vento pode ser quantificada através de um anemómetro, que é um dispositivo para medir a velocidade do escoamento de ar na atmosfera. Existe uma grande variedade de anemómetros, mas o mais amplamente utilizado para medições de velocidade do vento é o anemómetro eléctrico de copos giratórios que, com o seu movimento, accionam um gerador eléctrico. A saída do gerador opera um medidor eléctrico que é calibrado para fornecer a velocidade do vento. O alcance útil deste dispositivo é aproximadamente de 5 a 100 nós. Pode também ser usada para accionar o gerador eléctrico, um anemómetro de hélice, Fig. 18, (Britannica, 2019). Por outro lado, foi desenvolvida a tecnologia LIDAR (*Light Detection and Ranging*), que faz a medição remota dos ventos utilizando lasers que trabalham na banda de frequência infravermelha. Tais equipamentos medem com precisão a velocidade e direcção dos ventos, os LIDARs de efeito *Doppler* estimam a velocidade do vento através da mudança de frequência do laser reflectido por partículas e aerossóis transportados no ar. Os sistemas LIDAR de emissão contínua fornecem medições de alta qualidade, para certos intervalos de altura, necessários para os estudos de possíveis locais de implantação de parques eólicos *offshore*.



Fig. 18 – Bóia de monitorização equipada com um anemómetro de hélice (Phys, 2019).

2

EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES OFFSHORE

2.1. EQUIPAMENTOS OFFSHORE

Os equipamentos *offshore* têm uma grande variedade de aplicações, dependendo da instrumentação e sensores de que dispõem. Normalmente estes equipamentos organizam-se, relativamente à sua função, em:

- Dispositivos de Monitorização;
- Dispositivos de Vigilância;
- Dispositivos de Assinalamento.

A função do equipamento ou instalação *offshore* pode não ser exclusiva, isto é, por exemplo uma só bóia oceânica pode ser um dispositivo de monitorização, vigilância e assinalamento ao mesmo tempo.

2.1.1. DISPOSITIVOS DE MONITORIZAÇÃO

A precisão da previsão e monitorização das variáveis oceânicas e das variáveis meteorológicas à superfície dos oceanos é optimizada por um sistema equilibrado e bem concebido. A rede de observação pode fornecer dados para modelos numéricos e meteorologistas operacionais. Para além dos relatórios dos navios, as observações nas zonas *offshore* e costeiras são fornecidas por satélites, radares, bóias e outros sistemas de aquisição de dados oceânicos (*Ocean Data Acquisition Systems*, ODAS) (Meindl, 1996).

Cada sistema de observação tem pontos fortes e fracos, e cada um tende a complementar os outros e todos os sistemas são importantes. Os relatórios dos navios tendem a concentrar-se nos corredores de navegação, o que conduz a zonas com poucos dados fora destas rotas. A qualidade das observações dos navios varia consideravelmente de navio para navio. Tal deve-se, provavelmente, a diferenças na exposição individual dos instrumentos, na manutenção dos sensores e no nível de formação do pessoal. Por último, os navios tendem a evitar as zonas de mau tempo excluindo, portanto, os locais onde as observações são geralmente mais necessárias. As imagens de satélite dão uma visão geral e sem paralelo dos padrões meteorológicos, mas a sua utilidade, no entanto, é ditada pelo tipo de satélite e por possíveis erros na correcta aquisição da posição do satélite, podendo resultar em desvios grandes, havendo assim deficiências na cobertura dos dados. Os radares costeiros são uma ferramenta muito útil para detectar precipitações e condições meteorológicas adversas a aproximarem-se da terra, no entanto, o seu valor é

limitado pelo alcance e, em alguns lugares, pela topografia. Assim sendo, os equipamentos *offshore*, nomeadamente as bóias e flutuadores, são considerados os mais eficazes na monitorização oceânica, pois complementam as deficiências dos sistemas de observação anteriormente descritos. Por um lado, estão em permanência no oceano, ao contrário dos navios, e alcançam maiores áreas marítimas uma vez que os navios seguem rotas definidas. Estes equipamentos *offshore* também confirmam as medições de superfície dos satélites, vulneráveis a erros sistemáticos, fornecendo dados *in situ* mais precisos (Meindl, 1996).

Através de bóias oceânicas é possível, também, fornecer energia a uma variedade de dispositivos de monitorização oceânica. Como podemos observar na Fig. 19, conectando uma bóia, equipada com um painel solar ou um conversor de energia das ondas, a um cabo em forma de "S" que isola um flutuador submerso dos movimentos da bóia na superfície, pode fornecer-se esta energia das ondas ou solar, que é obtida na superfície, a uma caixa de junção instalada no fundo do mar que, por sua vez, alimenta uma grande variedade de sensores nesse mesmo fundo. Os dados dos sensores são transmitidos novamente pelo cabo até a bóia na superfície que os transmite via satélite para terra (WHOI, 2019).

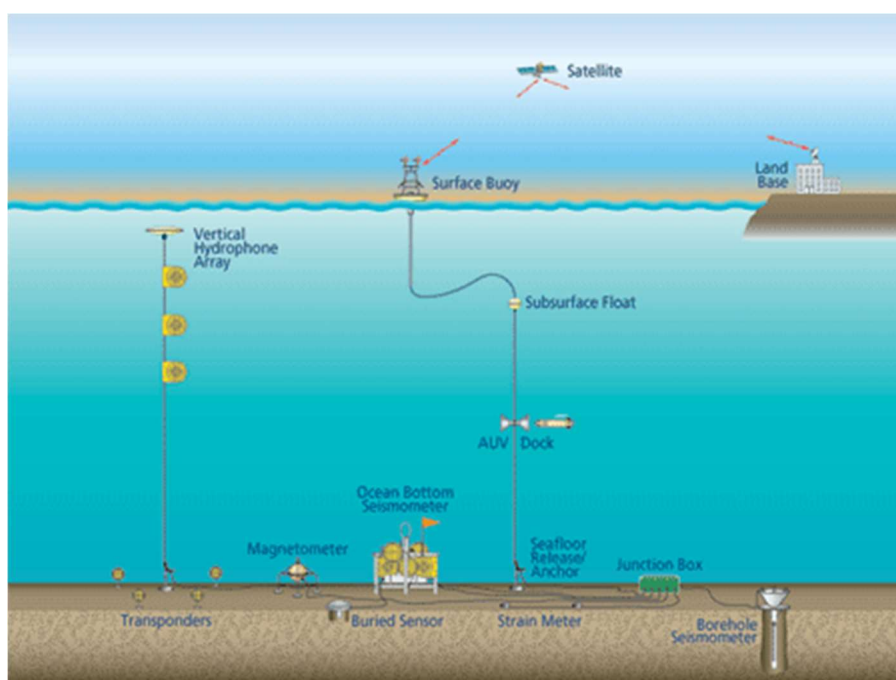


Fig. 19 – Esquema dum sistema de monitorização oceânica alimentado por energia transmitida por uma bóia amarrada (WHOI, 2019)

2.1.2. DISPOSITIVOS DE VIGILÂNCIA

Existem numerosos equipamentos *offshore* com aplicações na área da vigilância marítima. O posicionamento estratégico de boiás de vigilância, equipadas com radares militares ou civis, câmaras de imagem óptica e térmica, sistema AIS (*Automatic Identification System*) e sonares numa zona marítima específica, pode resolver os problemas de vigilância marítima das zonas económicas exclusivas de cada país. As bóias fornecem aos navios de patrulha e às estações em terra informações visuais e radar contínuas sobre uma área marítima mais vasta do que o seu próprio horizonte radar. Isto permite que um ou mais navios de patrulha sejam utilizados com a máxima eficiência, evitando o patrulhamento desnecessário de zonas marítimas vazias. Estes equipamentos de vigilância são utilizados para a

identificação e para a localização de navios de superfície, mas podem ser melhorados para incluir a capacidade de monitorização oceânica, para além das suas capacidades de vigilância actuais (OceanResource, 2017). São utilizados para a protecção de instalações *offshore* e recursos minerais, para a segurança e o policiamento marítimo, protecção de bens ou garantir, também, em permanência a vigilância da zona económica exclusiva de cada país (OceanResource, 2017). As rotas comerciais e de imigração ilegal incluem, frequentemente, itinerários marítimos, pelo que a detecção e prevenção através da vigilância costeira é essencial para atenuar este problema. Uma distribuição de bóias ao longo da costa, equipadas com câmaras de 360°, Fig. 20, pode revelar-se uma ferramenta eficaz para a detecção de actividades ilegais e desencadear novas acções por parte das autoridades competentes (Cruz *et al.*, 2008). Os equipamentos *offshore* podem também ter aplicações de vigilância militar, como detecção de minas marítimas utilizando sonares *sidescan* ou *multibeam*, que também podem fornecer dados hidrográficos de alta resolução. Este tipo de actividades está a ser realizada com AUVs (*Autonomous Underwater Vehicles*), mas a vantagem do uso bóias oceânicas é que os dados podem ser transmitidos em tempo real e em permanência e não apenas na duração das missões (Cruz *et al.*, 2008).



Fig. 20 – Bóia amarrada de vigilância equipada com cameras 360° e um radar.

2.1.3. DISPOSITIVOS DE ASSINALAMENTO

Os dispositivos de assinalamento são equipamentos *offshore* como, por exemplo, balizas ou as bóias, utilizados para aumentar a segurança da navegação marítima, servindo de referências para a navegação. Durante o dia, esta ajuda à navegação, é realizada observando a localização, forma, esquema de cores, características auxiliares (sinais sonoros, RACON, RC, etc.) ou marcações (nome, número, etc.) destes equipamentos. Durante a noite são utilizadas luzes, contidas nestes equipamentos, para ajudar a navegação.

Foi necessário estabelecer um sistema de balizagem global, para que se identifique e verifique a finalidade destas luzes e marcas facilmente, tendo sido criada, para o efeito, a Associação Internacional de Sinalização Marítima (*International Association of Lighthouse Authorities*, IALA), que regulamenta a nível mundial estas questões. Para a região A ou região B existe um sistema de balizagem distinto que é aplicado, Fig. 21.

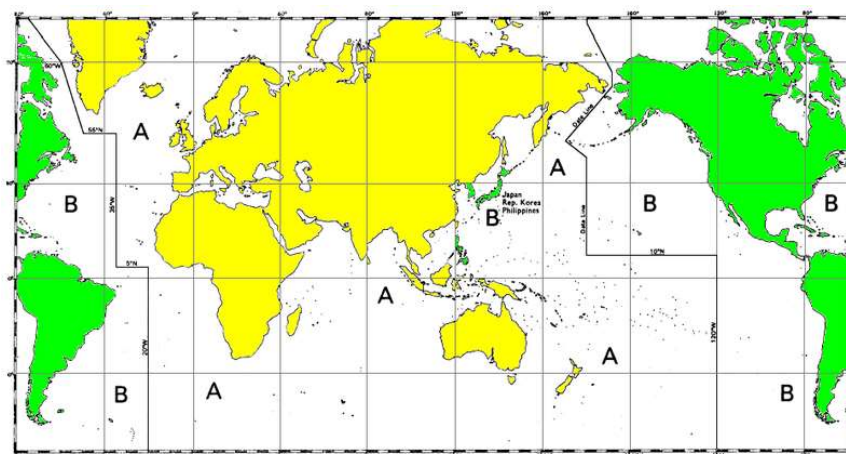


Fig. 21 – Regiões A (a amarelo) e B (a verde) (Chitas, 2017).

Portugal inclui-se na região A, e para esta região aplica-se o seguinte sistema de balizagem, Fig. 22: à entrada de um canal, as bóias vermelhas e cónicas situam-se a bombordo e as bóias verdes e triangulares a estibordo. As marcas de perigo isolado (pretas e vermelhas) situam-se sobre um perigo isolado, assinalando o que é navegável à sua volta. As marcas amarelas servem para indicar as áreas especiais que se encontram referidas em publicações náuticas.

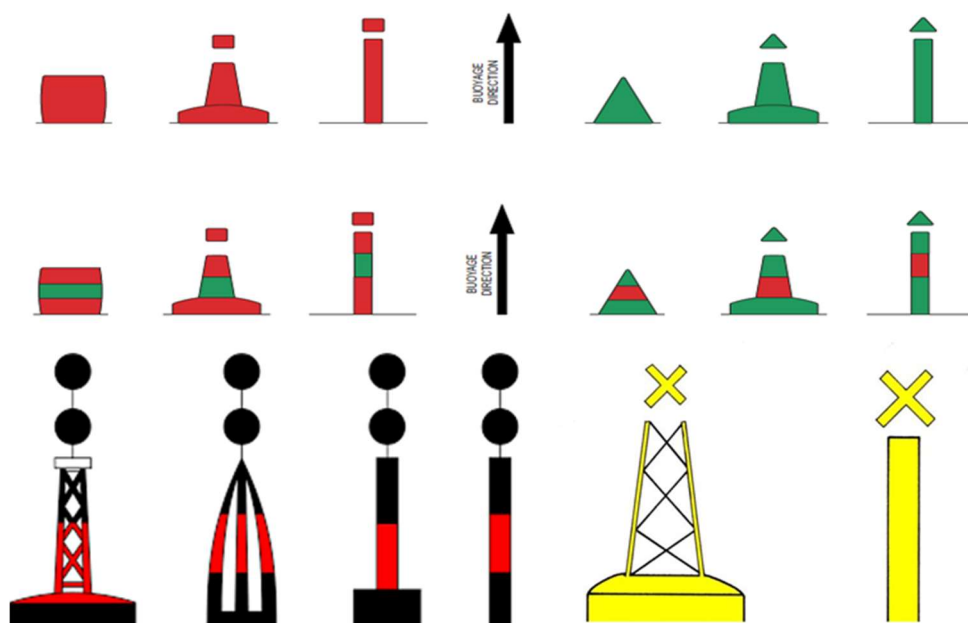


Fig. 22 – Sistema de balizagem da região A (Chitas, 2017).

A Fig. 23 apresenta um exemplo de duas bóias amarradas, uma verde (estibordo) e uma vermelha(bombordo) a assinalar a entrada dum canal para embarcações de passagem.



Fig. 23 – Fotografia de duas bóias amarradas de assinalamento.

2.2. BÓIAS OCEÂNICAS

As bóias são equipamentos de monitorização, vigilância e assinalamento oceânico *offshore* mais comuns dada a sua versatilidade e durabilidade. As bóias oceânicas podem ser usadas para medir informações de todo o tipo (e.g. hidrológicas, meteorológicas, oceanográficas, etc.) através de sensores instalados no corpo da bóia. A utilização de muitas bóias permite estabelecer uma rede de monitorização oceânica (Cheng *et al.*, 2017), pois estas medem e transmitem automaticamente dados metoceanicos, de forma previsível e controlada, comunicando em tempo real através de sistemas de telecomunicações por satélite como o sistema *Argos* ou o sistema *Iridium*. Importa referir que estas observações, através das bóias, contribuem significativamente para a nossa capacidade de modelar, compreender e descrever o clima global em todas as escalas de tempo e espaço. Como foi referido anteriormente, os dados recolhidos complementam ou validam dados de outras plataformas, tais como de navios de observação voluntários ou satélites meteorológicos (DBCP, 2019). Existem dois tipos fundamentais de boiás oceânicas:

- Bóias amarradas;
- Bóias à deriva ou *Drifters*.

Os *drifters* e as bóias amarradas são geralmente consideradas como um meio económico para se obter dados meteorológicos e oceanográficos em áreas oceânicas remotas, apenas com a condicionante da dificuldade de obtenção de energia nesses locais remotos. Existem muitos tipos diferentes de *drifters* e boiás amarradas dependendo da aplicação pretendida e das medições necessárias, em diferentes áreas do oceano (DBCP, 2019).

2.2.1. BÓIAS AMARRADAS (MOORED BUOYS)

Uma bóia amarrada (*moored buoy*) é uma plataforma flutuante instrumentada, não tripulada, a operar livremente na superfície da coluna da água, mas amarrada ao fundo oceânico de modo a manter-se em torno de uma posição fixa. Este tipo de equipamento pode ter associado uma multiplicidade de sensores que recolhem regularmente dados de observações atmosféricas e oceanográficas, sendo geralmente utilizadas para servir as necessidades nacionais de previsão, segurança marítima ou para observar os padrões climáticos regionais (DBCP, 2019). As bóias amarradas, Fig. 24, são, normalmente, plataformas relativamente grandes que podem variar entre alguns metros de altura a mais de 12 m. As medições podem incluir desde variáveis de superfície (vento, temperatura da superfície do ar e do mar, salinidade, pressão do ar), até a temperaturas da água a profundidades de mais de 500 m e correntes. Os dados fornecidos por estas bóias são geralmente recolhidos através de um sistema de aquisição de dados por satélites (*Argos, Iridium, etc.*) e são transmitidos em tempo real e compartilhados na Organização Meteorológica Mundial (*World Meteorological Organization, WMO*).



Fig. 24 – Bóia amarrada de monitorização ODAS (Commerce, 2018).

Em condições normais, as bóias amarradas tem que suportar forças estáticas aproximadamente constantes no tempo (geradas pelo vento e correntes), forças de acção directa das ondas que têm a mesma frequência de actuação que as ondas incidentes, e forças de segunda ordem que resultam da acção das ondas, mas não têm a mesma frequência de solicitação que elas, variando lentamente com as mudanças da altura da onda, dando origem a uma força cíclica de grande período (Moura Paredes, 2008). O cabo de amarração que mantém a bóia no local desejado deve ser suficientemente rígido para evitar os grandes deslocamentos causados por estas forças constantes, mas ao mesmo tempo permitir que a estrutura responda às forças de primeira ordem (forças de acção directa das ondas). Para evitar problemas com tempestades estes equipamentos *offshore* precisam de ser construídos com materiais muito resistentes,

Se uma bóia amarrada, Fig. 25, ficar à deriva, isso representa uma perda potencial de equipamentos caros e um possível perigo para a navegação. Por essa razão, é usado um sistema de localização de reserva para garantir que um alerta é enviado se a bóia deixar uma determinada área (DBCP, 2019). Sendo sistemas localizados num local fixo apenas fornecem informações relativas a esse mesmo local, seja sobre o fundo do mar, sobre a coluna de água ou a sobre a superfície. São ferramentas importantes

para monitorização de variações temporais dos processos oceânicos e têm sido instalados em todo o mundo, particularmente na última década. Entre os vários componentes do sistema de observação marinha, as bóias amarradas são talvez o único meio de obter observações em tempo real, frequentes, precisas e a longo prazo das variáveis meteorológicas e oceanográficas a partir de uma localização fixa em águas profundas. Além de serem indispensáveis para a previsão operacional e a prestação de serviços, tais observações são também extremamente importantes para fins climatológicos e de investigação (Meindl, 1996).

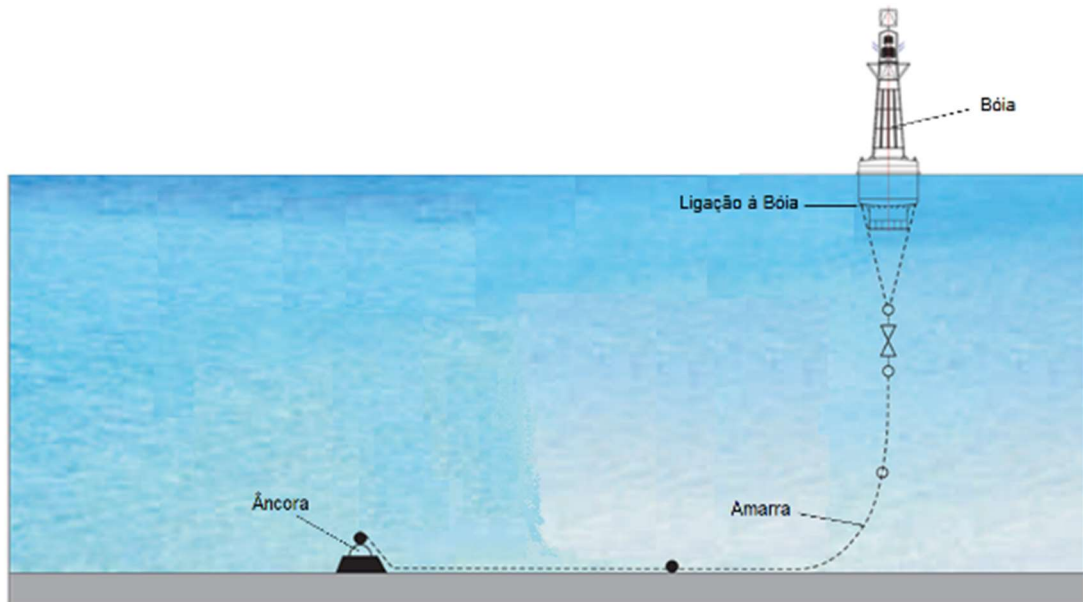


Fig. 25 – Exemplo de uma configuração típica de uma bóia amarrada.

Por outro lado, a maioria dos dispositivos de assinalamento são bóias amarradas, Fig. 26, pois estas garantem uma solução de fácil implementação, que pode ser produzida em série segundo as recomendações IALA, de baixa manutenção e que oferece uma enorme área visual fixa que serve de reconhecimento e ajuda para a navegação marítima passageira.



Fig. 26 – Bóia amarrada de assinalamento SEALITE (Commerce, 2018).

2.2.2. BÓIAS À DERIVA (DRIFTERS)

As bóias à deriva ou apenas *drifters*, são bóias instrumentadas que são largadas de uma embarcação de apoio ou através dum meio aéreo. Como estes equipamentos não estão sujeitos a nenhuma amarração, ao contrário bóias amarradas, ficam à deriva, movendo-se horizontalmente com as correntes locais por longos períodos de tempo (Soreide *et al.*, 2001), estando por isso incluídos na categoria de "*Lagrangian Barometer Drifters*". Estas bóias inicialmente projectadas e implantadas nos oceanos no âmbito do Programa de Velocidade de Superfície (*Surface Velocity Program, SVP*) foram desenvolvidas pelo GDP (*Global Drifter Program*) existindo em dois tamanhos básicos: o original, relativamente pesado e a nova versão "mini". O design "mini", para além de ser menos dispendioso é mais fácil de implementar, Fig. 27.

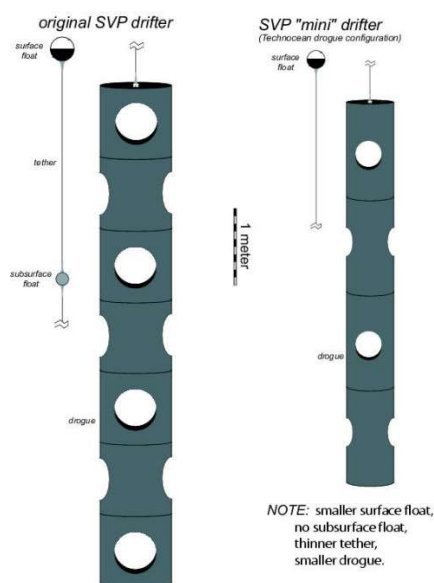


Fig. 27 – SPV *drifter* e SPV “mini” *drifter* (NOAA, 2010).

O *Argos* é um sistema baseado em satélites que recolhe, processa e distribui dados, sendo operado pela *Collecte Localisation Satellites* em Toulouse, França. Este sistema tem sido utilizado por satélites ambientais norte-americanos para obter uma cobertura global. A posição de um *drifter* não é, normalmente, dada através do GPS (*Global Positioning System*), em vez disso, infere-se a partir da mudança do efeito *Doppler* da sua transmissão, tal como vista pelo satélite e descrita no *Argos Users Manual*. O sistema *Argos* especifica a precisão das correcções de posição de acordo com uma classe de localização: classe um (erro de 350-1000 m), classe dois (erro de 150-350 m) e classe três (erro de menos de 150 m). As localizações dos *drifters* são estimadas a partir de 16-20 fixações de satélite por dia. A cada transmissor *drifter* é atribuído um código PTT (*Platform Terminal Transmitter*), frequentemente referido como ID do transmissor. Os dados dos sensores, como a temperatura da superfície do mar, são fornecidos em média em janelas de 90 s e são transmitidos a 401,65 MHz (NOAA, 2010). A Fig. 28 representa um esquema do sistema de comunicação dum *drifter* SVP, este transmite os seus dados e a sua posição via satélite para terra.

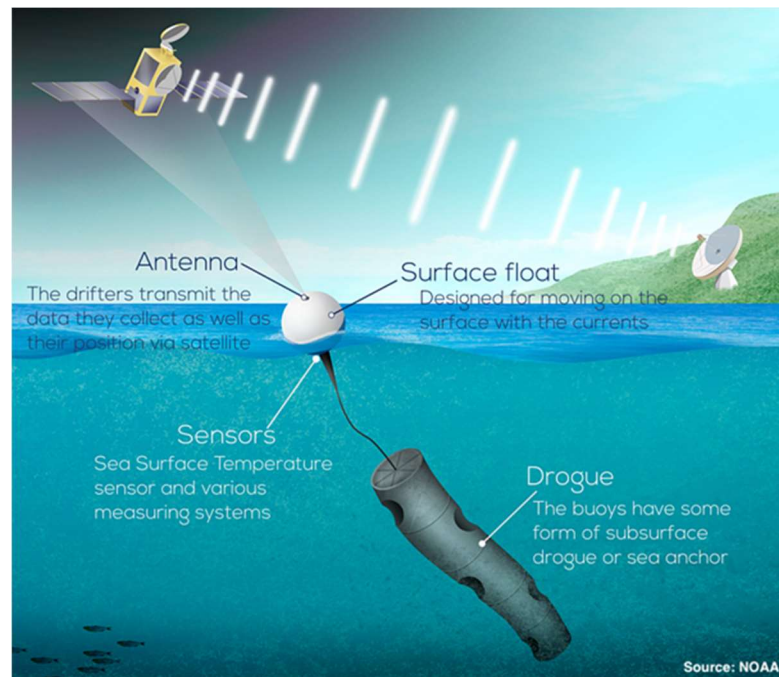


Fig. 28 – Esquema do sistema de comunicação de um *drifter* (NOAA, 2010).

Os *drifters* podem fornecer uma grande variedade de dados sobre diferentes indicadores oceânicos, dependendo da variedade de sensores de que dispõe. Destacam-se, por exemplo:

- A temperatura da superfície do mar (*Sea Surface Temperature*, SST): todos os *drifters* SVP medem a temperatura 20-30 cm abaixo da superfície do mar. Estes dados são disseminados no *Global Telecommunication System* (GTS) pelo *Argos*, duas horas após a recepção, para utilização em previsão numérica da meteorologia e análise SST operacional, e para calibrar campos SST derivados de satélites (NOAA, 2010);
- Pressão barométrica: os *drifters* SVP-B foram equipadas com um barómetro para medir a pressão do ar. Estes dados são particularmente valiosos na previsão numérica da meteorologia em altas latitudes, onde poucas observações *in-situ* estão disponíveis se uma tempestade se desenvolve fora das principais rotas de navegação. O barómetro estende-se 20 cm acima do topo da superfície da bóia para minimizar picos esporadicamente altos no registo de pressão associado à submersão da bóia (NOAA, 2010);
- Vento: alguns *drifters* incluem um hidrofone para a medição do nível de ruído, que pode ser convertido em estimativas de velocidade do vento e precipitação, e um cata-vento de 25 cm por 20 cm montado na porta do barómetro da bóia de superfície (com sensor de inclinação de dois eixos no flutuador e conexão giratória para o cabo) para medir a direcção do vento. *Drifters* SVP desse tipo são conhecidos como *Minimets*. O hidrofone WOTAN é normalmente montado no cabo, a uma profundidade de 11 m, ou entre o cabo e o topo da ancora flutuante (NOAA, 2010);
- Cor do oceano: alguns *drifters* possuem um sensor de radiância de afloramento montado na superfície flutuante logo abaixo da superfície do mar, juntamente com um sensor de radiância

de reflorestamento. As suas observações têm sido usadas para estudar as variações da clorofila em regiões remotas como o Oceano Antártico (Letelier *et al.*, 1996);

- Salinidade (*Sea Surface Salinity*, SSS): incluem sensores CTD (*Conductivity, Temperature and Depth*) a partir dos quais a salinidade pode ser calculada;
- Temperatura de subsuperfície: vários fabricantes estão a desenvolver *drifters* com cadeias de termístores para medir perfis de temperatura até 100 metros de profundidade. Estas observações tem uma importância inestimável para avaliar a variabilidade do conteúdo de calor em camadas mistas.

As redes globais de bóias, Fig. 29, são geralmente projectadas para atender às necessidades nacionais de previsão e para monitorar o clima regional ou, no caso dos *drifters*, para monitorizar correntes oceânicas médias. Apesar de todos os esforços para padronizar os requisitos para as bóias, particularmente no caso dos *drifters*, existem muitas variantes comercialmente disponíveis (Castro *et al.*, 2012). O *Global Drifter Program* (GDP) trabalha em conjunto com agências meteorológicas/oceânicas nacionais para implantar regularmente grandes quantidades de *drifters* SPV (a bóia tem uma duração média de vida de 2 anos), para servir de apoio aos seus programas de investigação. Medições infravermelhos, através de satélites ambientais operacionais em várias janelas, permitem a obtenção de resultados globais de alta resolução e precisão de parâmetros da superfície dos oceanos, os *drifters* são um bom meio para validar essas estimativas dos satélites (Castro *et al.*, 2012). Actualmente o GDP tem mais de 1400 *drifters* e 500 bóias amarradas, embora o número exacto esteja constantemente a mudar, uma vez que é necessária uma recolocação regular para manter a densidade de bóias necessária em áreas dinâmicas (DBCP, 2019).

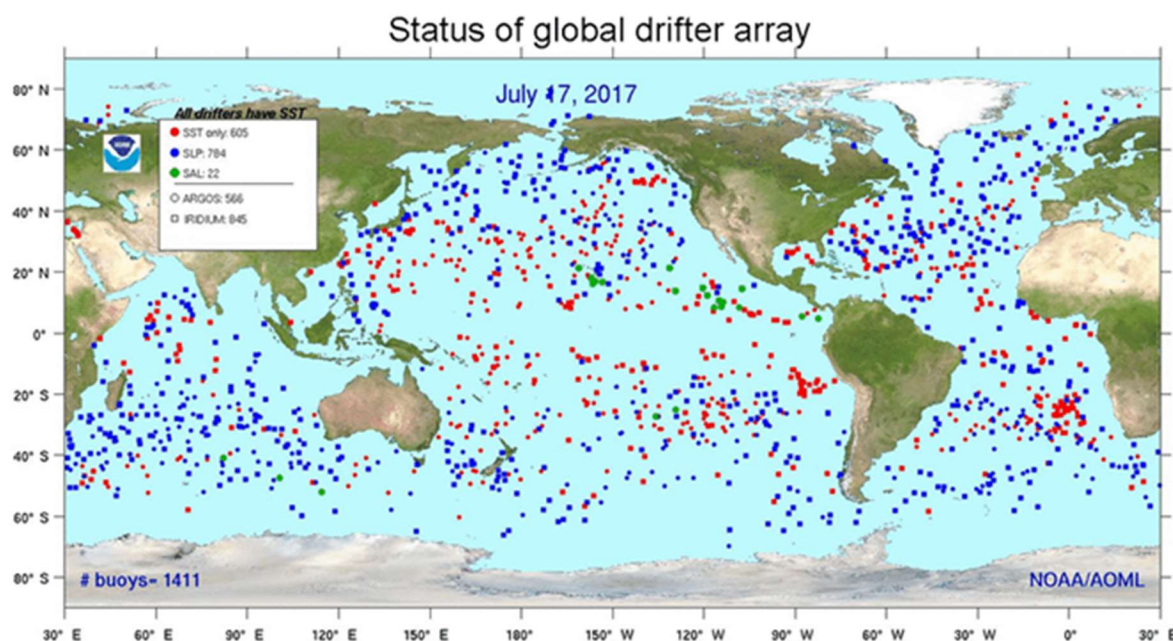


Fig. 29 – Distribuição da matriz global de *drifters* em 2017 (Isern-Fontanet *et al.*, 2017).

2.3. OUTROS EQUIPAMENTOS OFFSHORE

2.3.1. AMARRAÇÕES (MOORINGS)

As amarrações (*moorings*) fornecem um suporte para sensores e instrumentos a profundidades fixas entre o fundo e a superfície do mar, e para *profilers* (ou cápsulas científicas) que se movem para cima e para baixo ao longo do cabo de amarração. Uma amarração, Fig. 30, é ancorada ao fundo do mar por um cabo que se estende para cima de uma ou mais âncoras até uma ou mais bóias localizadas na coluna de água ou na superfície do mar. Estes cabos de amarração são, normalmente, de aço e revestido com uma camisa de plástico, linhas sintéticas ou cabos electromecânicos com condutores de cobre. Quando as amarrações estão completamente submersas, comunicam os dados para terra através de uma ligação acústica a planadores próximos ou através de cabos instalados no fundo do mar, quando tem expressão na superfície comunicam via satélite (OOI, 2018).

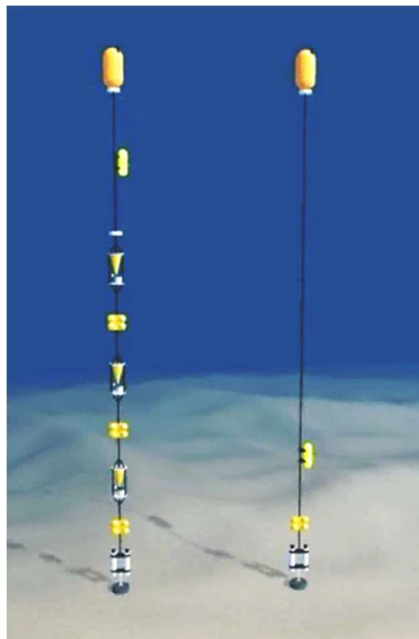


Fig. 30 – Exemplo de uma configuração típica de um amarração (WHOI, 2019)

Estes equipamentos fazem medições repetidas de correntes oceânicas e propriedades da água para cima e para baixo através de quase toda a coluna de água, mesmo em águas muito profundas. Os instrumentos básicos que carregam são um CTD (*Conductivity, Temperature and Depth*) para medições de temperatura e salinidade e um ACM (*Acousting Current Meter*) para medir correntes, mas outros instrumentos podem ser adicionados, incluindo sensores bio-ópticos e químicos. À medida que cresce o interesse nas alterações climáticas globais, cresce também a necessidade de registos longos da variabilidade dos oceanos.

Os dados recolhidos ao longo de temporadas e anos são críticos para o desenvolvimento de modelos de atmosfera oceânica e estudo sobre as interações atmosfera-oceânicas. As amarrações foram concebidas como uma forma económica de realizar amostragens oceânicas de longo prazo (WHOI, 2019).

Este equipamento *offshore* pode ser utilizado em profundidades de água que vão desde 50 m até ao fundo do mar a 5.000 m ou mais. O *profiler*, Fig. 31, usa um motor de tracção movido a bateria para subir e descer o cabo de amarração, os seus sensores documentam as propriedades da água e da corrente

à medida que este sobe e desce. Os *profilers* têm energia de bateria suficiente para percorrer um total de cerca de 1000 km por instalação, geralmente, um tempo de vida limitado a um ano (WHOI, 2019).

As amarrações, tal como foi visto anteriormente, tem a grande vantagem de registar as características da água a grandes profundidades - até 5.000 m, e operando até um ano de cada vez, registando mudanças diárias e sazonais que seriam simplesmente impossíveis de obter através de outros equipamentos *offshore* ou através de navios. Por outro lado, tal como acontece com a maioria dos instrumentos submersos, estas amarrações são de difícil acesso sendo a sua manutenção difícil e dispendiosa. O facto de dependerem de baterias para alimentar os instrumentos e o motor limita bastante o equipamento (WHOI, 2019).



Fig. 31 – Pormenor do *Profiler* de uma amarração (WHOI, 2019)

2.3.2. SISMÓMETRO DE FUNDO DO MAR

O Sismómetro de fundo de mar (*Ocean-Bottom Seismometer – OBS*), Fig. 32, é um dispositivo concebido para registar o movimento da Terra sob os oceanos. O sismómetro, em si, é constituído por um pequeno cilindro de metal, ao qual está associado equipamento para executar o sismómetro e registar os seus dados (baterias e um registador de dados), peso de lastro para o manter no fundo do mar e um flutuador que quando activado, remotamente, permite trazer o instrumento de volta à superfície.

Cerca de 90% de todos os terremotos naturais ocorrem debaixo de água, onde a grande pressão e as baixas temperaturas dificultam a realização de medições. O sismógrafo de fundo do oceano foi desenvolvido para executar essa tarefa. A possibilidade de ligar um sismógrafo a uma bóia amarrada permite a comunicação com terra através de satélites, tornando os dados deste instrumento instantaneamente disponíveis. Importa ainda referir que, os sismógrafos de fundo de oceano são difíceis de instalar com precisão pois geralmente são colocados a grandes profundidades e necessitam de estar instalados em leito rochoso para fazerem medições precisas. Estes equipamento tem também uma vida útil curta devido a dependerem exclusivamente de baterias (WHOI, 2004).

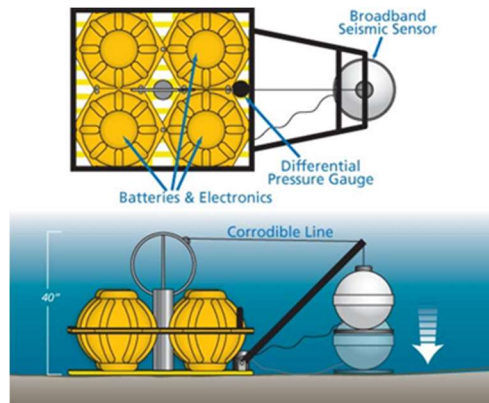


Fig. 32 – Esquema dum Sismómetro de Fundo do Mar (WHOI, 2004)

2.3.3. PERFILADOR HIDROACÚSTICO DE CORRENTES DE FUNDO DO MAR

Um perfilador hidroacústico de correntes *Doppler*, frequentemente referido com a sigla ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*), Fig. 33, é usado para medir a velocidade com que a água se move em toda a coluna de água. O ADCP mede não só a velocidade, como também, as correntes oceânicas, tendo por base o chamado efeito *Doppler*, simplificada, uma onda sonora tem uma frequência mais elevada, quando se move na direcção do observador do que quando se afasta do mesmo.

Este equipamento funciona transmitindo ondas sonoras de alta frequência (entre 75 kHz e 3 MHz) numa forma constante para a água. Conforme as ondas sonoras viajam reflectem em partículas suspensas na água em movimento e retornam ao equipamento. Devido ao efeito *Doppler*, as ondas sonoras reflectidas por uma partícula que se afasta têm uma frequência ligeiramente mais baixa, enquanto que as ondas sonoras reflectidas pelas partículas que se movem em direcção ao equipamento tem uma frequência mais alta. A diferença de frequência entre as ondas que o ADCP envia e as ondas que recebe é chamada de mudança *Doppler*. O equipamento usa essa mudança para calcular a rapidez com que a partícula e a água em torno dela se movem (WHOI, 2018). Os ADCP que são montados no fundo do mar precisam de uma âncora para mantê-los estáveis no fundo, baterias e um sistema de aquisição de dados interno. Tem a vantagem de medir a velocidade absoluta da água e não apenas a velocidade com que uma massa de água se move em relação à outra, bem como a capacidade fazer medições numa coluna de água até 1000 m de altura. Como o ADCP é instalado no fundo oceano está protegido das condições adversas na superfície. O facto de depender de baterias limita bastante o equipamento (WHOI, 2018).

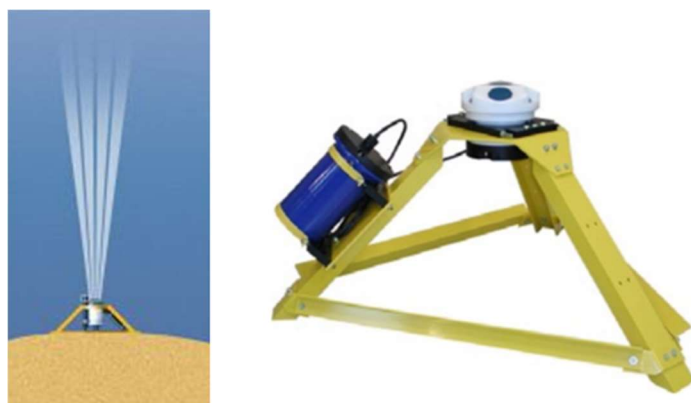


Fig. 33 – Esquema dum Perfilador Hidroacústico de Correntes Doppler (WHOI, 2018)

2.3.4. FLUTUADORES

Um flutuador é um equipamento *offshore* que serve de plataforma para sensores oceanográficos que fazem medições abaixo da linha de água. Normalmente os flutuadores transportam apenas um sensor CTD que mede a temperatura, a condutividade e a pressão (a partir dos quais a salinidade pode ser calculada), alguns flutuadores transportam ainda um hidrofone, que permite recolher dados acústicos. Muitas vezes, os flutuadores são considerados descartáveis, pois os custos associados à sua recuperação de áreas remotas do oceano é proibitiva; quando as baterias falham, um flutuador deixa de funcionar e flutua, em profundidade, até encalhar ou afundar (Argo, 2016).

Desenvolvendo novas gerações de flutuadores com pequenos conversores de energia de ondas instalados, seria possível garantir a autossuficiência energética dos mesmos, evitando que fossem considerados descartáveis, uma evolução neste sentido seria não só financeiramente compensadora, como também, ecologicamente correcta.

A *Argo*, para obter dados oceânicos utiliza, além de *drifters*, flutuadores autónomos movidos a bateria que passam a maior parte de sua vida à deriva em profundidades, onde ficam estabilizados por terem um peso igual à impulsão hidrostática e uma compressibilidade menor que a da água do mar. Os flutuadores podem alterar a sua flutuabilidade a fim de se moverem verticalmente no oceano, recolhendo repetidamente dados de profundidades diferentes. Actualmente, a *Argo* utiliza vários modelos de flutuadores, que trabalham de forma similar, porém, diferem um pouco nas suas características de projecto. A cada intervalo de 10 dias, o flutuador bombeia o fluido para uma bexiga externa e sobe à superfície durante cerca de 6 horas enquanto mede a temperatura e a salinidade. Os satélites ou GPS determinam a posição dos flutuadores quando emergem, e os flutuadores transmitem seus dados para os satélites. A bexiga volta a esvaziar-se e o flutuador retorna à sua configuração original e afunda até que o ciclo seja repetido. Os flutuadores são projectados para fazer cerca de 150 ciclos desse tipo e são capazes de medir permanentemente perfis verticais de temperatura e salinidade até aos 2000 m, bem como a velocidade da corrente aos 1000 m. antes da exaustão da bateria (Argo, 2016). A Fig. 34 representa um esquema de um ciclo de um flutuador *Argo*.

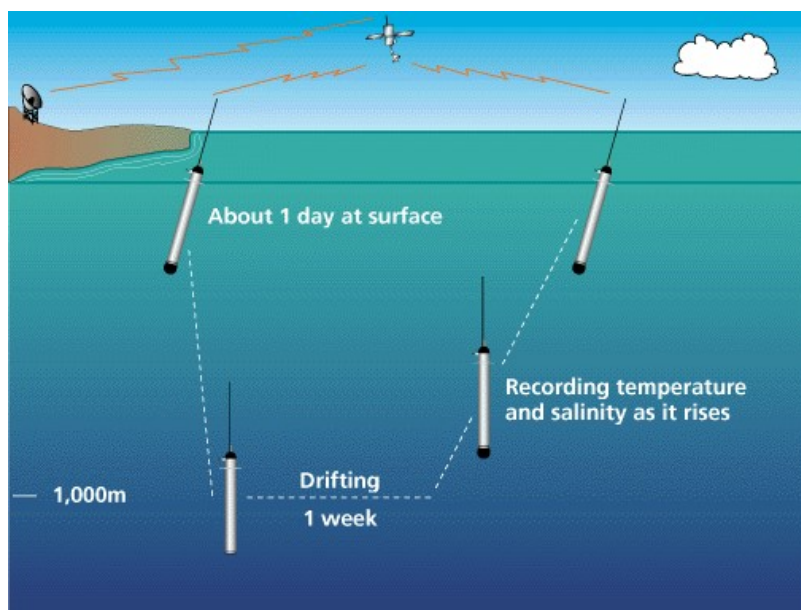


Fig. 34 – Esquema dum ciclo de flutuação Argo (Argo, 2016)

2.4. INSTALAÇÕES OFFSHORE

As instalações *offshore* são estruturas marítimas, normalmente de grandes dimensões, utilizadas para alojar tripulação, equipamentos e maquinaria para a exploração de recursos naturais, tais como combustíveis fósseis a partir do fundo do mar, e energia eólica bem como para produção alimentar. Normalmente estas instalações estão localizadas na plataforma continental, mas podem também estar em águas mais profundas, fixas ao fundo oceânico ou flutuantes. Associadas a estas instalações estão variados equipamentos *offshore* que auxiliam, monitorizam e garantem a segurança.

2.4.1. PLATAFORMAS PETROLÍFERAS

Uma plataforma petrolífera é uma estrutura *offshore* de grandes dimensões usada para perfurar e extrair petróleo e/ou gás natural a partir dos fundos oceânicos. Dependendo das circunstâncias e condições locais, a plataforma pode ser flutuante ou fixa. Uma plataforma típica pode ter até cerca de trinta perfurações, direccionais, que permitem que os poços sejam alcançados, caso seja necessário, a diferentes profundidades de fundo oceânico e em posições até cerca de 8 km da plataforma. Devido a este grande raio de acção das plataformas, as bóias de assinalamento e vigilância são essenciais para garantir a segurança, servir de ajuda à navegação dos navios petroleiros e sinalizar os locais de perfuração e possíveis perigos.

As companhias petrolíferas necessitam de ter relatórios meteorológicos automatizados nas plataformas de perfuração de petróleo para minorar possíveis problemas no seu correcto funcionamento, garantindo um controle de qualidade. É, portanto, necessário dispor de um sistema local de monitorização de parâmetros oceânicos, através de bóias de monitorização por exemplo, que quando incorporados num programa nacional com comunicações confiáveis, processamento e controle de qualidade em centros apropriados, fornecem dados de valor inestimável para estas companhias petrolíferas e agências de previsão meteorológica. Frequentemente, os dados de espectros de ondas obtidos nesses equipamentos de monitorização tendem a ser propriedade de empresas petrolíferas (Meindl, 1996). Para além de bóias de assinalamento, monitorização e vigilância anexas a estas plataformas, estas necessitam ainda dum conjunto de sistemas *in situ* que garantem todos os requisitos operacionais e de segurança conhecidos para auxílio à navegação em instalações *offshore*, Fig. 35, designadamente: detectores de nevoeiro, sinais de nevoeiro, estações de luzes, sistemas de monitorização de curto alcance (*Automatic Identification System*, AIS) e Radares RACON são essenciais. Estes sistemas garantem a sua energia através de painéis solares e baterias (Tideland, 2017). Actualmente estão a ser desenvolvidos novas alternativas energéticas, baseadas em conversores de energia de ondas, para tornar estes equipamentos completamente autossuficientes, garantindo o mínimo de falhas e interrupções de funcionamento.



Fig. 35 – Esquema dos sistemas anexos a uma plataforma petrolífera (Tideland, 2017).

2.4.2. AQUACULTURA OFFSHORE

A aquacultura *offshore* pode ser definida como a criação de organismos marinhos em condições controladas, localizadas em ambientes oceânicos expostos e suficientemente afastados da influência (protecção) costeira. As unidades produtivas e respectivas actividades produtivas estão localizadas a uma distância considerável da costa e estão expostas, por todos os lados, às acções do ambiente marítimo. Estão repartidas em lotes, de forma a agrupar, no seu interior, um conjunto estabelecido de culturas marinhas, devidamente individualizados. Estas áreas de produção aquícola em mar aberto necessitam de estar devidamente sinalizadas de acordo com o regulamento de balizagem em vigor e as recomendações da IALA (*International Association of Aids to Navigation and Lighthouse Authority*), para isso são necessárias bóias de assinalamento nestas instalações (Freitas, 2013).

Como já foi referido anteriormente, a aquacultura é um método de produção de alimentos confrontado com muitos desafios. Esses desafios criaram a necessidade de recorrer a tecnologias mais avançadas de monitorização e alimentação, a fim de criar condições de crescimento sustentável e rigorosamente controladas. De facto, sem um controlo preciso das condições de crescimento, a saúde da "cultura" pode ser afectada, resultando em níveis de produção decepcionantes, custos de produção elevados, poluição da água e até mesmo doenças (YSI, 2018).

Existem diversos dispositivos que monitorizam e gerem eficazmente as operações de aquacultura Fig. 36. Os instrumentos portáteis de monitorização da qualidade da água de amostragem pontual permitem uma verificação rápida das condições da água, enquanto os sensores multiparamétricos contínuos e monitores de Oxigénio dissolvido (*Dissolved Oxygen*, DO) podem ajudar no controlo do processo em toda a instalação, controlando os ciclos de alimentação através de temporizadores e monitorizando as velocidades e direcções da corrente, temperatura da água, salinidade, turbidez e oxigénio dentro e fora das gaiolas, pH da clorofila, etc. (Aanderaa, 2019). Estas medições podem ser utilizadas para obter informações sobre as condições físicas, químicas e biológicas da qualidade da água numa dada exploração, a fim de identificar a sua aptidão para a aquacultura, tanto para as espécies de animais de interesse como para avaliar o risco potencial de algas nocivas ou tóxicas (Schmidt *et al.*, 2018).

Actualmente existe *software* que permite uma gestão geral da instalação, controlando facilmente as condições de qualidade da água em tempo real e remotamente. Além disso, podem ser configurados alarmes quando as condições ficam abaixo dos padrões definidos pela equipa responsável pela gestão,

alertando-a rapidamente para que possa responder rapidamente às mudanças nas condições ambientais externas (YSI, 2018).

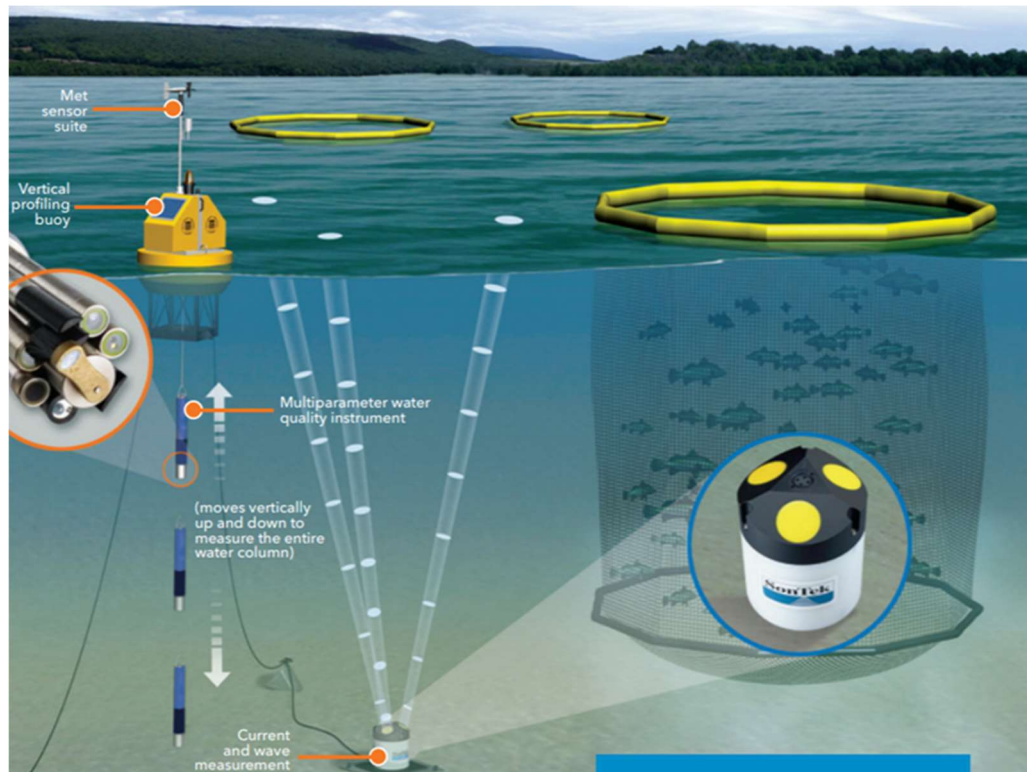


Fig. 36 – Esquema dos sistemas anexos a uma instalação de aquacultura *offshore* (Aanderaa, 2019).

2.4.3. PARQUES EÓLICOS OFFSHORE

A energia eólica é amplamente explorada como uma fonte de produção de energia renovável promissora em todo o mundo. No passado, quase toda esta geração ocorreu em parques eólicos *onshore*, sendo que em 2011, apenas 1,7% da energia eólica era proveniente de fontes *offshore*. No entanto, a energia eólica *offshore* atrai actualmente uma atenção considerável devido às suas vantagens: melhor qualidade do recurso eólico em locais marítimos, onde a velocidade do vento é geralmente maior e mais estável, existência de maiores áreas abertas no mar, onde os parques eólicos podem ser instalados, levando a instalações de maior dimensão e às vantagens decorrentes de efeitos de escala. Assim, a produtividade energética aumenta e os esforços de fadiga do vento sobre os geradores das turbinas diminuem. Quando as turbinas eólicas *offshore* estão localizadas longe das áreas populacionais, as questões relacionadas com o impacto visual e o ruído são eliminadas (Hong *et al.*, 2015).

Tal como nas plataformas petrolíferas, são necessários dispositivos de assinalamento para marcar com segurança os parques eólicos, não só durante a fase de construção, mas numa forma permanente, quando a construção estiver concluída, Fig. 37. Equipamentos como lanternas marinhas autónomas e de longo alcance, bóias de navegação, ajudas electrónicas de navegação e sistemas para monitorizar e controlar remotamente os activos são absolutamente essenciais. Estes equipamentos exigem uma manutenção contínua e recuperação no final dos períodos de serviço, de acordo com as recomendações da IALA (Sealite, 2019).



Fig. 37 – Bóia *SEALITE Nautilus-2200* assinalando o parque eólico *Scroby Sands* no Reino Unido (Sealite, 2019).

De acordo com o regulamento da IALA, cada turbina individual deve também ser assinalada por uma luz branca visível desde uma distância de 5 milhas náuticas, como essa luz deve ser vista de todas as direcções, é recomendada a instalação de 2 “focos” no mínimo, piscando o Código Morse “U”, montados a uma altura mínima de 15 m acima da maré astronómica mais alta, mas abaixo das pás da turbina. A torre também deve ser pintada de amarelo a toda a volta a uma altura de 15 m acima maré astronómica mais alta. Para marcar grupos de estruturas (parques eólicos), a recomendação pede uma luz amarela de alcance de 5 milhas náuticas em cada estrutura periférica significativa que deve ser vista em todas as direcções. Isso requer duas ou três luzes sincronizadas. Além desses requisitos mínimos, a IALA recomenda ainda a instalação nos parques eólicos *offshore*: um sinal de nevoeiro com alcance de duas ilhas náuticas, um radar RACON, e um sistema de monitorização de curto alcance – AIS (Tideland, 2019).



Fig. 38 – Vista aérea da *wind farm Kentish Flats* no Reino Unido (Tideland, 2019)

Para se poder estimar a rentabilidade dos parques eólicos offshore, é necessário determinar o potencial eólico local que depende da velocidade, direcção e variabilidade do vento. Para isso são utilizadas bóias equipadas com tecnologia avançada de medição do vento, Fig. 39, que fornecem os dados necessários, caracterizando correctamente o recurso vento (Phys, 2019). Com efeito as velocidades de vento mais elevadas e constantes no mar podem compensar os maiores custos de investimento para construir os parques eólicos *offshore* e conectá-los à rede eléctrica. A rentabilidade dos parques eólicos resulta da diferença entre o ganho com a energia produzida fornecida e os custos de construção e manutenção.

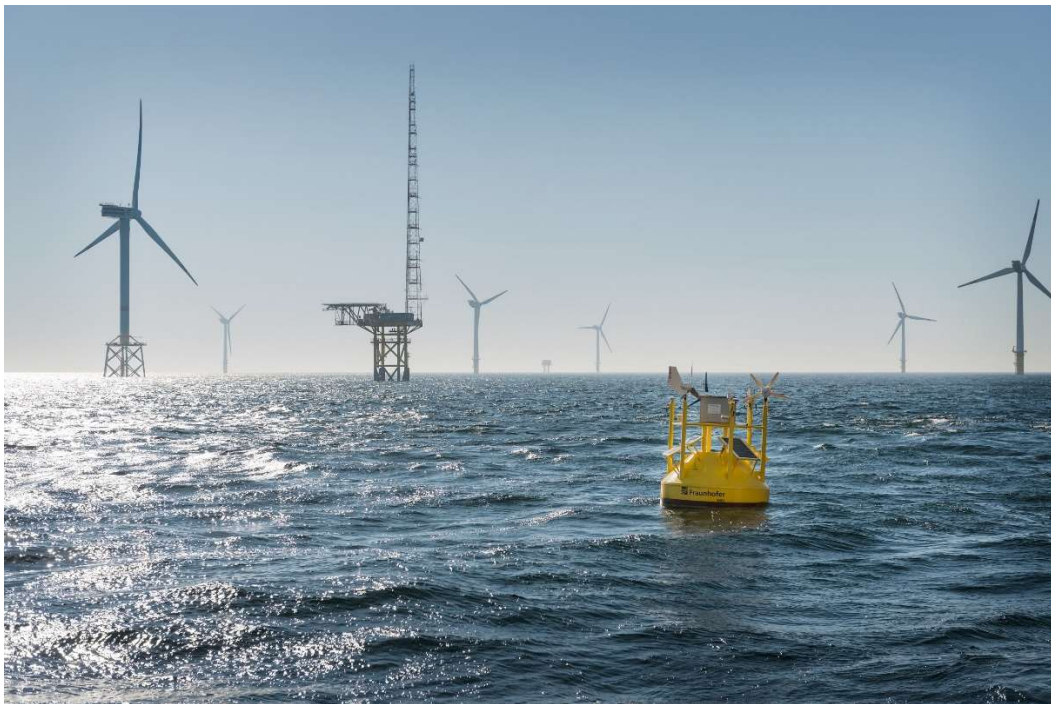


Fig. 39 – Bóia *SEAWATCH Wind LiDAR* monitorizando um parque eólico *offshore* localizado na costa da China (Phys, 2019).

2.5. AUTOSSUFICIÊNCIA ENERGÉTICA E AUTONOMIA EM LOCAIS REMOTOS OFFSHORE.

Tendo por base a informação apresentada no presente capítulo, a maioria dos equipamentos *offshore* obtém a energia de que necessita através de painéis solares e/ou baterias. Se os dispositivos dependerem apenas de baterias, são tratados como descartáveis (caso sejam *drifters* ou flutuadores), uma vez que quando as baterias falham, estes equipamentos deixam de funcionar, e a despesa que é necessário realizar para recuperá-los de áreas remotas do oceano é proibitiva.

Nos casos em que os equipamentos dependem de baterias associadas a painéis fotovoltaicos, apesar do aumento recente no tempo de vida útil das baterias, em geral estes possuem muitas condicionantes e um tempo de vida limitado. Os níveis de eficiência dos painéis solares são relativamente baixos (entre 14% e 25%) em comparação com os níveis de eficiência de outros sistemas de conversão de energias renováveis e, embora não tenham custos de fabrico (devido à recente produção em massa de painéis solares na China) manutenção ou de funcionamento consideráveis, são frágeis e podem ser danificados com relativa facilidade, devido à sua exposição aos elementos naturais. A energia solar é uma fonte de energia intermitente, com a produção de energia dependente do sol. Os painéis solares não produzem energia durante a noite e durante o dia, se o tempo estiver muito nublado ou chuvoso, estas intermitências no fornecimento de energia podem levar a interrupções no correcto funcionamento do equipamento dependente. Consequentemente, a intermitência e a imprevisibilidade da energia solar tornam os painéis solares uma solução menos fiável para aplicações *offshore*, especialmente nos locais mais remotos.

Uma alternativa a este método típico de obtenção de energia, utilizado pela maioria dos equipamentos *offshore* é recorrer à energia das ondas. No entanto, a maior parte do potencial energético dos oceanos é de difícil conversão em energia eléctrica por razões técnicas. As tecnologias convencionais de conversão de energia das ondas em electricidade são baseadas em geradores electromagnéticos ou sistemas e turbinas hidráulicas volumosos e pesados, que não são convenientes para serem instalados como fonte de produção de energia de pequenos equipamentos *offshore* (Cheng *et al.*, 2019).

Na presente dissertação, apresenta-se uma abordagem diferente, que consiste na utilização de nanogeradores triboelétricos (*triboelectric nanogenerator*, TENG). O nanogerador triboelétrico baseia-se na conjugação do efeito triboelétrico e da indução electrostática. É considerado uma forma promissora de absorver a energia mecânica ambiente de baixa frequência e aleatória, com a grande vantagem de terem um peso reduzido, estrutura simples, utilizam materiais abundantes e de baixo custo. Assim sendo, esta tecnologia é adequada para absorver a energia das ondas do oceano, e servir como fonte de energia para alimentar de maneira contínua as componentes electrónicas e/ou carregamento de uma bateria ou capacitor de qualquer equipamento *offshore*. Apresenta-se assim como uma alternativa viável aos sistemas de produção de energia actualmente existentes nestes equipamentos (Cheng *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2019).

A Tabela 1 apresenta a comparação entre os nanogeradores triboelétricos e dois dos tipos mais comuns de painéis solares: células solares policristalinas e células solares de película fina, para diferentes características.

Tabela 1 – Comparação entre nanogeradores triboelétricos, células solares policristalinas e células solares de película fina.

Característica	Nanogerador Triboelétrico	Célula solar policristalina	Célula solar de película fina
Eficiência	70%	20%	16-23%
Preço	< 1 € / m	> 6 € / m	1.8 € / W
Peso	< 10 g	> 200 g	160 g
Dependência de condições de iluminação	Não	Sim	Sim
Sobreposição 3D	Sim	Não	Não
Fácil Fabricação	Sim	Não	Não
Dimensões	9.5 cm x 7.5 cm x 7.5 cm	15.6 cm x 15.6 cm	12 cm x 6.7 cm x 0.13 cm

Uma das características dos sistemas autónomos é a ausência de conexões físicas com qualquer operador, uma vez que produzem toda a energia necessária localmente. Assim, devido a este novo desenvolvimento na tecnologia, é possível ter geradores de energia de alto desempenho, comerciais, a custos razoáveis. Se combinarmos isto com as densidades de energia fornecidas pelas novas tecnologias de baterias, como o ião de lítio, é evidente que é possível conceber um sistema de gestão de energia que pode fornecer continuamente energia a toda a electrónica de bordo, seja ela constituída por sensores, armazenamento interno de dados, transmissão de dados via rádio ou satélite, lanternas, sinais de nevoeiro, entre outros. A implementação desta nova tecnologia permite assim ganhar capacidade para monitorizar, assinalar ou vigiar o oceano em escalas espaciais e temporais cada vez mais longas, complementando, assim, outras tecnologias já em uso (Cruz *et al.*, 2008).

3

SISTEMA A DESENVOLVER

3.1. ENQUADRAMENTO

Para se compreender a inovação do sistema a desenvolver – nanogerador triboelétrico (TENG) – é necessário rever o estado da arte relativo a sistemas convencionais de conversão de energia das ondas, dando especial atenção aos métodos mais comuns de extracção dessa energia, para se perceber as diferenças referentes à dimensão/custo, eficiência e finalidade e concluir que a maioria destes dispositivos não são convenientes para serem utilizados como fonte de produção de energia local para sensores, luzes, baterias, etc. de equipamentos *offshore*.

3.2. SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DE ONDAS

Existe um elevado número de conceitos diferentes para a conversão da energia de onda (*Wave Energy Converters* – WEC). Apesar variedade em design, os sistemas de conversão da energia das ondas podem ser classificados consoante a sua localização relativamente à costa, dimensão e/ou orientação do dispositivo em relação às ondas, princípio de funcionamento e, por último, segundo o método de extracção utilizado na conversão da energia das ondas.

3.2.1. LOCALIZAÇÃO

O critério adoptado para a classificação de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia eléctrica, está relacionado com a distância do dispositivo em relação à costa. Assim sendo podem ser agrupados em:

- Dispositivos costeiros (*Onshore* ou *Shoreline*);
- Dispositivos próximos da costa (*Near-shore*);
- Dispositivos oceânicos (*Offshore*).

O motivo pelo qual essa classificação é feita deve-se, não apenas à distância efectiva do dispositivo à costa, mas sobretudo às profundidades resultantes uma vez que as duas variáveis estão relacionadas, Fig. 40. O regime de ondas é mais energético em maiores profundidades, em princípio será mais vantajoso colocar tais dispositivos em profundidades superiores. No caso dos dispositivos *near-shore* as profundidades serão normalmente inferiores a 20 m e os dispositivos estão assentes no fundo do mar. No terceiro caso, *offshore*, a profundidade fica em torno dos 50 m e os dispositivos são normalmente flutuantes.

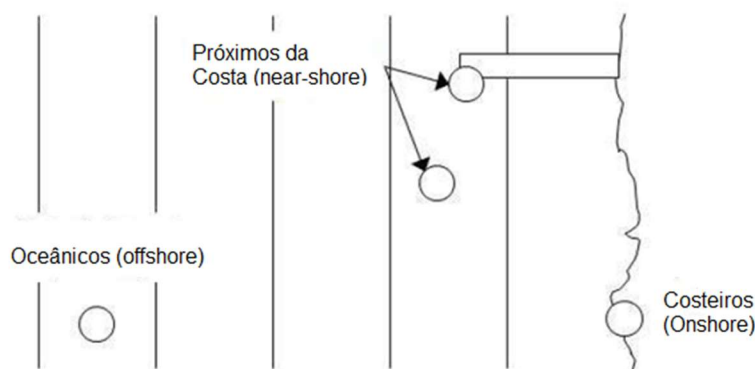


Fig. 40 – Classificação de dispositivos quanto à distância à linha de costa (André, 2010).

Os dispositivos costeiros têm a vantagem de estar próximos da rede eléctrica, são fáceis de manter e, como parte da energia das ondas é dissipada devido às baixas profundidades, estes sistemas têm uma probabilidade reduzida de ser danificados em condições extremas. Por outro lado, esta redução de energia faz com que haja menos potencial energético disponível para aproveitar. A amplitude das marés também pode ser um problema. Devido à natureza da sua localização, dimensões e impacto visual, geralmente estes sistemas só podem ser implantados em determinados locais, sendo necessário estudar a geometria da linha costeira e geologia, e ter em conta a preservação da paisagem costeira. Este tipo de dispositivos, devido à sua larga escala, não é susceptível a ser utilizado como fonte de fornecimento de energia a equipamentos *offshore*.

Os dispositivos *near-shore* são frequentemente fixos ao fundo do mar, o que lhes confere uma base estável contra a qual um corpo oscilante pode trabalhar. Tal como os dispositivos costeiros, o facto de serem fundados em águas relativamente pouco profundas faz com que estejam sujeitos a ondas menos energéticas, limitando o potencial de aproveitamento de energia das ondas. Por outro lado, o facto de serem fixos ao fundo do mar complica uma possível ligação, para fornecimento de energia, a equipamentos flutuantes, e seriam sempre dois sistemas independentes um do outro.

Os dispositivos *offshore* têm a vantagem de, ao se situarem em águas profundas, poderem em teoria converter maiores quantidades de energia devido ao maior conteúdo energético das ondas em águas profundas (Duckers, 2004). Contudo, dispositivos *offshore* são mais difíceis de construir e manter, devido à maior altura de onda de projecto e maior conteúdo energético das ondas. Precisam de ser projectados para sobreviver às condições mais extremas de alto mar o que aumenta bastante os custos. É importante notar que a energia das ondas ocorre nos movimentos da água perto da superfície do mar, até 95 por cento da energia de uma onda é localizado entre a superfície da água e um quarto um comprimento de onda abaixo dele (Duckers, 2004).

3.2.2. DIMENSÃO E/OU ORIENTAÇÃO DO DISPOSITIVO

Esta classificação pretende descrever o princípio de operação e a geometria do dispositivo, representado na Fig. 41, sendo possível distinguir:

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

Os atenuadores são dispositivos de grandes dimensões, que têm o seu comprimento da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda para o qual foram projectados e estão alinhados com a direcção de propagação da onda, ou seja, estão paralelos à direcção da onda predominante (Cruz *et al.*, 2004).

Um dispositivo absorvedor pontual é um dispositivo que possui pequenas dimensões relativas ao comprimento de onda incidente. Normalmente são estruturas flutuantes ou dispositivos submersos que dependem do diferencial de pressão gerado com a passagem da onda. Devido ao seu pequeno tamanho, a direcção da onda não é importante para esses dispositivos. Existem numerosos exemplos de diferentes configurações de dispositivos de absorção pontual. Os dispositivos de absorção pontual são os ideais para serem utilizados no fornecimento de energia a equipamentos *offshore*.

Os terminadores são dispositivos que também têm um tamanho da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda para o qual foram projectados. Os terminadores são posicionados de forma a ficarem na perpendicular com a onda dominante. Qualquer dispositivo costeiro pode ser classificado como terminador (Cruz *et al.*, 2004), sendo que dispositivos deste tipo, por esse motivo, e pela sua grande dimensão, não são indicados para fornecer energia a equipamentos *offshore*.

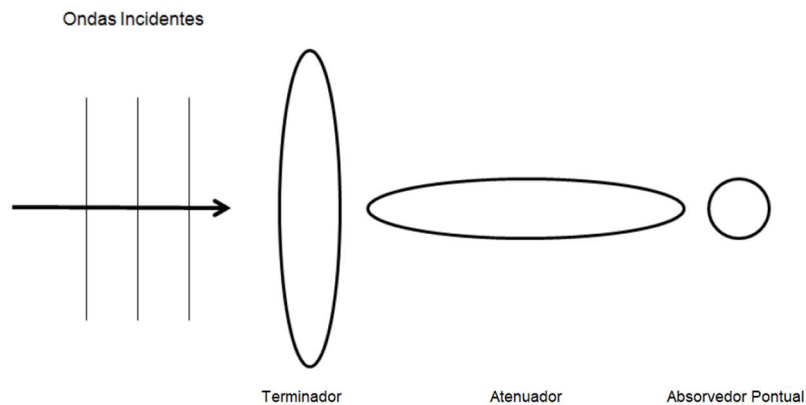


Fig. 41 – Classificação de dispositivos de conversão de energia das ondas quanto à orientação em relação às ondas (André, 2010).

3.2.3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Apesar da existência de uma grande variedade de dispositivos de conversão de energia das ondas, estes são classificados num reduzido número de grupos básicos. No entanto, os dispositivos podem ser classificados tendo em base diferentes critérios, implicando diferentes classes de agrupamento. Os dispositivos, Fig. 42, podem assim ser classificados consoante o princípio de funcionamento (Cruz *et al.*, 2004), tal como se descreve:

- Coluna de água oscilante (*Oscillating Water Column – OWC*);
- Corpos oscilantes (*Oscillating Bodies*);
- Dispositivos de galgamento (*Overtopping Devices*).

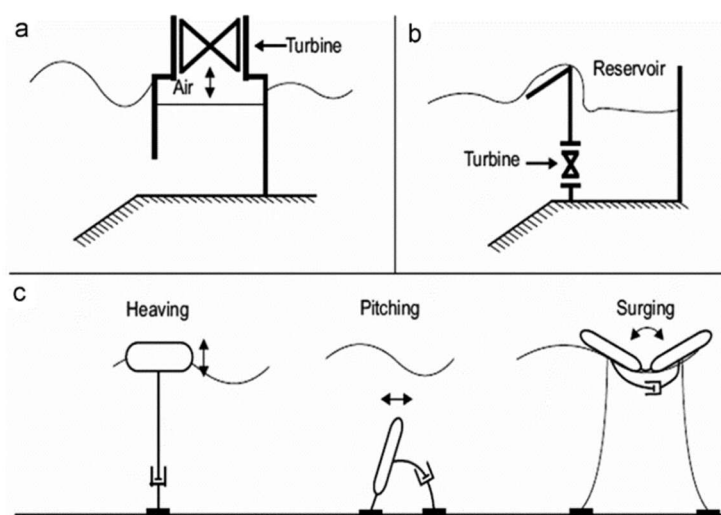


Fig. 42 – Principais princípios de funcionamento de dispositivos de conversão de energia das ondas: a) Coluna de Água Oscilante, b) Dispositivo de Galgamento, c) Corpos Oscilantes (Ilyas *et al.*, 2014).

3.2.3.1. Coluna de Água Oscilante (*Oscillating Water Column – OWC*)

Existem duas abordagens distintas de concepção de dispositivos OWC. A primeira abordagem de concepção, consiste numa abordagem com o objectivo de conversão de energia das ondas para fornecimento à rede eléctrica e, por isso, os dispositivos que seguem esta abordagem, são normalmente estruturas costeiras de betão ocas de grandes dimensões, parcialmente submersas que possuem uma “câmara de ar” com uma abertura para o mar abaixo da superfície livre da água. Estes dispositivos não são passíveis de fornecer energia a equipamentos *offshore*. O processo de conversão da energia das ondas em energia eléctrica segue duas fases: no interior do dispositivo, o ar torna-se mais, ou menos comprimido, de acordo com o nível da água. Esta variação de pressão faz mover uma turbina de ar instalada no interior da câmara, produzindo energia eléctrica. A turbina *Wells* é a turbina frequentemente utilizada nestes sistemas pois possui a propriedade de manter sempre o sentido de rotação, independentemente do sentido de escoamento do fluxo do ar (turbina reversível). Estes dispositivos têm a vantagem de serem simples e robustos, por outro lado as grandes quantidades de betão necessárias para a estrutura tornam o custo elevado (Cruz *et al.*, 2004).

A segunda abordagem de concepção de dispositivos OWC, é uma abordagem de menor dimensão, sendo que um dos objectivos desta abordagem é o fornecimento de energia a equipamentos e instalações *offshore*. Estes OWC consistem em dispositivos flutuantes amarrados, parcialmente submersos, com uma câmara pneumática interior, aberta quer no topo quer na base. A coluna de água que existe dentro da câmara comporta-se como um pistão, excitada pela dinâmica da interacção ondulação-dispositivo e produz um fluxo de ar bidireccional através da abertura superior, que equipada com uma turbina de ar e um gerador eléctrico produz energia.

Dispositivos OWC flutuantes como o dispositivo *spar-buoy* OWC, ou o dispositivo CD-OWC, ambos dispositivos axissimétricos que consistem num tubo vertical submerso (relativamente longo) aberto em ambas as extremidades e fixado a um flutuador amarrado ao fundo oceânico (Falcão *et al.*, 2014; Henriques *et al.*, 2016), e o dispositivo FLOWC, que consiste num perfil tubular não axissimétrico, com uma deflexão abaixo do nível da superfície livre da água, que para flutuação contém uma câmara de ar ao longo de quase todo o seu corpo e uma quilha com lastro implementada de modo a conferir estabilidade (Varanda, 2015), são exemplos de dispositivos que seguem esta segunda abordagem. Estes

dispositivos de conversão de energia das ondas, apesar de poderem também fornecer energia a equipamentos *offshore*, tem a grande desvantagem, em relação ao estudado na presente dissertação, de terem maior dimensão e, por isso, não ser exequível a sua instalação no interior de equipamentos *offshore* (e.g. bóias), abrigados do ambiente marítimo, e terem um fabrico mais difícil, demorado e dispendioso. Para fornecerem energia a equipamentos *offshore* de monitorização, assinalamento ou vigilância, estes dispositivos terão de ser instalados, de forma independente, na sua proximidade, sendo que necessitam de monitorização e manutenção contínua, ao contrário dos TENGs.

3.2.3.2. Corpos Oscilantes (*Oscillating Bodies*)

Nos dispositivos do tipo “corpos oscilantes” a passagem da onda pelo dispositivo provoca oscilações no mesmo, sendo que é através desse movimento que a energia da onda é convertida em electricidade. Estes dispositivos podem ser subdivididos em dispositivos de absorção pontual (*Point Absorbers*), dispositivos progressivos (*Surge Devices*), dispositivos submersos (*Submerge Devices*) ou corpos activados pelas ondas (*Wave Activated Bodies* – WAB).

Nos corpos oscilantes de absorção pontual o flutuador move-se verticalmente, ou em torno dum eixo, em relação a uma estrutura fixa no fundo do mar.

Nos corpos oscilantes do tipo progressivo (*surge devices*), os seus componentes possuem movimento em relação a própria estrutura devido à incidência das ondas, gerando assim energia eléctrica. São geralmente compostos por um deflector articulado, posicionado perpendicularmente à direcção da onda (terminador), que se move para trás e para a frente explorando a velocidade horizontal das partículas de água numa onda (Drew *et al.*, 2016).

Os corpos oscilantes submersos (*submerged devices*) são dispositivos que usam a diferença de pressão acima do dispositivo entre cristas e cavas de onda aquando da passagem da onda. São compostos por duas partes principais: uma câmara de ar cilíndrica fixa no leito marinho e uma parte superior cilíndrica móvel. Quando uma crista passa pelo dispositivo, a pressão da água acima do dispositivo comprime o ar dentro o cilindro, movendo o cilindro superior para baixo. Quando uma cava passa, a pressão da água no aparelho reduz e o cilindro superior sobe. Uma vantagem deste dispositivo é que, uma vez que é totalmente submerso, não é exposto às forças destrutivas das ondas experimentadas por outros corpos oscilantes flutuantes (Baker *et al.*, 2001) e reduz o impacto visual do dispositivo, no entanto a sua manutenção é potencialmente mais difícil de realizar. Estes dispositivos são tipicamente localizados *near-shore* (Drew *et al.*, 2016), não podendo fornecer energia a equipamentos *offshore* devido às grandes profundidades em lugares remotos do oceano.

A categoria de corpos activados por ondas (WAB) engloba um campo muito grande de conceitos. Os WAB são constituídos por elementos flutuantes, conectados uns aos outros por articulações, dispostos no sentido de propagação das ondas. O seu modo de funcionamento está associado à passagem da onda ao longo de todo o seu comprimento, com esta passagem, os diferentes elementos flutuantes sofrem deslocamentos relativos entre si, conforme a parte do dispositivo que está em contacto com a crista ou com a cava da onda. São estes deslocamentos que fazem actuar o sistema de geradores de energia, que são instalados nessas articulações. Devido à sua dimensão longitudinal ser da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda e perpendicular à frente de onda, estes dispositivos são de grandes dimensões, não sendo prática a sua utilização para fornecer energia a equipamentos *offshore*.

3.2.3.3. Dispositivos de Galgamento (*Overtopping Devices*)

Os dispositivos de galgamento direccionam as ondas incidentes para uma rampa e posteriormente para um reservatório elevado, posicionado acima do nível médio da água do mar, que armazena temporariamente a água que galgou a rampa. Aproveitando a energia potencial dessa água armazenada, a mesma é devolvida ao oceano após passar por turbinas (semelhantes às utilizadas em hidroelétricas de baixa queda), onde ocorre a conversão em energia eléctrica (Cruz *et al.*, 2004). Não é exequível colocar este tipo de sistemas, devido à sua dimensão, a fornecer energia a equipamentos *offshore*.

3.2.4. MÉTODOS DE EXTRACÇÃO DE ENERGIA

Os diferentes sistemas de extracção de potência são referidos na literatura como *Power Take-Off* – PTO. Esta classificação divide os dispositivos tendo por base o método que é utilizado para converter o movimento dos diferentes sistemas, causado pela agitação marítima, em energia eléctrica. Os principais desafios associados ao desenvolvimento desses sistemas estão relacionados com: a transferência de um movimento linear ou rotativo a um gerador, considerando a aleatoriedade da energia das ondas, suportar a potência que a onda transporta, que, durante as tempestades chega a ser cerca de 1 MW/m (Cruz *et al.*, 2004). A energia das ondas, como todas as formas de energia renovável, é intermitente. Assim, os sistemas de armazenamento de energia são vitais num sistema de energia das ondas (PTO) para atenuar as flutuações e ajudar na integração da rede. Os acumuladores podem funcionar como armazenamento de energia a curto prazo como parte do sistema hidráulico. Ao armazenar energia, os acumuladores ajudariam o sistema a lidar com as mudanças na tensão, reduzindo o custo de capital e as perdas de energia de todos os elementos subsequentes do sistema (Drew *et al.*, 2016; Falcão, 2010). A Fig. 43 apresenta o esquema de funcionamento de três tipos fundamentais de PTO: turbinas, sistemas hidráulicos e geradores lineares.

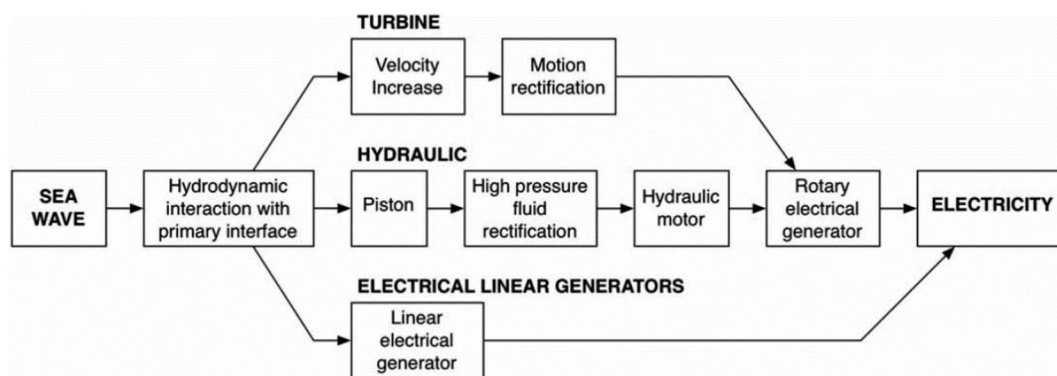


Fig. 43 – Mecanismos alternativos de PTO (Drew *et al.*, 2016)

3.2.4.1. Turbinas a ar

As turbinas de ar são utilizadas nos sistemas de coluna de água oscilante, sendo as mais comuns as turbinas *Wells*, as de Impulso e as *Denniss-Auld*. Estas turbinas convertem a energia pneumática obtida a partir do escoamento de ar em energia mecânica de rotação. A utilização de ar como o fluido de trabalho tem a vantagem de transformar as velocidades lentas das ondas em caudais de ar com velocidades relativamente elevadas (Drew *et al.*, 2016). A turbina de ar *Wells*, Fig. 44, de uma OWC está sujeita a condições de funcionamento mais exigentes do que as turbinas de qualquer outra aplicação, incluindo as turbinas eólicas. De facto, devido à variabilidade do recurso, a eficiência média temporal

de uma turbina de ar num OWC é substancialmente inferior à de uma turbina tradicional (de água, vapor, gás, vento) que funciona em condições quase estáveis. Apresenta assim baixos rendimentos, na ordem dos 60-65% (Drew *et al.*, 2016) e são dispendiosas. Por outro lado, devido a serem turbinas auto-rectificadoras, o seu sentido de rotação não depende da direcção do escoamento do ar, permite o seu funcionamento numa gama de caudais mais elevada (Falcão, 2010).

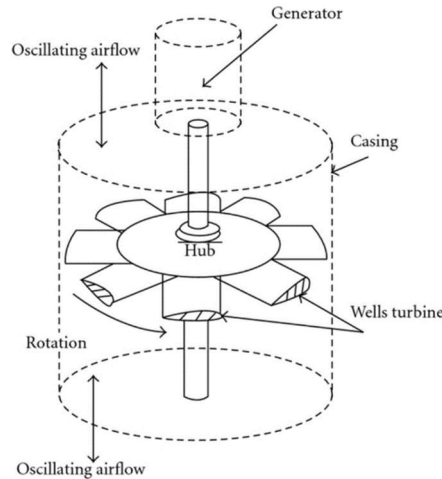


Fig. 44 – Esquema de uma turbina *Wells* (Takao *et al.*, 2012).

3.2.4.2. Turbinas Hidráulicas

Existem dois conceitos distintos de conversão de energia das ondas que utilizam turbinas hidráulicas: os dispositivos que funcionam por galgamento e os conversores de corpo oscilante associados a sistemas de bombagem de água que convertem a energia potencial ou cinética da água do mar em energia mecânica, que posteriormente é convertida em energia eléctrica através de um gerador. Nos dispositivos de galgamento as turbinas utilizadas, tal como nos aproveitamentos hidroeléctricos de baixa queda, são na maioria dos casos turbinas *Kaplan*, devido à baixa queda (normalmente 3 a 4 m de altura) existente entre o nível médio da água no reservatório do dispositivo e a turbina. As turbinas *Kaplan* são as indicadas para este tipo de aplicação pois o ângulo de passo pode ser ajustado de maneira a adaptar-se ao caudal, aumentando a eficiência e contribuindo para uma utilização em gamas de caudais mais alargados. (Falcão, 2010). Ambos os conceitos distintos de dispositivos conversores da energia de ondas que utilizam este PTO não são passíveis a ser utilizados como método de fornecimento de energia a equipamentos *offshore* devido, principalmente, às grandes diferenças de dimensão entre uns e outros.

3.2.4.3. Sistema Hidráulico

Os sistemas hidráulicos são normalmente sistemas de óleo de alta pressão (400 bar) (Drew *et al.*, 2016) particularmente adequados para converter pequenos movimentos oscilantes (de translação ou rotação). O circuito hidráulico geralmente inclui um sistema acumulador de gás capaz de armazenar energia durante alguns períodos de onda, o que permite suavizar a potência absorvida pelas ondas geralmente muito irregular. O movimento linear induzido pela onda actua sobre o pistão movendo-o verticalmente, pressurizando o fluido hidráulico, passando de seguida por uma bomba que alimenta o motor hidráulico, que cria o movimento de rotação que acciona um gerador eléctrico convencional. A contenção de fluido hidráulico é de grande importância, uma vez que a sua fuga causaria graves danos ambientais, sendo necessário investigar o desenvolvimento de sistemas hidráulicos baseados na utilização de água ou outro

fluido ambientalmente aceitável. Este PTO tem como grande desvantagem a sua complexidade, a baixa eficiência quando comparado com os geradores lineares, os MHD e os TENGs. Esta reduzida eficiência deve-se ao facto de a produção de energia eléctrica ser indirecta e as perdas ocorridas durante a bombagem e nas diversas engrenagens e partes móveis do motor. É também difícil aceder ao sistema, nos dispositivos em alto mar. Por outro lado, destaca-se a resistência e rentabilidade do sistema e o facto de ser menos dispendioso. (Drew *et al.*, 2016; Falcão, 2010).

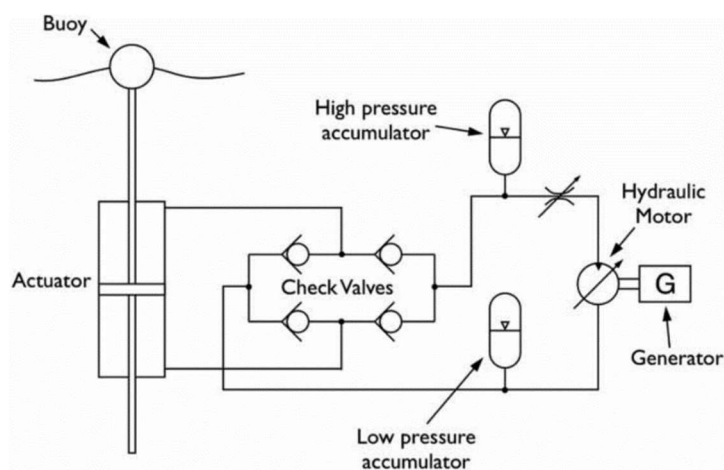
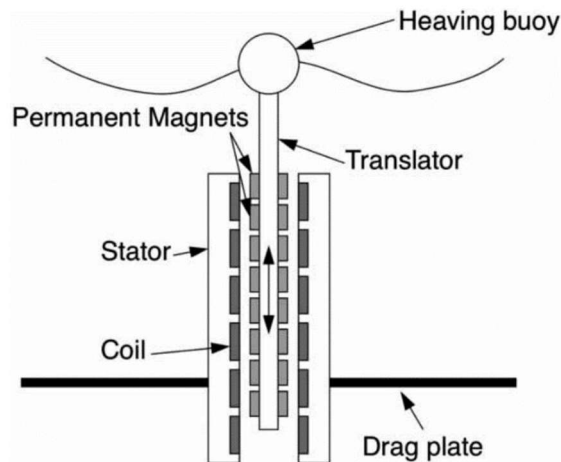


Fig. 45 – Sistema hidráulico típico (Drew *et al.*, 2016).

3.2.4.4. Geradores Lineares

Este tipo de gerador, Fig. 46, utiliza um sistema de translação para a produção de energia eléctrica, em vez de um rotor. Assim, o dispositivo move-se na vertical em vez de rodar. Os ímanes são montados com polaridade alternada directamente acoplados a um corpo oscilante, com o estator contendo bobinas montadas numa estrutura relativamente estacionária (ligada a uma placa de arrasto de grande inércia ou fixada ao fundo do mar). À medida que a bóia à superfície oscila com a passagem das ondas, será induzida uma corrente eléctrica no estator. Assim o gerador linear oferece a possibilidade de converter directamente a energia mecânica em energia eléctrica. A alternativa de PTO directa é muito mais simples do que os sistemas hidráulicos, sem passos intermédios entre a interface primária e a máquina eléctrica. Não é necessário um sistema mecânico anterior à conversão de modo a converter o movimento linear das ondas em energia eléctrica, e por isso, possui menos partes móveis e é mais eficiente que os sistemas hidráulicos, por outro lado, o movimento alternativo do gerador corresponde ao movimento do dispositivo real a velocidades duas ordens de grandeza inferiores às velocidades típicas dos geradores rotativos de alta velocidade. Para velocidades tão baixas, as forças são muito grandes, o que requer uma máquina fisicamente grande tornando o sistema bastante dispendioso e pouco prático para adoptar como método de fornecimento de energia a equipamentos *offshore* (Drew *et al.*, 2016; Falcão, 2010).

Fig. 46 – Gerador linear típico (Drew *et al.*, 2016).

3.2.4.5. Geradores Magnetohidrodinâmicos (MHD)

O gerador magnetohidrodinâmico, Fig. 47, tal como o gerador linear, é um conversor directo de energia mecânica em energia eléctrica. Baseia-se no facto de a água do mar ser condutora de electricidade sob a acção de um forte campo magnético. O movimento oscilante do corpo é transferido por um veio que força a passagem do fluido num sistema de tubos. Um grupo de electroímãs gera um campo magnético perpendicular ao escoamento da água. Este estimula a corrente eléctrica na água do mar que, por sua vez, é absorvida por eléctrodos dispostos no tubo. Este método é altamente apelativo pois não necessita de partes móveis, possuindo uma eficiência elevada, mas é um bastante dispendioso (André, 2010).

Por outro lado, o gerador MHD apresenta baixa eficiência para oscilações induzidas por ondas de água de baixa frequência, e um elevado custo de substituição e manutenção de equipamentos (Liu *et al.*, 2019).

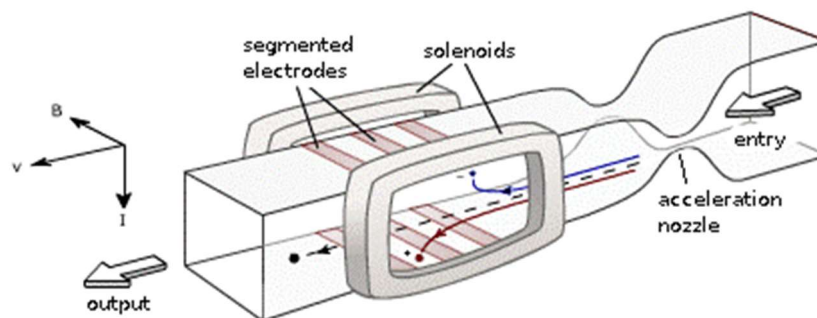


Fig. 47 – Gerador magnetohidrodinâmico típico.

3.3. NANOGERADORES TRIBOELÉCTRICOS (TENGs)

A tecnologia inovadora em estudo – nanogeradores triboelétricos (TENGs) – pertence a uma classe de geradores que utiliza uma técnica de conversão de energia onde a energia mecânica (fricção induzida pelo movimento) é transformada em energia eléctrica. A operação dos TENGs é baseada na electrificação de contacto e indução electrostática (Barkas *et al.*, 2019). Esta tecnologia promissora

apresenta uma elevada potência de saída, eficiência de conversão e um baixo custo de fabricação e materiais.

Um TENG possui três modos básicos de operação baseados na sua direcção de movimento:

- Modo por contacto;
- Modo deslizante;
- Modo por esfera rolante.

O efeito triboelétrico inicia-se a partir do contacto entre dois materiais que diferem em polaridade triboelétrica, o que resulta na transferência da carga superficial. A utilização de TENGs é uma solução promissora para fornecer energia a sensores, lanternas, entre outros, de equipamentos *offshore*, devido à característica autónoma de fornecimento de energia e à minimização do uso de baterias, diminuindo as emissões globais de gases de efeito estufa (Barkas *et al.*, 2019).

3.3.1. MODO DE OPERAÇÃO POR CONTACTO

Os TENGs baseados no modo de operação por contacto são compostos por duas camadas de materiais de escala triboelectrica oposta. Quando as duas superfícies entram em contato, através de uma força externa, uma superfície perde a carga enquanto a outra a ganha. Quando os dois materiais se separam, as superfícies de contato têm potenciais elétricos diferentes pelo desequilíbrio das cargas elétricas, havendo troca de carga entre os dois materiais, que leva a que um fluxo de corrente elétrica se forme (Barkas *et al.*, 2019). A Fig. 48 ilustra este modo de funcionamento.

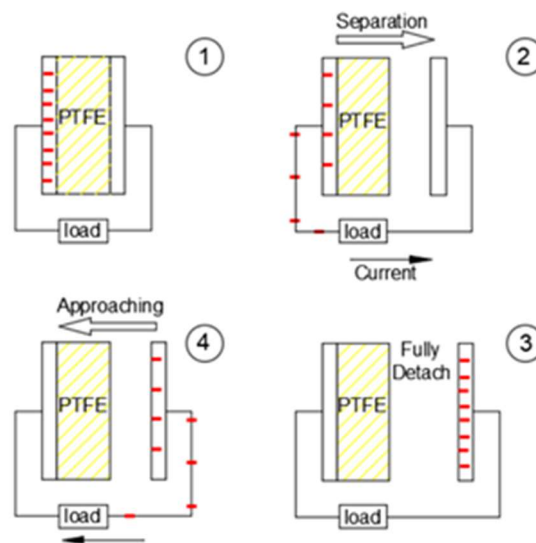


Fig. 48 – Princípio de funcionamento do TENG por modo por contacto (Barkas *et al.*, 2019).

3.3.2. MODO DE OPERAÇÃO DESLIZANTE

A disposição dielétrica num TENG que funciona através do modo deslizante é idêntica à do modo por contacto, com a diferença de que os dois materiais deslizarão um sobre o outro, gerando assim cargas sobre a superfície. Quando as duas camadas diferentes são conectadas através de uma carga, uma saída AC será gerada devido ao deslizamento e fecho periódico das duas camadas triboelétricas. A Fig. 49 ilustra a operação.

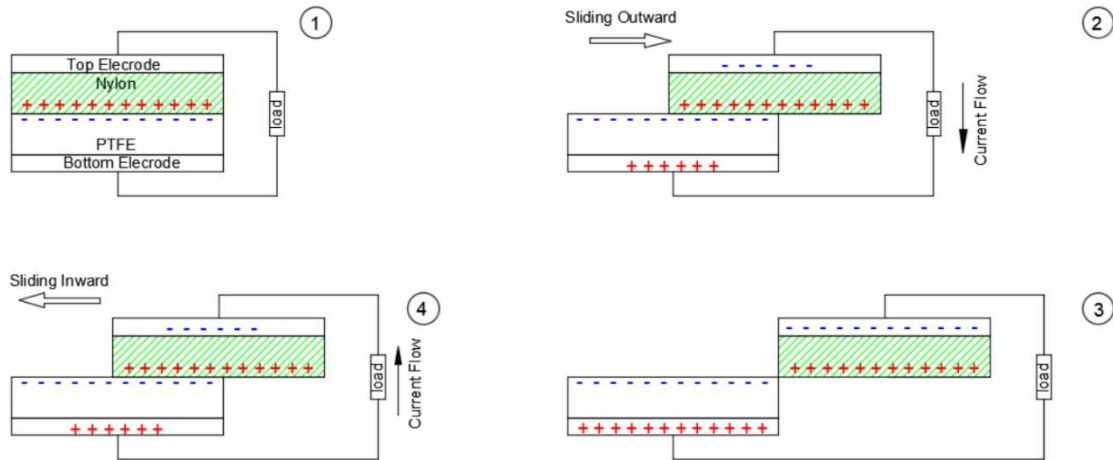


Fig. 49 – Princípio de funcionamento do TENG por modo deslizante (Barkas *et al.*, 2019).

Uma nota importante é que, nos sistemas TENG tradicionais, cada camada triboelétrica está ligada a um eléctrodo e a um fio de chumbo, tornando este dispositivo pouco versátil e tendo, por conseguinte, aplicações limitadas. Um TENG tradicional não é tão eficiente na recolha de energia de um objecto móvel arbitrário, uma vez que o objecto tem de ser ligado a todo o sistema por uma interconexão. Uma solução para tal problema consiste na utilização de uma estrutura TENG independente. O mecanismo é composto de 3 partes básicas, os dois eléctrodos estacionários e uma camada independente que se move devido à energia mecânica externa (Barkas *et al.*, 2019). A Fig. 50 ilustra o mecanismo de trabalho para um TENG de deslizamento independente.

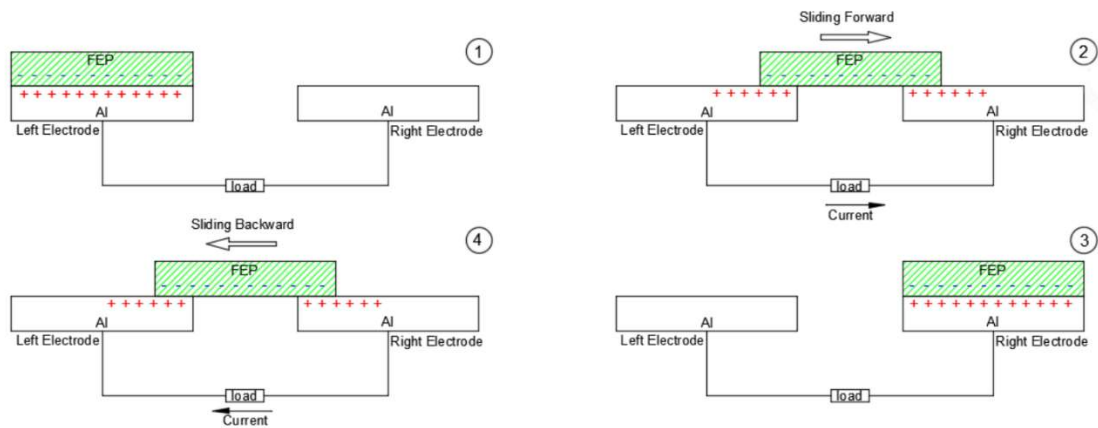


Fig. 50 – Princípio de funcionamento do TENG por modo deslizante independente (Barkas *et al.*, 2019).

3.3.3. MODO DE OPERAÇÃO POR ESFERA ROLANTE

Os dispositivos TENG desenvolvidos baseando-se no modo por esfera rolante, são ideais para converter a energia das ondas devido à elevada densidade de potência, eficiência, peso reduzido (em geral) e baixo custo de fabricação. A Fig. 51 mostra o mecanismo de trabalho de um TENG pelo acoplamento do efeito de triboelectrificação e indução electrostática. O rolamento da esfera, normalmente inseridas numa pequena estrutura totalmente fechada, é o que altera a capacitância do sistema, resultando num fluxo de electrões entre os dois eléctrodos, a fim de equilibrar a queda do potencial eléctrico.

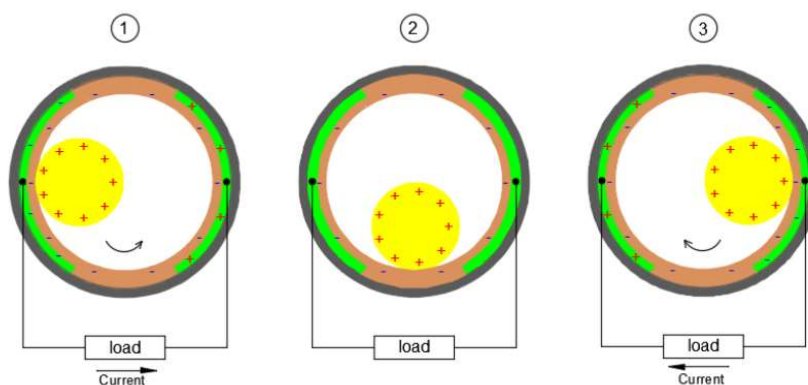


Fig. 51 – Princípio de funcionamento do TENG com uma estrutura de esferas rolantes (Barkas *et al.*, 2019).

3.4. TENGs ENQUANTO SISTEMAS CONVERSORES DE ENERGIA DAS ONDAS

Os TENGs desenvolvidos para a conversão da energia das ondas são uma tecnologia emergente e rentável devido ao seu desempenho incomparável em baixas frequências e movimentos aleatórios (Cheng *et al.*, 2019).

Como foi referido neste capítulo, o uso de geradores comuns alimentados pela energia das ondas, resulta em sistemas de grandes dimensões e caros que têm altos custos de manutenção e operação. Apenas os geradores MHD têm algumas vantagens, em relação aos TENG, como a sua elevada eficiência de conversão e durabilidade superior. No entanto, não são adequados para a captação de energia mecânica de baixa frequência. A frequência típica das ondas é inferior a 2 Hz (Hao *et al.*, 2019).

Recentemente, o TENG baseado no modo de operação por esferas rolante, usando os princípios da triboelectrificação e indução electrostática, tem-se afirmado como um método viável e eficaz para converter energia mecânica de baixa frequência.

A densidade de potência de saída do TENG é proporcional ao quadrado da sua densidade de carga superficial triboelétrica. Portanto, a densidade da carga triboelétrica é a referência para avaliar o desempenho do TENG, que é amplamente determinada pela eficiência do contacto entre as duas superfícies triboelétricas (Cheng *et al.*, 2019).

Esta nova tecnologia tem a vantagem de ser de fácil fabricação e baixo custo, além disso, a característica mais marcante da agitação marítima é a sua aleatoriedade espaço-temporal e, convertendo energia nas múltiplas direcções, o TENG pode fazer pleno uso da energia das ondas, podendo em teoria, alimentar de forma persistente dispositivos electrónicos e carregar uma bateria ou condensador. Ao ligar várias unidades TENG em paralelo, há um grande potencial de conversão de energia das ondas (Hao *et al.*, 2019).

O sistema a desenvolver nesta dissertação de mestrado, é um TENG baseado no modo por contacto, mas utiliza esferas rolantes para promover o contacto entre os materiais triboelétricos. Está estruturado numa pequena “caixa” que contém no seu interior uma série de esferas e o nano-material. Accionada pelas ondas, as esferas movem-se sobre a camada superior, o seu peso promove o contacto entre as duas camadas triboelétricas gerando energia triboelétrica. Este sistema pode converter não só a energia de ondas aleatórias de todas as direcções, mas também de qualquer outra fonte externa (e. g. o vento, correntes) que provoque movimentos no equipamento *offshore* que contém o TENG (bóias oceânicas, flutuadores, etc.).

Tendo em conta as razões ecológicas, o seu baixo custo, e a sua fácil implementação em equipamentos *offshore*, o contínuo desenvolvimento dos TENG é de grande importância.

3.5. PRINCIPAIS DESAFIOS

Como descrito, a energia das ondas é muito promissora para o fornecimento de energia a equipamentos *offshore* localizados em locais remotos. No entanto, existem alguns desafios associados que têm de ser superados para que a implementação dos sistemas TENG seja bem-sucedida. A energia produzida a partir das ondas oceânicas é intermitente e de baixa frequência (cerca de 0,1 Hz) embora esteja associada a um *output* de força elevado (Ilyas *et al.*, 2014). O TENG deve ser capaz de ser accionado e produzir um *output* aceitável para o fornecimento de uma dada energia previamente determinada, dependendo do tipo de equipamento em que está integrado.

Converter energia das ondas irregulares é outro desafio. Além disso, o sistema TENG deve ser capaz de operar em condições normais, mas também deve resistir a condições extremas e ao ambiente altamente corrosivo que é a água do mar. Isto proporciona um sério desafio pois é necessário projectar um sistema que deve ser robusto, mas também eficiente. Por último, mas não menos importante, a manutenção dos TENG instalados apresenta um desafio em si mesmo. A manutenção não deve ser dispendiosa, demorada e arriscada e as inspecções periódicas devem ser minimizadas.

A existência de amarrações condiciona o comportamento do corpo flutuante quando este é solicitado. Como o TENG depende do movimento do corpo flutuante em que está inserido, para produzir energia, a amarração afecta profundamente o seu desempenho. É, portanto, necessário, analisar cuidadosamente o amortecimento, a frequência de vibração natural e demais influências do sistema de amarrações na conversão da energia das ondas através de TENGs.

É importante também referir a falta de literatura sobre a resposta do TENGs a ondulação real. A maioria dos trabalhos desenvolvidos focam-se apenas no estudo de movimentos controlados aplicados no TENG fora de água e o *output* de energia gerado por esses movimentos.

4

**DINÂMICA DE CORPOS
FLUTUANTES****4.1. INTRODUÇÃO**

Para se modelar fisicamente uma bóia é necessário compreender os factores que afectam a dinâmica do sistema. Assim, neste capítulo, serão apresentados os principais conceitos relativos ao comportamento de um corpo flutuante sob a acção da agitação marítima, bem como as equações físicas que regem o seu movimento. A compreensão das forças hidrostáticas e hidrodinâmicas que governam o equilíbrio do corpo flutuante é importante para que, no fim, se consiga porventura potenciar esses movimentos para que a conversão em energia eléctrica seja o mais eficaz possível.

A dinâmica de corpos rígidos flutuantes é regida pelas acções combinadas de diferentes forças e momentos externos, bem como pela inércia dos próprios corpos. Essas forças estão distribuídas por toda a área submersa, do corpo, de forma contínua pelas partículas de fluido.

4.2. GRAUS DE LIBERDADE

Considere-se um corpo flutuante ou totalmente submerso, livre e sem qualquer velocidade inicial, sob a acção de ondas regulares sinusoidais descritas pela teoria linear. O movimento deste corpo pode ser decomposto em seis componentes elementares associadas a três eixos ortogonais: três movimentos de translação e três de rotação. Essas formas fundamentais de movimento estão esquematizadas na Fig. 52, num sistema de eixos ortogonais OXYZ, centrado no centro de gravidade do corpo (Todalshaug, 2017). Estes graus de liberdade tem as seguintes designações:

- Avanço (*Surge*) – Movimento longitudinal de translação horizontal, segundo o eixo do xx ;
- Deriva (*Sway*) – Movimento lateral de translação horizontal, segundo o eixo dos yy ;
- Arfagem (*Heave*) – Movimento de translação vertical, segundo o eixo dos zz ;
- Balanço (*Roll*) – Movimento de rotação em torno do eixo xx ;
- Cabeceio (*Pitch*) – Movimento de rotação em torno do eixo yy ;
- Guinada (*Yaw*) – Movimento de rotação em torno do eixo zz .

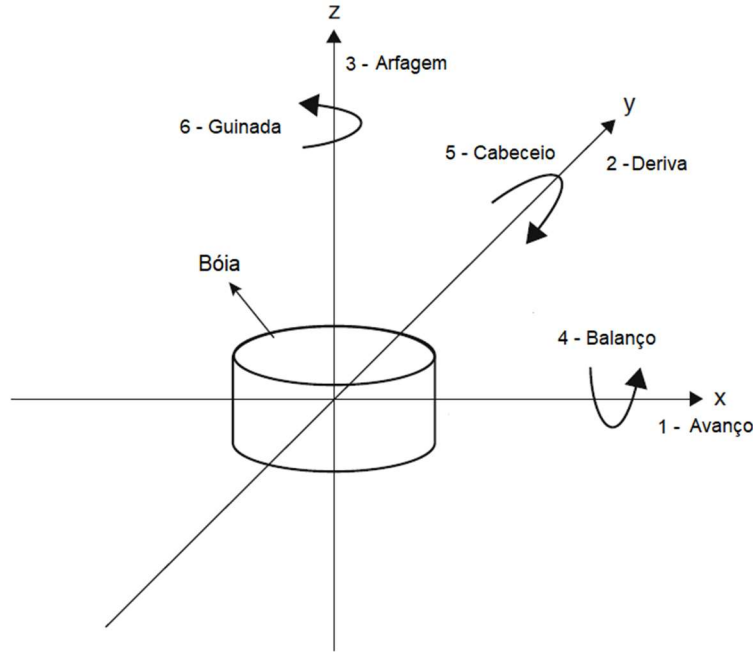


Fig. 52 – Graus de liberdade de um corpo sujeito à agitação marítima, adaptado de (Todalshaug, 2017).

Os corpos flutuantes são compostos por uma superfície submersa de área S , dividida em elementos infinitesimais de dimensão dS . A posição $\vec{s}$ de cada elemento é caracterizada pelos vectores velocidade e velocidade angular em relação ao centro de gravidade do corpo, respectivamente $\vec{U}$ e $\vec{\Omega}$, Fig. 53.

$$(u_1, u_2, u_3) = (U_x, U_y, U_z) = \vec{U} \quad (1)$$

$$(u_4, u_5, u_6) = (\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z) = \vec{\Omega} \quad (2)$$

Considerando um elemento de dimensão dS na posição do vector $\vec{s}$, com origem no centro de gravidade do corpo, a velocidade desse elemento é dada por:

$$\vec{u} = \vec{U} + \vec{\Omega} \times \vec{s} \quad (3)$$

Assim, se o elemento não tiver rotação $\vec{u} = \vec{U}$ e, se não tiver translação, $\vec{u} = \vec{\Omega} \times \vec{s}$.

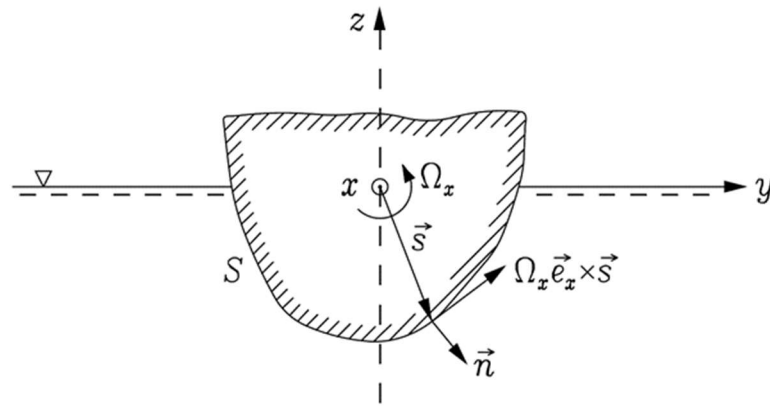


Fig. 53 – Corpo flutuante (Falnes, 2002).

4.3. HIDROSTÁTICA

4.3.1. PRESSÃO HIDROSTÁTICA

Em qualquer fluido em repouso, a pressão hidrostática num dado ponto, resulta do peso da coluna de fluido acima do ponto em que essa pressão é medida. Na superfície livre, a pressão (efectiva) é normalmente zero em relação à pressão atmosférica (Journée *et al.*, 2001). Temos assim a equação:

$$p = \rho g h \quad (4)$$

em que: p representa a pressão (força/área); ρ a massa volúmica do fluido; g a aceleração da gravidade; h a distância medida na vertical entre a superfície livre e o ponto onde a pressão é medida.

A massa volúmica da água do mar é da ordem de 1025 kg/m^3 e depende da temperatura e da salinidade.

4.3.2. PRINCÍPIO DE ARQUIMEDES

Um corpo, total ou parcialmente imerso num fluido sofre, da parte deste, pressões cuja resultante é uma força de impulsão (*buoyancy force*), dirigida de baixo para cima, com uma grandeza igual ao peso do fluido deslocado no corpo – Princípio de *Arquimedes*.

Essa força passa pelo centro de impulsão representa o centro de gravidade do volume de fluido deslocado pelo corpo. Na análise de estabilidade de corpos flutuantes estão, assim, duas forças opostas em jogo: o peso do corpo e a força de impulsão exercida pela água. Para que um corpo flutuante esteja em equilíbrio é necessário que a impulsão seja igual ao seu peso, e que os pontos de aplicação dessas forças estejam na mesma vertical. Na Fig. 54 está representada a definição dos centros de gravidade e de impulsão e respectivas forças que actuam num corpo flutuante. A impulsão é dada por,

$$I_V = \rho g \nabla \quad (5)$$

Em que: I_V representa a impulsão, ρ a massa volúmica do fluido; g a aceleração da gravidade e V o volume da parte submersa do corpo flutuante (volume deslocado pelo corpo flutuante).

A impulsão é assim considerada uma força de massa distribuída, análoga à força da gravidade sobre a massa de um objecto. No entanto, pode-se olhar para a impulsão de uma outra forma, na medida em que é também igual (ou equivalente) ao integral da pressão hidrostática exercida sobre a superfície submersa do corpo (Journée *et al.*, 2001).

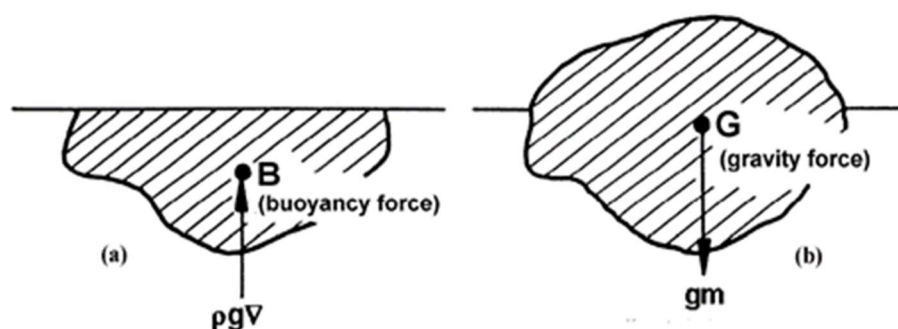


Fig. 54 – Definição dos centros de gravidade e de impulsão e respectivas forças (Journée *et al.*, 2001).

O centro do volume do fluido deslocado por um corpo flutuante é, assim, conhecido como o centro de impulsão (*center of buoyancy*, B). O centro de gravidade (*center of gravity*, G) de um corpo é o ponto através do qual, por considerações estáticas, se pode considerar que todo o peso do corpo flutuante actua. O momento de massa ou peso em torno do centro de gravidade é zero (Journée *et al.*, 2001).

4.3.3. ESTABILIDADE ESTATICA DE CORPOS FLUTUANTES

Para a compreensão do comportamento de um corpo flutuante é fundamental ter algumas noções básicas sobre a flutuação e a estabilidade estática de corpos flutuantes, isto é, sobre a tendência de o corpo flutuante permanecer numa posição de equilíbrio e de voltar a ela quando, depois de deslocado dessa posição, a acção que causou esse movimento deixar de actuar.

4.3.3.1. Equilíbrio Estático

Diz-se que um corpo flutuante está num estado de equilíbrio estático quando a resultante de todas as forças que actuam sobre o corpo é zero e o momento resultante dessas forças também é zero. Três estados diferentes de equilíbrio, ou tipos de estabilidade, podem ser distinguidos para um corpo que está sujeito a uma pequena perturbação, a partir de uma posição de equilíbrio, Fig. 55:

- i. Se, após a perturbação, o corpo tende a voltar à posição de equilíbrio diz-se que se encontra num estado de equilíbrio estável ou que possui estabilidade positiva.
- ii. Se, após a perturbação, o corpo permanecer na sua nova posição, então diz-se estar em estado de equilíbrio neutro ou possuir estabilidade neutra.

- iii. Se, após a perturbação, o deslocamento da posição de equilíbrio tende a aumentar o corpo encontra-se em estado de equilíbrio instável ou possui estabilidade negativa.

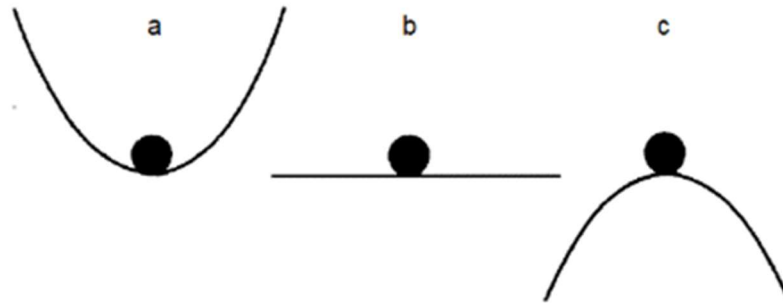


Fig. 55 – Tipos de estabilidade: a) Equilíbrio Estável; b) Equilíbrio Neutro; c) Equilíbrio Instável (Journée *et al.*, 2001).

Se um corpo estiver a flutuar livremente num fluido em repouso, as seguintes condições de equilíbrio no plano da Fig. 54 estão satisfeitas:

- Equilíbrio horizontal – a soma das forças horizontais é zero;
- Equilíbrio vertical – a soma das forças verticais é zero;
- Equilíbrio rotacional – a soma dos momentos em torno de G, ou noutro ponto, é zero.

4.3.3.2. Equilíbrio Horizontal

Tendo por base a Fig. 54, importa referir que uma translação na direção horizontal não leva a nenhuma força hidrostática resultante, de modo que, a menos que estejam envolvidas outras influências externas - tais como amarrações – o corpo está em equilíbrio neutro para este tipo de perturbação (Journée *et al.*, 2001).

4.3.3.3. Equilíbrio Vertical

Para um corpo flutuante, um movimento vertical descendente resulta num aumento da força de impulsão, que tenderá a forçar o corpo a movimentar-se para cima, ou seja, a devolver o corpo ao seu estado original de equilíbrio (Journée *et al.*, 2001).

Se uma massa adicional for colocada sobre o corpo flutuante, o seu equilíbrio original será perturbado. O corpo afundará e inclinar-se-á até que um novo estado de equilíbrio tenha sido alcançado. Se a massa for colocada sobre o corpo de tal maneira que este só afunde paralelamente ao plano de água, *i.e.*, sem inclinação, a alteração do calado pudera ser obtida por:

$$\Delta T = \frac{p}{\rho A_{WL}} \quad (6)$$

em que: ΔT representa o aumento do calado do corpo flutuante, p a massa adicional, ρ a massa volúmica do fluido, A_{WL} a área do plano de água (constante no intervalo de ΔT).

4.3.3.4. Equilíbrio Rotacional

Um momento inclinante actuando sobre um corpo flutuante resulta numa rotação do mesmo em torno de B. O corpo pode exibir um equilíbrio estável, neutro ou mesmo instável. Se esse momento inclinante externo actuar sobre o corpo como indicado na Fig. 56, partindo do equilíbrio rotacional temos que:

$$M_H = \rho g \nabla y = gm y \quad (7)$$

Partindo desta expressão, se não actuar nenhum momento externo no corpo flutuante, então $y = 0$.

Isto significa que para qualquer corpo flutuante em repouso, o centro de impulsão (B) e o centro de gravidade (G) vão estar situados na mesma linha vertical. Se isto não acontecer, o corpo inclinar-se-á (ou terá um caimento) até que os centros de gravidade e de impulsão fiquem alinhados verticalmente. Isto significa também que o alinhamento longitudinal da posição do centro de gravidade pode ser facilmente encontrado a partir da posição longitudinal do centro de impulsão (Journée *et al.*, 2001).

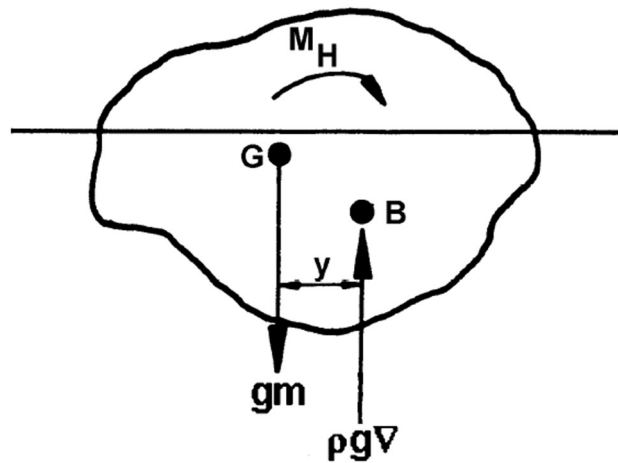


Fig. 56 – Momento inclinante (Journée *et al.*, 2001).

A aplicação do momento inclinante referido M_H (externo) leva o corpo a inclinar-se relativamente ao plano horizontal, um ângulo Φ , Fig. 57. Como resultado desta inclinação, a forma da parte submersa do corpo alterar-se-á, e o centro de impulsão passará de B para B_Φ . O equilíbrio será alcançado quando um momento endireitante M_S for igual ao momento inclinante M_H (externo) (Journée *et al.*, 2001).

$$M_H = M_S = \rho g \nabla \cdot \overline{GZ} \quad (8)$$

O braço da força endireitante $\overline{GZ}$ pode ser escrito como:

$$\overline{GZ} = \overline{GN_\phi} \cdot \sin \Phi \quad (9)$$

O momento endireitante M_S fica então:

$$M_s = \rho g \nabla \cdot \overline{GN_\phi} \cdot \sin \Phi \quad (10)$$

em que: ρ representa a massa volúmica do fluido, g a aceleração da gravidade, ∇ o volume da parte submersa do corpo flutuante, G o centro de gravidade, Φ o ângulo de inclinação e N_ϕ o metacentro.

Assim, para flutuar de forma estável, um corpo flutuante deve ter volume suficiente em relação à sua massa, e deve ser hidrostáticamente estável segundo os modos de oscilação de balanço e cabeceio (Todalshaug, 2017).

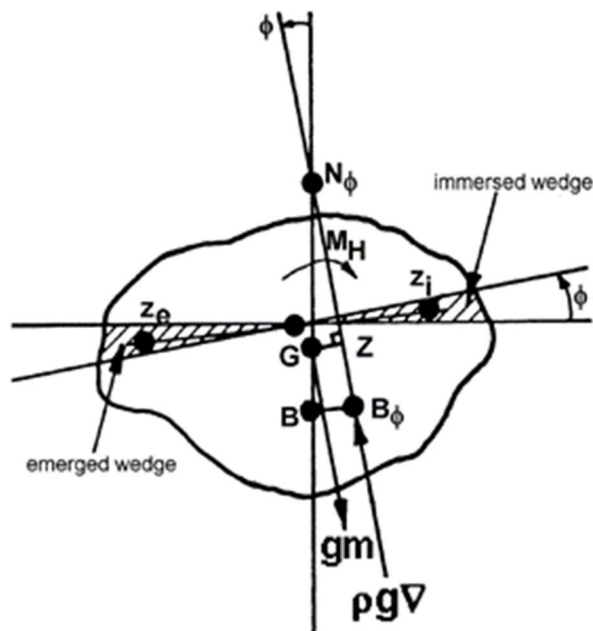


Fig. 57 – Equilíbrio rotacional para um ângulo de inclinação Φ (Journée *et al.*, 2001).

4.3.4. METACENTRO

O metacentro N_ϕ é o ponto de intersecção de duas sucessivas linhas de acção da impulsão (e.g., para o ângulo de inclinação zero e para o ângulo de inclinação Φ), Fig. 57. A posição do metacentro depende da nova posição do centro de impulsão B_ϕ . O ângulo de inclinação Φ , e a forma da parte emersa e imersa do corpo flutuante controlam a mudança do centro de impulsão de B para B_ϕ e, assim, controlam também a posição do N_ϕ (Journée *et al.*, 2001).

A distância entre o centro de gravidade e o metacentro é designada por altura metacêntrica $\overline{GN}_\phi$ e considera-se positiva quando o metacentro está acima do centro de gravidade e negativa quando está abaixo. Tal como foi descrito anteriormente, um corpo flutuante ao ser inclinado (sujeito à acção momento inclinante M_H externo), sofre uma rotação em torno de eixos horizontais que passam pelo

centro de impulsão. À medida que o corpo vai sendo inclinado, a posição do metacentro varia, Fig. 58. Enquanto o metacentro permanecer acima do centro de gravidade (*i.e.*, altura metacêntrica for positiva), o binário originado pelo peso e pela impulsão é estabilizador e força o corpo a voltar à sua posição inicial através do momento endireitante M_S . Se o centro de gravidade coincidir com o metacentro, então o corpo flutuante tem equilíbrio neutro. A partir do instante em que o metacentro fica abaixo do centro de gravidade (altura metacêntrica negativa), o binário passa a ter características instabilizadoras e o corpo tomba. O metacentro é, então, uma característica da estabilidade do corpo: quanto mais alto estiver, mais estável será o corpo flutuante (Moura Paredes, 2008).

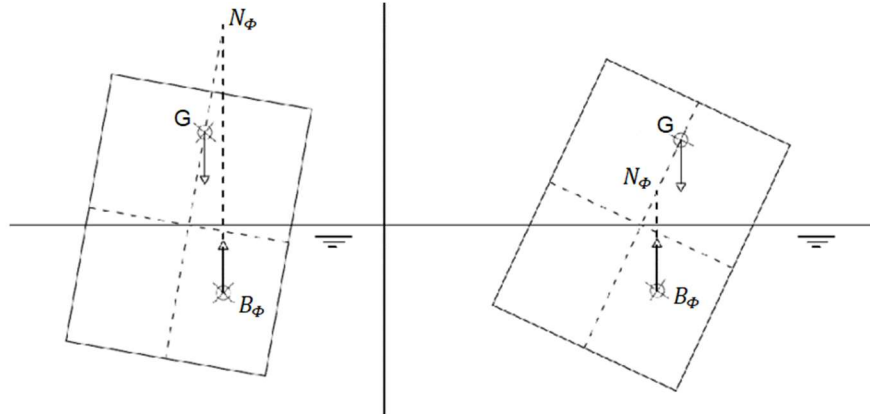


Fig. 58 – Tipos de Equilíbrio: equilíbrio estável (esquerda) e equilíbrio instável (direita), adaptado de (Moura Paredes, 2008).

A altura metacêntrica pode ser calculada/estimada analiticamente, tomando como exemplo um corpo flutuante rectangular, Fig. 59, e tendo por base algumas simplificações.

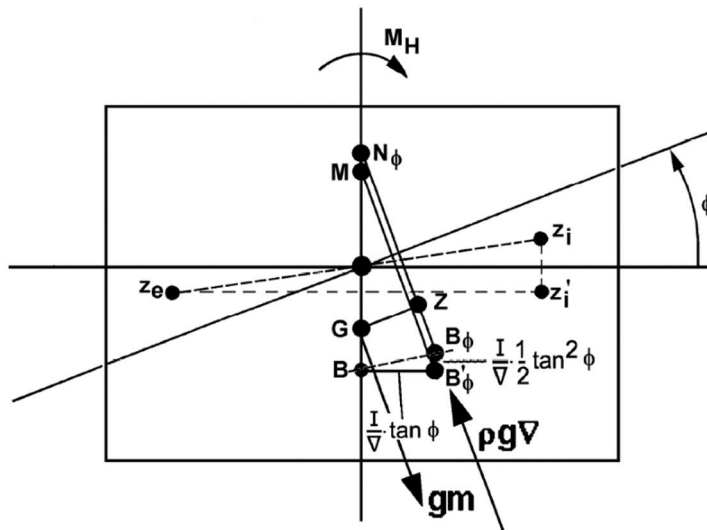


Fig. 59 – Estabilidade dum corpo flutuante rectangular (Journée *et al.*, 2001).

Assim sendo, temos:

$$\overline{BB'_\Phi} = \overline{BM} \cdot \tan \Phi \quad (11)$$

$$\overline{BM} = \frac{I_T}{\nabla} \quad (12)$$

$$\overline{B_\Phi B'_\Phi} = \overline{MN_\Phi} \quad (13)$$

$$\overline{MN_\Phi} = \frac{I_T}{\nabla} \cdot \frac{1}{2} \tan^2 \Phi \quad (14)$$

$$\overline{BN_\Phi} = \overline{BM} + \overline{MN_\Phi} \quad (15)$$

$$\overline{BN_\Phi} = \overline{BM} \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \tan^2 \Phi\right) \quad (16)$$

em que: I_T representa o momento de inércia do plano de água, ∇ o volume da parte submersa do corpo flutuante, G o centro de gravidade, Φ o ângulo de inclinação, N_Φ o metacentro, M o metacentro inicial para $\Phi=0^\circ$, B o centro de impulsão inicial e B_Φ o centro de impulsão para o ângulo de inclinação Φ (Journée *et al.*, 2001).

Para pequenos ângulos de inclinação (até cerca de 10°), o efeito do deslocamento vertical do centro de impulsão, $\overline{B_\Phi B'_\Phi} = \overline{MN_\Phi}$, pode ser ignorado. A linha de acção da força de impulsão intersecta a linha de acção da força impulsão vertical para $\Phi=0^\circ$ no metacentro inicial, M , cuja localização é definida pela equação (12). Até ângulos de inclinação de cerca de 10° , esta é uma aproximação bastante boa para a determinação do metacentro dos corpos flutuantes. Para maiores ângulos de inclinação, o efeito do deslocamento vertical do centro de impulsão deve ser tido em conta (Journée *et al.*, 2001).

4.4. HIDRODINÂMICA

4.4.1. CONDIÇÕES FRONTEIRA DO PROBLEMA

Estando o corpo flutuante inicialmente estacionário, sujeito a ondas harmónicas de pequena amplitude, o movimento deste será de pequena amplitude e directamente proporcional à amplitude da onda incidente. A profundidade da água é assumida como sendo finita, Fig. 60. A velocidade média do corpo é considerada como sendo zero em todas as direcções. Os eixos x e y coincidem com a superfície livre, não perturbada, da água e o eixo z é a profundidade, positivo para cima.

De um modo geral, o potencial de velocidades Φ do escoamento, dependente do espaço e do tempo, e pode ser decomposto em três partes (Journée *et al.*, 2001):

$$\Phi = \Phi(x, y, z; t) = \Phi_R + \Phi_w + \Phi_D \quad (17)$$

em que: Φ_R representa o potencial de radiação do movimento oscilatório do corpo em águas em repouso, Φ_w o potencial referente às ondas incidentes, e Φ_d o potencial de difracção das ondas no corpo estacionário. Estes potenciais têm de respeitar determinadas condições fronteira específicas do problema em estudo.

De seguida são descritas essas condições fronteira, sendo que para as primeiras três é usada a teoria linear. Para dedução dessas condições, de acordo com a teoria linear, é necessário que se verifique a conservação da massa em conjunto com os limites da fronteira. As seguintes condições referem-se à interacção corpo flutuante – onda.

- i. Condição de continuidade ou equação de Laplace:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = \nabla^2 \Phi = 0 \quad (18)$$

Como o movimento das partículas é irrotacional (as partículas não rodam em torno do seu eixo), nas condições específicas da Teoria Linear, escreve-se a equação da continuidade em função de Φ .

- ii. Condição relativa ao fundo do mar:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, \quad \text{para } z = -h \quad (19)$$

Pois o fundo é plano e impermeável, não havendo perda de fluido.

- iii. Condição fronteira na superfície livre:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, \quad \text{para } z = 0 \quad (20)$$

Uma partícula desta superfície num determinado instante, faz parte da mesma num instante posterior, não há mistura de fases e o fluido mantém-se na superfície livre.

- iv. Condição cinemática na superfície do corpo:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \vec{n} \cdot \nabla \Phi = u_n = \vec{U} \cdot \vec{n} + \vec{\Omega} \times \vec{s} \cdot \vec{n} = \vec{U} \cdot \vec{n} + \vec{\Omega} \cdot \vec{s} \times \vec{n} \quad \text{para } z = 0 \quad (21)$$

Como não existe passagem de fluido através do corpo, em todo o seu domínio S , temos esta condição. A velocidade de uma partícula de água num ponto da superfície do corpo é igual

à velocidade desse mesmo ponto do corpo (estaque). Sendo $\vec{n}$ o vector normal da velocidade na superfície submersa para um elemento infinitesimal dS , Fig. 53.

v. Condição de Radiação:

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \Phi = 0 \quad (22)$$

A uma distância do corpo flutuante R que tende para o infinito o potencial tende para zero.

vi. Condição de Simetria relativamente ao referencial da Fig. 52.

$$\Phi_2(-x, y) = -\Phi_2(+x, y), \quad \text{para Deriva} \quad (23)$$

$$\Phi_3(-x, y) = +\Phi_3(+x, y), \quad \text{para Arfagem} \quad (24)$$

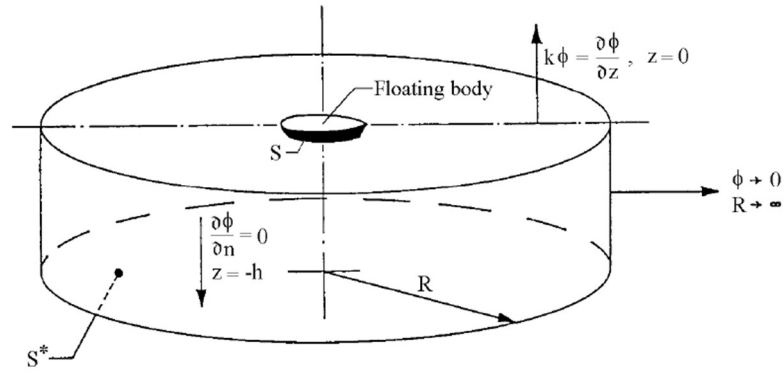
$$\Phi_4(-x, y) = -\Phi_4(+x, y), \quad \text{para Balanço} \quad (25)$$

Uma vez que as bóias e muitos outros corpos flutuantes são simétricas em relação a um eixo vertical que passa pelo seu centro, pode-se fazer uso das relações anteriores para simplificar as equações potenciais. De acordo com as normas, para os movimentos de deriva e balanço a velocidade horizontal das partículas de água (e a derivada $\partial\Phi/\partial x$) em qualquer instante de tempo, em ambos os lados do corpo, têm de ter a mesma direcção, dado que são movimentos antissimétricos. No caso do movimento de arfagem, as velocidades têm o sinal oposto: movimento simétrico. Para as três direcções referidas, a derivada $\partial\Phi/\partial y$ tem de ter a mesma direcção em qualquer instante de tempo (Journée *et al.*, 2001).

Se todas estas condições forem respeitadas, é possível definir o potencial de velocidades do escoamento Φ , através de (Falnes, 2002):

$$\Phi = \Phi(x, y, z; t) = \text{Re} \left\{ \left(\sum_{j=1}^6 \xi_j \Phi_{Rj}(x, y, z, t) + A \Phi_A(x, y, z, t) \right) e^{i\omega t} \right\} \quad (26)$$

em que: ξ_j representa a amplitude complexa do deslocamento no grau de liberdade j , Φ_{Rj} um potencial de radiação devido a um movimento unitário forçado na direcção j , A a amplitude da onda incidente e Φ_A um potencial relacionado com a existência de ondas incidentes e sua interacção com o corpo. Este potencial pode ser dividido na soma de dois potenciais, Φ_W e Φ_D . O primeiro está relacionado com a onda incidente antes de sofrer perturbações devidas à presença do corpo e o segundo representa a perturbação que o corpo induz na onda incidente (Falnes, 2002).


 Fig. 60 – Representação esquemática das condições fronteira (Journée *et al.*, 2001).

4.4.2. FORÇAS E MOMENTOS

As forças $\vec{F}$ e os momentos $\vec{M}$ resultantes que atuam sobre um corpo flutuante, resultam da integração da pressão p por toda a área submersa S do corpo. A pressão é calculada através da equação de *Bernoulli* linearizada, que satisfaz as condições descritas anteriormente (Journée *et al.*, 2001). Esta equação é obtida a partir dos potenciais de velocidade:

$$p = -\rho \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + gz \right) = -\rho \left(\frac{\partial \Phi_R}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_W}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_D}{\partial t} \right) - \rho gz \quad (27)$$

As forças e os momentos hidrodinâmicos serão assim dados por:

$$\vec{F} = \rho \iint \left(\frac{\partial \Phi_R}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_W}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_D}{\partial t} + gz \right) \vec{n} \cdot dS \quad (28)$$

$$\vec{M} = \rho \iint \left(\frac{\partial \Phi_R}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_W}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_D}{\partial t} + gz \right) (\vec{r} \times \vec{n}) \cdot dS \quad (29)$$

ou seja,

$$\vec{F} = \vec{F}_S + \vec{F}_R + \vec{F}_W + \vec{F}_D \quad (30)$$

$$\vec{M} = \vec{M}_S + \vec{M}_R + \vec{M}_W + \vec{M}_D \quad (31)$$

em que: $\vec{n}$ representa o vector unitário normal à superfície submersa orientado para o interior do corpo, e $\vec{r}$ o vector posição da superfície dS no sistema de coordenadas $O(x, y, z)$.

A Tabela 2 representa as forças e momentos que actuam sobre um corpo flutuante.

Tabela 2 – Forças e Momentos que actuam sobre um corpo flutuante.

Fonte	Termos
Impulsão hidrostática em águas paradas	$\vec{F}_S, \vec{M}_S$
Radiação do movimento oscilatório do corpo em águas paradas	$\vec{F}_R, \vec{M}_R$
Ondas incidentes no corpo fixo	$\vec{F}_W, \vec{M}_W$
Ondas de difracção no corpo fixo	$\vec{F}_D, \vec{M}_D$

É, também, comum utilizar a notação complexa para descrever as equações anteriores de pressão, forças e momentos nos seis graus de liberdade do corpo flutuante (Journée *et al.*, 2001):

$$p = -\rho Re \left\{ \left(\sum_{j=1}^6 \xi_j \Phi_{Rj} + A(\Phi_D + \Phi_W) \right) i\omega e^{i\omega t} \right\} - \rho g z \quad (32)$$

$$\vec{F} = -\rho \iint \left(g z + Re \sum_{j=1}^6 i\omega \xi_j e^{i\omega t} \Phi_{Rj} + Re i\omega A e^{i\omega t} (\Phi_D + \Phi_W) \right) \vec{n} \cdot dS \quad (33)$$

$$\vec{M} = -\rho \iint \left(g z + Re \sum_{j=1}^6 i\omega \xi_j e^{i\omega t} \Phi_{Rj} + Re i\omega A e^{i\omega t} (\Phi_D + \Phi_W) \right) (\vec{r} \times \vec{n}) \cdot dS \quad (34)$$

4.4.2.1. Forças Hidrostáticas

As forças e momentos de impulsão exercidos no corpo flutuante (Journée *et al.*, 2001) são dadas por:

$$\begin{pmatrix} \vec{F}_S \\ \vec{M}_S \end{pmatrix} = -\rho g \iint \begin{pmatrix} \vec{n} \\ \vec{r} \times \vec{n} \end{pmatrix} \cdot z \cdot dS \quad (35)$$

ou, aplicando a notação mais generalizada, sendo X_{Sk} a componente das forças e dos momentos hidroestáticos:

$$X_{Sk} = -\rho g \iint y \frac{\partial \Phi_k}{\partial n} dS, \quad \text{para } k = 1, \dots, 6 \quad (36)$$

4.4.2.2. Forças Hidrodinâmicas

A componente hidrodinâmica da força e do momento exercidos sobre um corpo flutuante está relacionada com os efeitos de radiação e massas adicionais. Esta interacção proporciona a geração de

ondas emitidas pelo corpo (Moura Paredes, 2008). O potencial de radiação do movimento oscilatório do corpo em águas em repouso pode ser descrito nos seis graus de liberdade do corpo por:

$$\Phi_R(x, y, z; t) = \sum_{j=1}^6 \Phi_{Rj}(x, y, z) \cdot u_j(t) \quad (37)$$

em que: Φ_{Rj} representa um potencial de radiação devido a um movimento unitário forçado na direcção j , $u_j(t)$ a velocidade de oscilação do corpo na direcção j . Assim, os termos associados à radiação na equação relativa às forças e momentos hidrodinâmicos, equação (30) e equação (31) respectivamente, será:

$$\begin{pmatrix} \vec{F}_R \\ \vec{M}_R \end{pmatrix} = \rho \iint \left(\vec{r} \times \vec{n} \right) \cdot \left(\frac{\partial}{\partial t} \sum_{j=1}^6 \Phi_j u_j \right) \cdot dS \quad (38)$$

As componentes $\vec{F}_R$ e $\vec{M}_R$, para cada um dos graus de liberdade do corpo, são causadas por uma oscilação harmónica forçada em cada direcção j . De modo a simplificar a descrição das forças e momentos, assume-se que:

$$\vec{F}_R = (X_1, X_2, X_3) \text{ e } \vec{M}_R = (X_4, X_5, X_6) \quad (39)$$

em que X_i representa a amplitude complexa da força ou momento na direcção i .

$$X_{rkj} = \frac{du_j}{dt} \rho \iint \Phi_j \frac{\partial \Phi_k}{\partial n} dS \quad (40)$$

Esta força ou momento de radiação X_{rkj} na direcção k , é causada por uma oscilação harmónica forçada do corpo na direcção j . Isto é verdade para todos os j e k no intervalo de 1 a 6. Quando $j = k$ a força ou momento é causado por um movimento na mesma direcção. Quando $j \neq k$ a força numa direcção resulta do movimento imposto numa outra direcção, isto introduz o que é chamado de acoplamento entre as forças e momentos (ou movimentos). A equação acima expressa as componentes de força e momento X_{rkj} em termos de potenciais ainda desconhecidos Φ_j (Journée *et al.*, 2001).

Se um movimento oscilatório for definido, em notação complexa, então o deslocamento, a velocidade e a aceleração do corpo flutuante podem ser descritos como:

$$x_j = x_{aj} e^{-i\omega t} \quad (41)$$

$$\dot{x}_j = u_j = -ix_{aj} e^{-i\omega t} \quad (42)$$

$$\ddot{x}_j = \frac{\partial u_j}{\partial t} = -\omega^2 x_{aj} e^{-i\omega t} \quad (43)$$

É assim possível separar as forças e momentos hidrodinâmicos em forças em fase com a velocidade e forças em fase com a aceleração:

$$X_{r kj} = -\bar{A}_{kj} \ddot{x}_j - \bar{B}_{kj} \dot{x}_j = \left(-\omega^2 x_{aj} \rho \iint \Phi_j \frac{\partial \Phi_k}{\partial n} dS \right) e^{-i\omega t} \quad (44)$$

em que, $\bar{A}_{kj}$ representa o coeficiente de massa adicional e relaciona-se com a força dependente da aceleração do corpo flutuante *i.e.* representa a massa de fluido que o corpo tem de acelerar na direcção do grau de liberdade k quando sofre uma aceleração unitária na direcção do grau de liberdade j e $\bar{B}_{kj}$ representa o coeficiente de amortecimento por radiação e relaciona-se com a força que se opõe ao movimento directamente dependente da velocidade do corpo *i.e.* representa uma forma de amortecimento na direcção do grau de liberdade k , devido a uma velocidade unitária na direcção do grau de liberdade j . A existência desta forma de amortecimento durante a oscilação forçada do corpo induz a propagação de ondas radiadas que absorvem a sua energia (Journée *et al.*, 2001).

Os conceitos de coeficiente de massa adicionada e coeficiente de amortecimento são fundamentais para compreender a resposta duma bóia à acção da agitação marítima, ou qualquer outra força externa. A bóia ao movimentar-se origina, à sua volta, escoamentos de água que são divididos numa componente proporcional à aceleração da bóia e noutra proporcional à sua velocidade. Estes escoamentos originam forças e momentos de inercia adicionada, proporcionais à aceleração da bóia, que tornam a bóia mais “pesada” devido à massa de água que é acelerada pela bóia; e forças de amortecimento, proporcionais à sua velocidade, que amortecem esses movimentos na medida em que existe transferência de energia da bóia para as ondas geradas pelos seus movimentos (amortecimento por radiação) (Rosa-Santos, 2010).

4.4.2.3. Forças relativas às Ondas Incidentes e de Difracção

As forças e momentos associadas às ondas incidentes e de difracção podem ser estudadas em conjunto.

$$\left(\frac{\vec{F}_w + \vec{F}_D}{\vec{M}_R + \vec{M}_D} \right) = \rho \iint \left(\vec{r} \times \vec{n} \right) \cdot \left(\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_D}{\partial t} \right) \cdot dS \quad (45)$$

em que, Φ_w representa o potencial da onda incidente antes de sofrer as perturbações devidas à presença do corpo, e Φ_D o potencial associado aos efeitos que o corpo induz na onda incidente – difracção.

O princípio da sobreposição linear permite a determinação destas forças num corpo com velocidade nula $\partial \Phi / \partial n = 0$. Assim a condição cinemática na superfície do corpo fica simplificada:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \frac{\partial \Phi_w}{\partial n} + \frac{\partial \Phi_D}{\partial n} = 0 \Rightarrow \frac{\partial \Phi_w}{\partial n} = - \frac{\partial \Phi_D}{\partial n} \quad (46)$$

Os potenciais $\Phi_W(x, y, z; t)$ e $\Phi_D(x, y, z; t)$ dependentes do tempo e espaço são escritos em termos de potenciais dependentes apenas do tempo:

$$\Phi_W(x, y, z; t) = \Phi_W(x, y, z) \cdot e^{-i\omega t} \quad (47)$$

$$\Phi_D(x, y, z; t) = \Phi_D(x, y, z) \cdot e^{-i\omega t} \quad (48)$$

$$X_{wk} = -i\rho e^{-i\omega t} \iint (\Phi_W + \Phi_D) \frac{\partial \Phi_{Rk}}{\partial n} \cdot dS, \quad \text{para } k = 1, \dots, 6 \quad (49)$$

em que Φ_{Rk} representa o potencial de radiação na direcção k .

Com a utilização de operações matemáticas e conhecendo o potencial da onda incidente antes de sofrer perturbações devidas à presença do corpo é possível eliminar o potencial de difracção. Assim resulta numa expressão denominada relação de *Haskind*:

$$\Phi_W = \frac{i\xi_j g}{\omega} \cdot e^{ky} \cdot e^{-ik(x \cos \tau - z \sin \tau)} \quad (50)$$

$$X_{wk} = -i\rho e^{-i\omega t} \iint \left(\Phi_W \frac{\partial \Phi_k}{\partial n} + \Phi_k \frac{\partial \Phi_W}{\partial n} \right) \cdot dS, \quad \text{para } k = 1, \dots, 6 \quad (51)$$

em que τ representa a direcção da onda, Φ_W o potencial relacionado com a onda incidente antes de sofrer perturbações devidas à presença do corpo, ξ_j a amplitude complexa do deslocamento no grau de liberdade j ; ρ a massa volúmica do fluido; g a aceleração da gravidade e ω a frequência angular (Journée *et al.*, 2001).

4.4.2.4. Forças de Arrastamento e Inércia

As forças de inércia e de arrastamento num escoamento cíclico, como é o caso do que está associado à agitação marítima, ocorrem simultaneamente e variam no tempo. A força de arrastamento tem origem numa perda de energia cinética do escoamento devido à sua passagem pelo corpo flutuante e cabos de amarração (Todalshaug, 2017). Em geral, as forças de arrastamento aumentam quadraticamente com a velocidade relativa do escoamento entre o corpo flutuante e a água. *Morison* propôs uma equação (aplicável apenas a corpos flutuantes que tenham uma dimensão característica pequena em relação ao comprimento de onda) para o cálculo das forças exercidas pelas ondas nos corpos flutuantes a elas sujeitas que consiste no somatório das componentes de arrastamento F_D e de inércia F_I (André, 2010).

Esta equação é aplicada normalmente por fatias, dz , do corpo flutuante uma vez que u e du/dt variam em profundidade na coluna de água.

Para um corpo estacionário:

$$dF = dF_D + dF_I \quad (52)$$

$$dF = \frac{1}{2} C_D \rho_w A u |u| + C_I \rho Vol \frac{du}{dt} \quad (53)$$

em que u representa a amplitude da velocidade horizontal do fluido, A a área do corpo que se opõe ao escoamento, Vol o volume do corpo que se opõe ao escoamento, C_D o coeficiente de arrastamento do corpo, C_I o coeficiente de inércia do corpo e du/dt a amplitude da aceleração do fluido.

4.4.2.5. Forças de Amarração

Numa bóia livre, quaisquer movimentos que lhe sejam impostos no plano horizontal (avanço, deriva e guinada) não originam forças e momentos de restituição, desde que o seu deslocamento se mantenha inalterado. Por outro lado, os movimentos no plano vertical (arfagem, balanço e cabeceio) são contrariados por forças e momentos de restituição que fazem a bóia regressar à sua posição inicial de equilíbrio. No entanto, se a bóia estiver amarrada, as forças aplicadas nos elementos do seu sistema de amarração, em resultado desses movimentos, fazem-na retomar à sua posição de equilíbrio (Rosa-Santos, 2010).

Uma vez que as amarrações com perfil de catenária, Fig. 61, são as mais comuns para bóias amarradas, de seguida vão ser descritas as mais importantes expressões que determinam as forças aplicadas no corpo flutuante por este sistema de amarração.

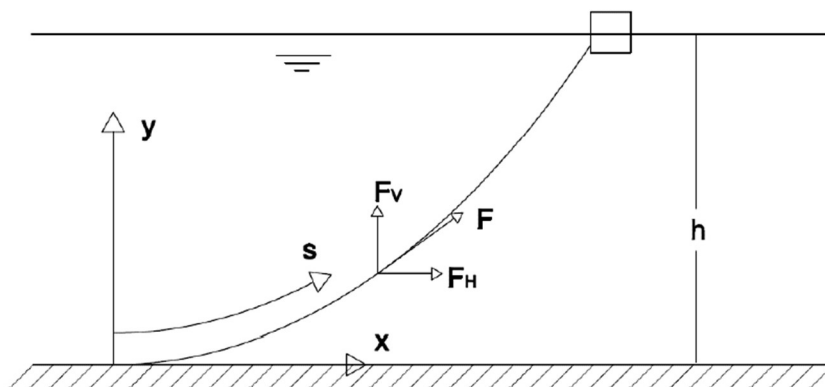


Fig. 61 – Representação esquemática duma amarração do tipo catenária (Moura Paredes, 2008).

Assim, a componente horizontal da força da amarra é dada por (Moura Paredes, 2008):

$$F_H = \frac{w l}{\cosh^{-1}\left(\frac{w h}{F_H} + 1\right)} \quad (54)$$

A componente vertical da força na amarra, para uma dada abcissa s , é dada por:

$$F_V = w s \quad (55)$$

A força total na amarra, num ponto com uma altura y , é dada por:

$$F = F_H + w y \quad (56)$$

O comprimento da amarra até uma dada abcissa x , é dada por:

$$s = \frac{F_H}{w} \sinh\left(\frac{w x}{F_H}\right) \quad (57)$$

A altura de um dado ponto com uma dada abcissa, é dada por:

$$y = \frac{F_H}{w} \left(\cosh\left(\frac{w x}{F_H}\right) - 1 \right) \quad (58)$$

Em que: w representa o peso submerso da amarra e h a altura de água.

4.5. EQUAÇÕES DO MOVIMENTO DE UMA BÓIA AMARRADA

O estudo do comportamento de bóias amarradas pode ser abordado no domínio da frequência e do tempo, sendo que a forma como as equações do movimento são apresentadas é função do tipo de técnica escolhida para a sua resolução. Os seis modos de oscilação de uma bóia amarrada estão acoplados, por esse motivo a determinação da amplitude dos seus movimentos implica a resolução de um conjunto de seis equações, uma por cada modo de oscilação.

Assim sendo, é conveniente, na descrição do movimento de uma bóia amarrada, dividir as acções presentes em duas categorias: forças de excitação, e factores que condicionam a resposta da bóia. A primeira categoria inclui a acção da agitação marítima, do vento, das correntes, da passagem de navios, entre outras. Os factores que condicionam a resposta da bóia estão associados aos escoamentos da água induzidos pelos seus movimentos e incluem as forças de restituição hidrostática (essenciais para os modos de oscilação de balanço, arfagem e cabeceio), as forças aplicadas nos cabos de amarração, o

amortecimento por radiação dos movimentos da bóia, a massa adicionada, entre outros (Rosa-Santos, 2010).

Assim, considerando que os movimentos da bóia, relativamente à sua posição de equilíbrio, são de pequena amplitude, e que o sistema é linear, as equações do movimento, no domínio da frequência, são dadas por:

$$F_k = \sum_{j=1}^6 \{(M_{kj} + a_{kj})\ddot{x}_j + b_{kj}\dot{x}_j + C_{kj}x_j\}, \quad \text{para } k = 1, \dots, 6 \quad (59)$$

Em que: x_j representa a amplitude do movimento da bóia segundo o modo de oscilação j (m para $j = 1$ a 3, e rad para $j = 4$ a 6), M_{kj} a matriz de massas e momentos de inércia, a_{kj} a matriz de massas e momentos de inércia adicionados, b_{kj} a matriz de amortecimento, C_{kj} a matriz de restituição hidrostática, F_k as forças e momentos exteriores que actuam na bóia segundo o modo k .

As características do movimento da bóia para ondas harmónicas regulares, são dadas por (Janardhanan *et al.*, 2007):

$$f_k = \{-\omega^2 [(M_{kj} + a_{kj}) + C_{kj}] + i\omega b_{kj}\} x_j \quad (60)$$

$$x_j = \frac{f_k}{K_{kj}} \quad (61)$$

As forças de restituição hidrostática tendem a fazer a bóia retomar a sua posição inicial de equilíbrio. Uma vez que a bóia não se afasta muito dessa posição inicial (movimentos de pequena amplitude), admite-se que a relação entre as forças hidrostáticas e os movimentos da bóia, expressa pela matriz de restituição hidrostática, é linear.

Esta equação (59) representa um conjunto de seis equações diferenciais que descrevem os movimentos da bóia amarrada segundo os seis graus de liberdade existentes. Os termos que constituem esta equação são matrizes com dimensão 6x6 e vectores de dimensão 1x6. As matrizes podem ser simplificadas consoante as especificações do problema e número de planos de simetria da bóia.

Os coeficientes hidrodinâmicos são função da forma do casco da bóia, da profundidade, da frequência de oscilação, da proximidade a uma estrutura reflectora, entre outros. Se todos os coeficientes apresentados na equação (59) forem constantes para cada frequência particular do movimento, as seis equações diferenciais podem ser resolvidas no domínio da frequência (Ligteringen *et al.*, 2001).

As forças de restituição do sistema de amarração são, no entanto, geralmente não-lineares em relação ao deslocamento x , tornando necessária a resolução das equações do movimento no domínio do tempo. Neste caso, o termo da equação (59), relacionado com o amortecimento do movimento é substituído por um função de atraso, seguida duma abordagem baseada em funções de resposta a impulso, passando a variável x a ser função do tempo.

Assim, os movimentos da bóia segundo os seus seis graus de liberdade, sob a influência de forças externas arbitrarias, podem ser estimados com base na integração, em ordem ao tempo, das equações do movimento (Rosa-Santos, 2010):

$$F_k = \sum_{j=1}^6 \left\{ (M_{kj} + A_{kj}) \ddot{x}_j(t) + \int_{-\infty}^t R_{kj}(t - \tau) \dot{x}_j(\tau) d\tau + C_{kj} \dot{x}_j(t) \right\}, \quad \text{para } k = 1, \dots, 6 \quad (62)$$

em que A_{kj} representa a matriz de inércia adicionada para frequência infinita, R_{kj} as funções de resposta a impulso, e t e τ o tempo. Os restantes termos foram já descritos anteriormente.

O segundo membro da equação inclui os termos associados aos movimentos do corpo rígido e as componentes lineares das forças de reacção hidrodinâmica que resultam dos movimentos da bóia e são descritas pelas funções de resposta a impulso. Os termos não-lineares resultam das características não-lineares do sistema de amarração, das forças de segunda ordem da agitação marítima e das forças de arrastamento. As solicitações externas podem resultar da acção da agitação marítima, das correntes, do vento e das forças aplicadas nos cabos de amarração.

4.6. PERÍODOS NATURAIS DE OSCILAÇÃO DE UMA BÓIA

Com o intuito de introduzir alguns conceitos importantes relacionados com a dinâmica de corpos flutuantes (eventualmente amarrados), considere-se um sistema do tipo massa-mola cujos movimentos são linearmente amortecidos, e com apenas um grau de liberdade segundo a direcção de actuação de uma força harmónica (externa) (Rosa-Santos, 2010).

A ressonância ocorre quando um sistema é actuado por uma solicitação com um período próximo ou igual ao período natural de oscilação do próprio sistema. Tal período de ressonância existe se o sistema tiver rigidez e inércia. Assim, para corpos flutuantes livres, temos períodos de ressonância para os modos de oscilação de arfagem, balanço e cabeceio. Nas condições referidas (considerando a aplicação de um movimento de pequena amplitude na bóia segundo cada modo de oscilação) são definidas as expressões que permitem determinar os períodos naturais de oscilação de uma bóia livre.

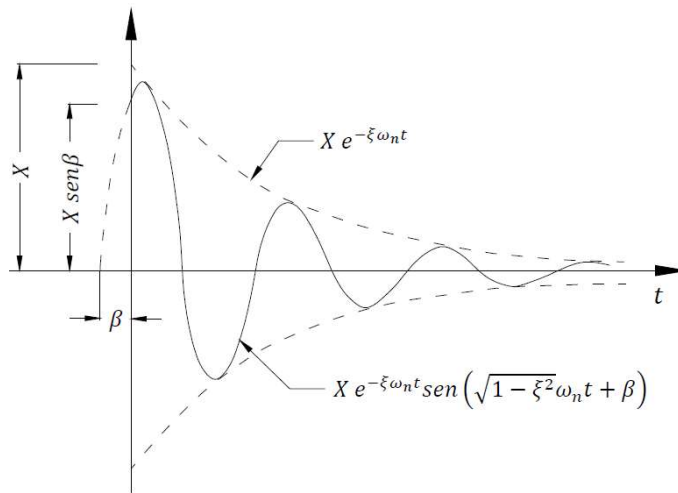
É possível escrever a equação geral das oscilações livres do sistema através de:

$$x = X e^{-\xi \omega_n t} \sin(\sqrt{1 - \xi^2} \omega_n t + \beta) \quad (63)$$

em que X e β são determinados com base nas condições iniciais do problema. A frequência natural de oscilação de um sistema com amortecimento ω_d é dada por:

$$\omega_d = \sqrt{1 - \xi^2} \omega_n \quad (64)$$

A Fig. 62 mostra as oscilações livres de um sistema sub-amortecido. Os valores máximos e mínimos seguem a curva exponencial apresentada na primeira parte da equação (63).


 Fig. 62 – Oscilações livres amortecidas: $\xi < 1.0$ (Rosa-Santos, 2010).

As curvas de decaimento podem ser obtidas experimentalmente deslocando a bóia, da sua posição de equilíbrio, segundo a direcção do grau de liberdade pretendido e libertando-o posteriormente. De seguida são ajustadas duas curvas do tipo exponencial, uma para os valores máximos e outra para os mínimos, aos registos das oscilações amortecidas da bóia. O período natural e o correspondente amortecimento dessas oscilações podem ser determinados igualando o expoente das curvas referidas a $\xi \omega_n$ e utilizando a equação (64). O valor da frequência natural ω_d é obtido a partir do período das oscilações amortecidas registadas. O número de oscilações até à extinção depende da quantidade de amortecimento do sistema (Rosa-Santos, 2010).

Devido à natureza das experiências de decaimento livre, os coeficientes hidrodinâmicos estimados são relativos, apenas, à frequência natural do sistema constituído pelo corpo flutuante. Como os coeficientes de massa adicionada e de amortecimento são função da frequência da oscilação, a sua avaliação requer a utilização de outros métodos experimentais. Em alternativa podem ser determinados com base na teoria linear da difracção-radiação apresentada em (Chakrabarti, 1987).

Assim sendo, o período natural das oscilações harmónicas de balanço (*roll*) T_R , sem amortecimento, é dado por:

$$T_R = \frac{2\pi}{\omega_R} = 2\pi \sqrt{\frac{i_x^2 + \frac{A_{44}}{M}}{g \overline{GM}_t}} \quad (65)$$

em que M representa a massa da bóia, i_x o raio de giração transversal, A_{44} o momento de inércia adicionado para o modo de oscilação de balanço em fase com a aceleração angular dessa oscilação, $\overline{GM}_t$ a altura metacêntrica transversal e g a aceleração da gravidade.

O valor de T_R varia no mesmo sentido que i_x , o que significa que o afastamento das massas do eixo longitudinal de oscilação da bóia aumenta o período da oscilação de balanço. Além disso uma menor altura metacêntrica transversal reflecte-se em períodos de balanço mais elevados.

É fácil estabelecer a analogia entre as oscilações de uma bóia livre, em águas paradas, e as oscilações de um sistema simples do tipo massa-mola, caso se considere que os movimentos da bóia em análise são amortecidos por forças proporcionais à sua velocidade de oscilação. Este amortecimento resulta das forças de fricção entre a superfície molhada do casco da bóia e a água e das perdas de energia associadas à formação de vórtices e ao amortecimento por radiação.

O período das oscilações harmónicas de balanço $T_{R,d}$ (período natural) com amortecimento é dado por:

$$T_{R,d} = 2\pi \sqrt{\frac{M i_x^2 + A_{44}}{W \overline{GM}_t}} \frac{1}{\sqrt{1 - K_R^2}} \quad (66)$$

O coeficiente de decaimento do modo de oscilação de balanço K_R é dado por:

$$K_R = \frac{\lambda_R}{\omega_R} = \sqrt{\frac{B_{44}^2}{4W \overline{GM}_t (M i_x^2 + A_{44})}} \quad (0 < K_R < 1) \quad (67)$$

em que λ_R representa uma constante, ω_R a frequência angular natural do modo de oscilação de balanço, B_{44} representa o momento de amortecimento hidrodinâmico para o modo de balanço associado à velocidade angular dessa oscilação, M a massa da bóia e W o peso da bóia.

A frequência angular natural do modo de oscilação de balanço ω_R é dada por:

$$\omega_R = \sqrt{\frac{W \overline{GM}_t}{M i_x^2 + A_{44}}} \quad (68)$$

A constante λ_R é dada por:

$$\lambda_R = \frac{B_{44}}{2 (M i_x^2 + A_{44})} \quad (69)$$

Apesar de os movimentos de balanço da bóia serem afectados pelo sistema de amarração (este aumenta o amortecimento dessas oscilações, reduzindo as amplitudes máximas de oscilação) o período natural do modo de oscilação de balanço não é significativamente modificado (Rosa-Santos, 2010) logo consideram-se as equações para bóia livre.

De um modo idêntico, podem ser definidas as seguintes equações para a determinação do período natural das oscilações harmónicas de cabeceio (*pitch*) T_P sem amortecimento:

$$T_P = \frac{2\pi}{\omega_P} = 2\pi \sqrt{\frac{i_y^2 + \frac{A_{55}}{M}}{g \overline{GM}_l}} \quad (70)$$

em que M representa a massa da bóia, i_y o raio de giração longitudinal, A_{55} o momento de inércia adicionado para o modo de oscilação de cabeceio em fase com a aceleração angular dessa oscilação, $\overline{GM}_l$ a altura metacêntrica longitudinal e g a aceleração da gravidade.

O período natural das oscilações harmónicas de cabeceio $T_{P,d}$, com amortecimento, é dado por:

$$T_{P,d} = 2\pi \sqrt{\frac{M i_y^2 + A_{55}}{W \overline{GM}_l}} \frac{1}{\sqrt{1 - K_P^2}} \quad (71)$$

O coeficiente de decaimento do modo de oscilação de cabeceio K_P é dado por:

$$K_P = \frac{\lambda_P}{\omega_P} = \sqrt{\frac{B_{55}^2}{4W \overline{GM}_l (M i_y^2 + A_{55})}} \quad (0 < K_P < 1) \quad (72)$$

em que λ_P representa uma constante, ω_P a frequência angular natural do modo de oscilação de cabeceio, B_{55} representa o momento de amortecimento hidrodinâmico para o modo de cabeceio associado à velocidade angular dessa oscilação, M a massa da bóia e W o peso da bóia.

Se o corpo flutuante for axissimétrico, o período natural de oscilação do modo de balanço é igual ao período natural para o modo de oscilação de cabeceio.

Para o modo de arfagem (*heave*) as equações do período das oscilações harmónicas T_H (período natural) sem amortecimento tomam a seguinte forma:

$$T_H = \frac{2\pi}{\omega_H} = 2\pi \sqrt{\frac{M + A_{33}}{\gamma_w A_w}} \quad (73)$$

em que M representa a massa da bóia, A_{33} a massa adicionada segundo o modo de oscilação de arfagem em fase com a aceleração dessa oscilação, γ_w o peso volumico da água, A_w a área da bóia no plano de água e ω_H a frequência angular natural do modo de oscilação de arfagem.

Para as oscilações de arfagem amortecidas, as equações anteriores tomam a seguinte forma:

$$T_{H,d} = 2\pi \sqrt{\frac{M + A_{33}}{\gamma_w A_w}} \frac{1}{\sqrt{1 - K_H^2}} \quad (74)$$

O coeficiente de decaimento do modo de oscilação de arfagem K_H é dado por:

$$K_H = \frac{\lambda_H}{\omega_H} = \sqrt{\frac{B_{33}^2}{4 \gamma_w A_w (M + A_{33})}} \quad (0 < K_H < 1) \quad (75)$$

em que ω_H representa a frequência angular natural do modo de oscilação de arfagem, B_{33} o momento de amortecimento hidrodinâmico para o modo de arfagem associado à velocidade angular dessa oscilação, A_{33} a massa adicionada segundo o modo de oscilação de arfagem em fase com a aceleração dessa oscilação e M a massa da bóia.

(Beresford, 2010) propôs três equações alternativas, simplificadas, para o cálculo do período natural para os modos de oscilação de balanço, T_R , cabeceio, T_P , e arfagem, T_H , sem amortecimento, em águas profundas:

$$T_R = 2\pi \sqrt{\frac{i_x^2 \left(\frac{V + V'}{V}\right)}{g \bar{G} M_t}}, \quad \left(\frac{V + V'}{V}\right) \cong 1 \quad (76)$$

$$T_P = 2\pi \sqrt{\frac{i_y^2 \left(\frac{V + V'}{V}\right)}{g \bar{G} M_t}}, \quad \left(\frac{V + V'}{V}\right) \cong 3 \quad (77)$$

$$T_H = 2\pi \sqrt{\frac{2T C_B}{C_A g}} \quad (78)$$

em que T representa o calado, C_B o coeficiente de bloco e C_A o coeficiente da área no plano de água.

Nas bóias amarradas, devido aos cabos de amarração, quaisquer movimentos que sejam impostos são contrariados pelas forças que os elementos do sistema de amarração aplicam na bóia em resposta a esses movimentos, que a fazem retomar à sua posição de equilíbrio. Assim para bóias amarradas, podemos, além dos períodos de ressonância para os modos de oscilação de arfagem, balanço e cabeceio, ter períodos de ressonância para os modos de oscilação de avanço, deriva e guinada.

Os cabos de amarração são definidos como os elementos mecânicos flexíveis que ligam e fixam o corpo flutuante aos seus pontos de ancoragem. As amarrações influenciam o movimento das bóias devido ao aumento das forças de restituição sobre a mesma.

Assim, o coeficiente de restituição para o modo de oscilação de avanço (*surge*), K_{11} , da bóia amarrada, é dado por:

$$K_{11} = \frac{(P + P_1)}{\sqrt{l^2 + d_1^2}} \quad (79)$$

$$P_1 = \frac{AE}{l} \left(\sqrt{l^2 + d_1^2} - 1 \right) \quad (80)$$

em que P representa a pré-tensão do cabo de amarração, W o peso da bóia, AE/l a rigidez axial do cabo de amarração, l o comprimento do cabo de amarração e d_1 o deslocamento arbitrário para o modo de oscilação de avanço.

O coeficiente de restituição para o modo de oscilação de arfagem (*heave*), K_{33} , da bóia amarrada, é dado por:

$$K_{33} = \rho g \nabla A_w + \frac{AE}{l} \quad (81)$$

em que, ρ representa a massa volúmica do fluido, g a aceleração da gravidade e A_w a área da bóia no plano de água.

O coeficiente de restituição para o modo de oscilação de cabeceio (*pitch*), K_{55} , da bóia amarrada, é dado por:

$$K_{55} = \rho g \nabla \overline{GM}_l + \frac{Ph_c}{d_5} \sin d_5 \quad (82)$$

em que ∇ representa o volume de água deslocada pelo corpo flutuante, $\overline{GM}_l$ a altura metacêntrica longitudinal, h_c o calado da bóia devido à pré-tensão e peso da amarra e d_5 o deslocamento arbitrário para o modo de oscilação de cabeceio.

O coeficiente de restituição aumenta para cada modo de oscilação, devido ao efeito do cabo de amarração no corpo flutuante. Enquanto que, para a bóia livre, o coeficiente de restituição apenas contém os termos hidrostáticos, no caso de bóias amarradas, os coeficientes de restituição contêm os termos hidrostáticos e os termos referentes à amarração. Com o aumento dos valores dos coeficientes de restituição devido à influência do cabo de amarração na bóia, as amplitudes de movimento da bóia diminuem (Janardhanan *et al.*, 2007).

5

ESTUDO EXPERIMENTAL

5.1. ENQUADRAMENTO

Neste capítulo é feita a descrição de todo o trabalho experimental nomeadamente: as características do modelo físico em estudo, da instalação experimental e dos equipamentos de medição, bem como dos ensaios executados e resultados obtidos. Neste enquadramento considerou-se fundamental apresentar uma breve exposição teórica relativamente à modelação física para facilitar a compreensão do trabalho laboratorial. O objectivo deste capítulo é a determinação e apresentação das características dinâmicas do corpo flutuante em estudo: frequências de oscilação natural, comportamento do corpo sob efeito de agitação regular e irregular, para diferentes frequências, nos graus de liberdade estudados, bem como, sobretudo, a resposta do TENG (incluído no interior do corpo flutuante) perante os testes definidos.

5.2. MODELAÇÃO FÍSICA

5.2.1. INTRODUÇÃO

Os modelos físicos, são reproduções simplificadas da realidade, normalmente a uma escala reduzida, na qual as principais forças que actuam sobre os mesmos estão reproduzidas numa correcta proporção. As condições para que um modelo físico reproduza todos os aspectos do fenómeno real em estudo (protótipo) são as condições de semelhança do ponto de vista geométrico, cinemático e dinâmico.

A modelação física permite a reprodução dos principais fenómenos físicos que mais condicionam o comportamento duma bóia amarrada, uma vez que o laboratório proporciona condições-fronteira controláveis, e os testes podem ser repetidos em condições idênticas, o que é impossível na realidade. Os resultados experimentais podem ser afectados por efeitos de laboratório e por efeitos de escala. Os efeitos laboratoriais resultam da incapacidade de se representar no laboratório, de forma apropriada, as forças exteriores que actuam sobre o modelo, bem como todas as condições-fronteira do protótipo. Os efeitos de escala resultam da impossibilidade prática de reproduzir no modelo todas as forças que estão presentes nos fenómenos em estudo no protótipo. Estes dois tipos de efeitos podem afectar a qualidade dos resultados obtidos. Sendo assim, para que os resultados de um modelo físico sejam fiáveis é imperativo assegurar a correcta reprodução das características do protótipo, e garantir que os efeitos de escala e laboratoriais são de pequena magnitude e não influenciam, de forma significativa, a qualidade desses resultados. Isto requer uma escolha criteriosa da escala a que o modelo físico é construído e operado, e a adopção de práticas tendo em vista a minimização dos efeitos laboratoriais na instalação experimental.

No estudo do comportamento hidrodinâmico de uma bóia amarrada podem ser individualizadas as seguintes componentes: as condições de agitação marítima, a geometria e distribuição de massas da bóia, os cabos de amarração, e o *layout* de amarração da bóia, a batimetria da área envolvente, os equipamentos de medição, entre outros.

5.2.2. CRITÉRIOS DE SEMELHANÇA

“A semelhança entre um protótipo e o 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” (Taveira-Pinto, 2012).

Quando a relação entre duas dimensões quaisquer for constante existe semelhança geométrica, quando a relação entre as componentes vectoriais de todos os movimentos de ambos os sistemas (modelo e protótipo), for constante, (trajectórias de todos os pontos de ambos os sistemas são geometricamente semelhantes) ocorre semelhança cinemática, por último, se as relações entre as componentes vectoriais de todas as forças dos dois sistemas forem constantes existe semelhança dinâmica.

Do quociente entre as diferentes forças presentes e as forças de inércia resultam os critérios de semelhança, que são utilizados, como suporte à concepção e ao dimensionamento dos modelos físicos, e como suporte à interpretação dos resultados experimentais. Na prática, é impossível conseguir uma semelhança completa entre o modelo e o protótipo.

No domínio da mecânica dos fluidos, a segunda lei de *Newton*, de acordo com a semelhança dinâmica, pode tomar a seguinte forma:

$$m \frac{dU}{dt} = \sum_{k=1}^n F_{k,f} \Rightarrow \bar{F}_i = \bar{F}_g + \bar{F}_\mu + \bar{F}_\sigma + \bar{F}_e + \bar{F}_{pr} \quad (83)$$

Sendo 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 actuar nesse elemento, $\bar{F}_i$ as forças de inércia, $\bar{F}_g$ as forças devidas à aceleração da gravidade, $\bar{F}_\mu$ as forças de viscosidade, $\bar{F}_\sigma$ as forças de tensão superficial, $\bar{F}_e$ as forças elásticas e $\bar{F}_{pr}$ as forças de pressão.

As forças de inércia estão presentes em todos os problemas que envolvem escoamentos, logo estas podem relacionar-se com uma das restantes forças que actuam sobre o fluido, de forma a definir quocientes adimensionais. Estes quocientes traduzem a influência relativa dessas duas forças na situação de escoamento em estudo, e têm a designação de número de *Froude* (Fr), número de *Reynolds* (Re), número de *Weber* (We), número de *Cauchy* (Ca) e número de *Euler* (Eu) e tomam valores a partir das seguintes expressões:

$$Fr = \sqrt{\frac{F_i}{F_g}} = \frac{U^2}{gL} = \frac{U}{\sqrt{gL}} \quad (84)$$

$$Re = \frac{F_i}{F_\mu} = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\nu} \quad (85)$$

$$We = \frac{F_i}{F_\sigma} = \frac{\rho U^2 L}{\sigma} \quad (86)$$

$$Ca = \frac{F_i}{F_e} = \frac{\rho U^2}{\varepsilon} \quad (87)$$

$$Eu = \frac{F_i}{F_{pr}} = \frac{p}{\rho U^2} \quad (88)$$

Sendo que: U 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 e p a pressão.

No escoamento de fluidos as forças de inércia podem estar associadas a dois tipos de aceleração: à aceleração temporal (referente às variações da velocidade do escoamento num ponto ao longo do tempo e a aceleração convectiva) e à aceleração que resulta de diferentes pontos, no campo de escoamento, terem velocidades diferentes. O quociente entre as forças de inércia associadas aos dois tipos de aceleração é designado por número de *Strouhal* (St) e é dado por:

$$St = \frac{L}{Ut} \quad (89)$$

Sendo que U representa a velocidade de escoamento, L uma dimensão característica e t um tempo característico.

Tabela 3 – Exemplos de aplicação de alguns critérios de semelhança (Taveira-Pinto, 2012).

Critério de Semelhança	Exemplos de aplicação
<i>Froude (Fr)</i>	Escoamentos com superfície livre, onde as forças de inercia são importantes face às forças gravíticas. Ondas de gravidade em médias e grandes profundidades.
<i>Reynolds (Re)</i>	Escoamentos com predominância de forças viscosas.
<i>Weber (We)</i>	Escoamentos com predominância de forças de tensão superficial.
<i>Cauchy (Ca)</i>	Forças de compressibilidade.
<i>Euler (Eu)</i>	Forças de pressão.
<i>Strouhal (St)</i>	Forças oscilatórias. Escoamentos não permanentes e oscilatórios.

No caso do comportamento de bóias amarradas, as forças de inércia que actuam no escoamento são contrabalançadas, essencialmente, pelas forças que resultam da acção da gravidade e pela amarração. Assim, os respectivos modelos deveriam ser construídos e operados de acordo com os critérios de semelhança de *Froude* e de *Cauchy*, da impossibilidade de compatibilizar todos os tipos de forças presentes, resultam os efeitos de escala. Estes efeitos têm de ser controlados e minimizados. Importa referir ainda que quanto maior for o factor de escala a que o modelo físico é construído, menores serão esses efeitos. Esta impossibilidade prática do modelo físico satisfazer todos os critérios de semelhança apresentados, leva a que a selecção seja necessário escolher um critério de semelhança em detrimento dos outros.

A gravidade e a pressão são forças importantes para a estabilidade do modelo e, por essa razão, e por se tratar de escoamentos em superfície livre, o critério de *Froude* foi o critério utilizado na presente dissertação, assegurando assim, que a relação entre as forças de inércia e as forças gravíticas se mantém inalterada quando o protótipo é transposto para as dimensões do modelo.

Ao considerar que as forças de viscosidade (critério de *Reynolds*), os efeitos de elasticidade (critério de *Cauchy*) e as forças de tensão superficial (critério de *Weber*) são insignificantes no modelo e no protótipo introduz-se efeitos de escala. Estes efeitos de escala podem ser atenuados se o escoamento for turbulento, isto é, se apresentar um número de *Reynolds* elevado. Nestas condições, as forças viscosas são independentes do valor de *Re* (Taveira-Pinto, 2012).

A relação existente entre grandezas no modelo físico e no protótipo é representada por factores de escala, que são determinados pelo quociente entre uma determinada grandeza no modelo e no protótipo:

$$\lambda_x = \frac{X_m}{X_p} \quad (90)$$

Os testes experimentais, são normalmente realizados em tanques de ondas com água doce quando na realidade, o protótipo irá estar em contacto com água salgada, que apresenta uma massa volúmica diferente. É então necessário multiplicar os factores de escala obtidos a partir do critério de semelhança de *Froude* por um factor correctivo, γ , resultado do quociente entre a massa volúmica da água doce e da água salgada. O factor correctivo tem o valor aproximado de 0,976.

$$\gamma = \frac{1000 \text{ kg/m}^3}{1025 \text{ kg/m}^3} = 0,976 \quad (91)$$

A Tabela 4 apresenta os factores de escala obtidos com base na semelhança de *Froude*.

Tabela 4 – Factores de escala geométricos, cinemáticos e dinâmicos obtidos com base na semelhança de Froude.

Característica	Unidades	Factor de Escala
Comprimento (geométrico)	m	λ_l
Área	m^2	λ_l^2
Volume	m^3	λ_l^3
Ângulos	$^\circ$	1
Tempo cinemático	s	$\lambda_l^{1/2}$
Frequência	s^{-1}	$\lambda_l^{-1/2}$
Deslocamento	m	λ_l
Velocidade	m/s	$\lambda_l^{1/2}$
Aceleração	m/s^2	1
Momento linear	$kg.m/s$	$\gamma \lambda_l^{7/2}$
Impulso	$N.s$	$\gamma \lambda_l^{7/2}$
Tempo cinemático	s	$\lambda_l^{1/2}$
Frequência	s^{-1}	$\lambda_l^{-1/2}$
Deslocamento	m	λ_l
Velocidade	m/s	$\lambda_l^{1/2}$
Aceleração	m/s^2	1
Momento linear	$kg.m/s$	$\gamma \lambda_l^{7/2}$
Impulso	$N.s$	$\gamma \lambda_l^{7/2}$
Potência	$J/s (W)$	$\gamma \lambda_l^{7/2}$
Força	N	$\gamma \lambda_l^3$
Peso	N	$\gamma \lambda_l^3$
Pressão	N/m^2	$\gamma \lambda_l$
Energia	J	$\gamma \lambda_l^4$
Massa	kg	$\gamma \lambda_l^3$

5.2.3. EFEITOS DE ESCALA, DE MODELO E DE LABORATÓRIO E ERROS DE MEDIÇÃO

Como foi já mencionado, os efeitos de escala resultam de uma incorrecta reprodução dos fenómenos físicos em laboratório e devem-se à impossibilidade de respeitar todos os critérios de semelhança em simultâneo, ou seja, nem todos os fenómenos de interacção da onda com o corpo flutuante (que contém o TENG) estão reproduzidos correctamente no modelo. Nem todos os parâmetros adimensionais apresentam valores iguais no modelo e no protótipo. Estes efeitos podem ser avaliados através da comparação dos resultados experimentais obtidos com modelos físicos a várias escalas, a fim de verificar quais os parâmetros adimensionais que não se mantêm constantes. Esta comparação, só é possível se as condições técnicas de experimentação de cada modelo físico forem idênticas. Os efeitos de escala serão tanto maiores quanto menor for o factor de escala a que o modelo é construído (Rosa-Santos, 2010).

A incorrecta reprodução da viscosidade do fluido no modelo físico, relativamente à propagação das ondas de curto período, pode traduzir-se num aumento das perdas de energia, por fricção no fundo. Os problemas ser acautelados evitando que as ondas geradas tenham de percorrer grandes distâncias no modelo físico, ou através da correcção dessas perdas de energia, especificando no sistema de geração uma altura de onda maior. A tensão superficial das ondas é geralmente insignificante no protótipo e por esse motivo, se o modelo não for muito pequeno o efeito de escala devido a não considerar a semelhança de *Weber* é desprezado.

Os efeitos de modelo devem-se à reprodução incorrecta de algumas características do protótipo, tais como a geometria e as características das ondas e das correntes, devido às condições de fronteira do modelo (Taveira-Pinto, 2012).

As dimensões finitas do tanque de ondas (instalação experimental) fazem com que apenas a área com mais interesse para o problema em estudo seja reproduzida à escala e introduzem fronteiras físicas que podem não ter qualquer correspondência com a realidade. Essas fronteiras devem ser tidas em conta no momento da colocação do modelo físico na instalação experimental, para evitar reflexões indesejadas (Rosa-Santos, 2010).

Por último, os erros de medição derivam dos equipamentos utilizados na recolha de dados no modelo físico. A incerteza de certas medições resulta na necessidade de repetir testes realizados e na recalibração do equipamento de medição utilizado. Para minimizar este tipo de erros, no final de cada teste experimental, era verificado o ruído associado, e realizada uma nova calibração do sistema *Qualisys* se esse ruído estivesse acima do limite considerado de 3 mm. À semelhança do sistema *Qualisys*, também os dados relativos à agitação gerada eram verificados no final de cada ensaio, que era repetido, no caso da altura de onda medida não correspondesse ao pretendido. Refere-se ainda que, para evitar medições incorrectas, as sondas de níveis hidrodinâmicos foram calibradas todos os dias, antes do começo dos ensaios.

5.3. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Para a realização do estudo experimental são necessárias instalações e equipamentos que permitam a correcta reprodução do problema em estudo, nomeadamente um tanque de ondas, um sistema de geração de agitação marítima, um sistema de aquisição de agitação marítima e um sistema de medição dos movimentos da bóia através de câmaras digitais de infra-vermelhos (sistema *Qualisys*), Fig. 63.

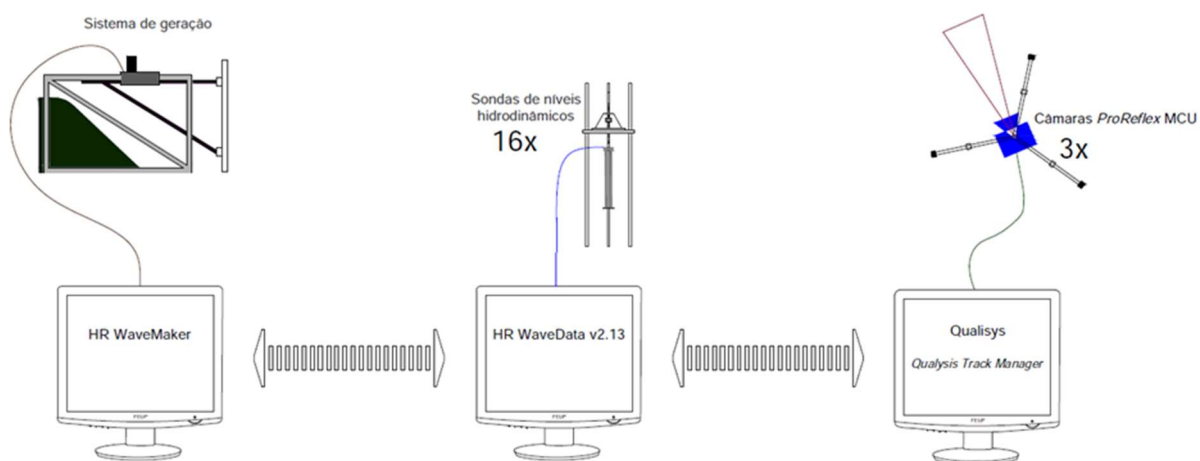


Fig. 63 – Organograma de funcionamento dos três sistemas utilizados no estudo experimental (adaptado de (Rosa-Santos, 2010)).

Assim, os ensaios em modelo físico do corpo flutuante em estudo, foram realizados no Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (SHRHA) da Faculdade de

Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Estas instalações experimentais possuem um tanque de ondas, Fig. 64, equipado com um sistema de geração de agitação marítima.

As dimensões principais do tanque de ondas são 28 m de comprimento, 12 m de largura e 1.2 m de altura. Na zona central do tanque existe um fosso com 1.5 m de profundidade, 2.0 m de largura e 4.5 m de comprimento para permitir maiores profundidades de água, e na extremidade oposta à do sistema de geração está instalada uma praia de dissipação da energia das ondas.



Fig. 64 – Fotografia do tanque de ondas do laboratório de hidráulica da FEUP.

A praia dissipadora ocupa todo o lado oposto ao sistema de geração de ondas e tem cerca de 8 m de desenvolvimento e uma inclinação de 5 %. Esta foi construída de modo a dissipar a energia da agitação marítima e permitir obter coeficientes de reflexão desprezáveis, normalmente inferiores a 10 % (SHRHA, 2018). A Fig. 65 representa o esquema do tanque de ondas.



Fig. 65 – Esquema do tanque de ondas do laboratório de hidráulica da FEUP (SHRHA, 2018).

O sistema de geração de agitação marítima concebido pela empresa britânica *HR Wallingford, UK*, é do tipo multielemento e é capaz de gerar ondas regulares e ondas irregulares. É composto pela máquina de geração propriamente dita, equipada com 16 pás (cada uma com 75 cm de largura) e respectivos motores eléctricos, que se encontram dentro do tanque de ondas, e pela unidade de controlo que se encontra na sala de controlo, juntamente com os computadores onde está instalado o *software* de geração *HR WaveMaker*. As pás batedoras estão separadas em dois módulos de oito pás cada, sendo revestidas a fibra de vidro e com movimento independente. Atrás das pás existe um material plástico reticulado esponjoso cuja função é absorver as oscilações da superfície livre da água atrás dos batedores (Taveira-Pinto *et al.*, 2007). A Fig. 66 mostra as pás do sistema e o mecanismo que as movimenta.



Fig. 66 – Sistema de geração agitação marítima do Laboratório de Hidráulica da FEUP (Taveira-Pinto *et al.*, 2007).

A sala de controlo, Fig. 67, permite operar o sistema de geração de ondas e efectuar a aquisição e o tratamento dos resultados das medições da agitação marítima e movimentos da bóia. O *software* de recolha de dados, permite também, efectuar análises espectrais, estatísticas e de reflexão, e ainda a exportação dos dados adquiridos para que possam ser analisados e tratados posteriormente.

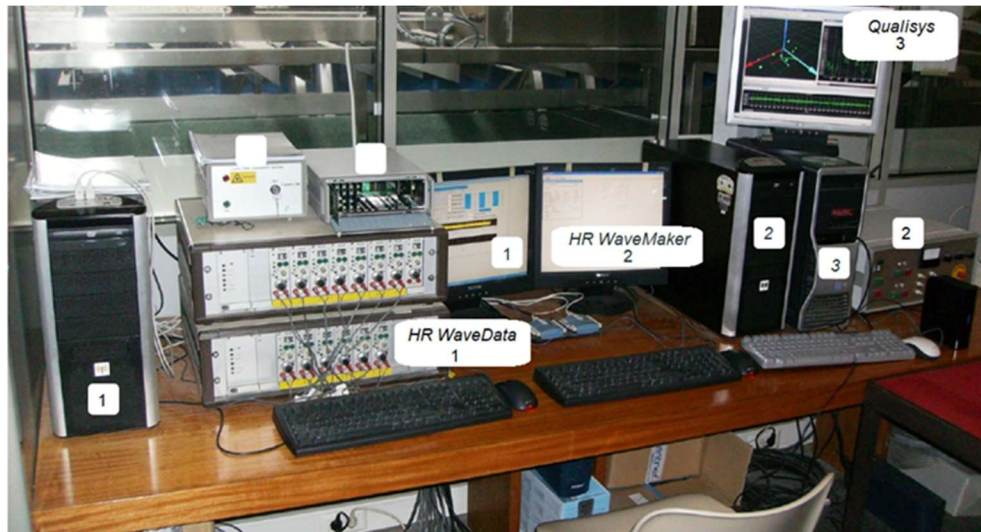


Fig. 67 – Sala de controlo do tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP.

5.3.1. EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

5.3.1.1. Sistema de Aquisição de Agitação Marítima

A medição das condições de agitação marítima produzidas durante a fase experimental é feita através do *software* de aquisição de dados de agitação marítima, *HR WaveData*, que permite medir a diferença de potencial em sondas hidrodinâmicas instaladas na zona de teste, convertendo esses valores em níveis instantâneos de elevação da superfície livre da água, $\eta(t)$.

As sondas de níveis hidrodinâmicos, Fig. 68, instaladas são do tipo resistivo e são constituídas por um par de hastes finas de aço. As suas hastes podem apresentar dois tamanhos: sondas de haste longa (600 mm) e sondas de haste curta (300 mm). A sonda de haste longa foi a utilizada nos ensaios pois permite uma vasta amplitude de medição, e têm um espaçamento entre níveis de 20 mm. As sondas são instaladas em tripés, de maneira a ficarem parcialmente submersas.



Fig. 68 – Sonda de níveis hidrodinâmicos de haste longa (esquerda), unidade de condicionamento do sinal (direita).

Entre os dois condutores circula uma pequena corrente eléctrica, cuja diferença de potencial varia linearmente com o nível instantâneo de água no local onde a sonda está instalada. A diferença de potencial é medida pelo *software* na sala de controlo e a sua leitura é transformada em altura de onda. A unidade de condicionamento do sinal é um sistema modular, e contém toda a electrónica necessária à polarização e ao condicionamento dos circuitos necessários à operação das sondas. Esta unidade pode ser usada por um número máximo de 16 sondas. Antes da sua utilização, as sondas têm que ser adequadamente calibradas.

As leituras das sondas são discretas e realizadas com base numa frequência de aquisição, previamente definida pelo utilizador. No caso em estudo a frequência de aquisição utilizada foi de 40 Hz.

5.3.1.2. Sistema de Aquisição de Movimentos

Para a aquisição dos movimentos experimentados pela bóia foi utilizado o sistema *Qualisys – Motion Capture System*. Este sistema baseia-se em tecnologia de detecção óptica e permite medir os movimentos dos corpos segundo os seis graus de liberdade. Este sistema permite uma medição contínua e à distância, sem contacto físico com o corpo. É constituído três câmaras digitais especiais e por um conjunto de marcas reflectoras de peso reduzido (30 mm de diâmetro) fixas ao corpo cujo movimento se pretende estudar, Fig. 69, e por um *software* de processamento de dados em tempo real – *Qualisys Track Manager* (QTM).

O princípio de funcionamento do sistema consiste em expor as marcas reflectoras instalados no corpo, à luz infra-vermelha emitida pelas câmaras (*Qualisys ProReflex MCU – Motion Capture Unit*), que têm a capacidade de detectar a luz reflectida por essas marcas. É necessário assegurar que cada uma das marcas usadas está no campo de visão de pelo menos duas câmaras. As câmaras são montadas numa associação em série. As imagens captadas por cada câmara são tratadas directamente pelo processador digital instalado na própria câmara, usando um algoritmo que permite a detecção e a determinação da posição de cada uma das marcas no campo de visão dessa câmara. Devido à elevada frequência de aquisição do sistema e à rapidez de processamento dos registos, é possível ter acesso em tempo real aos resultados das medições efectuadas.



Fig. 69 – Câmera *ProReflex MCU* (esquerda), marcas reflectoras (direita).

O *software* QTM, combina a informação bidimensional recebida de cada uma das câmaras determinando o posicionamento de cada uma das marcas no espaço (tridimensional), em cada instante.

Quando se trata da observação de um corpo rígido, como foi anteriormente referido, o movimento do conjunto pode ser decomposto nos movimentos segundo cada um dos seis graus de liberdade. Sendo necessário, para tal, que o corpo rígido esteja definido por três ou mais marcas, com posições fixas entre si (Rosa-Santos, 2010).

O processamento de toda a informação captada pelas várias câmaras permite determinar as características cinemáticas do movimento de um qualquer ponto do modelo físico da bóia (trajectórias, velocidades e acelerações), segundo os seis graus de liberdade existentes, a partir das características cinemáticas do movimento do alvo reflector, fixo rigidamente ao modelo.

5.3.2. CALIBRAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

A calibração das sondas de nível hidrodinâmico é obrigatoriamente realizada com a água parada, e consiste no registo das variações do *output* de voltagem da sonda para diferentes profundidades de imersão, quando esta é elevada ou mergulhada, relativamente ao nível de referência previamente definido (nível “zero”), de um comprimento de valor conhecido. O processo começa pela colocação do sensor na posição média, correspondente ao nível “zero”, ajustando o sinal de voltagem a 0 V, dando a indicação ao *software* de que esta é a posição do nível de referência. Em seguida mergulha-se o sensor até à posição escolhida como positiva, indicando ao sistema o valor dessa deslocação em unidades geométricas; finalmente, utiliza-se a mesma metodologia, elevando o sensor, para definir a posição escolhida como negativa. Fica assim definida uma recta de calibração, Fig. 70, que relaciona o sinal em *volts* lido pela sonda como o nível da água. Este procedimento foi repetido todos os dias antes de se iniciarem os testes. Os orifícios existentes ao longo do suporte da sonda, com um espaçamento fixo de 20 mm (nas sondas de haste longa), facilitam a realização desta tarefa. Após a realização das leituras, a haste da sonda deverá voltar a ser colocada no seu nível de referência (Cabral, 2018).

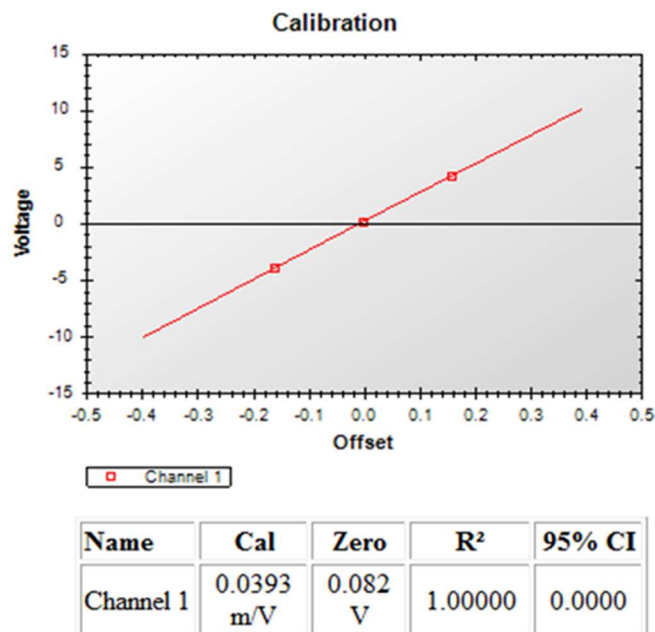


Fig. 70 – Exemplo de uma recta de calibração da sonda de nível hidrodinâmico obtida no estudo experimental.

À semelhança das sondas de níveis hidrodinâmicos, também o sistema *Qualisys* deverá ser calibrado antes da primeira utilização. Para isso é utilizada uma estrutura de referência em forma de “L”, com quatro marcas reflectoras, que é colocada dentro do volume de medição, numa posição fixa que permita definir a origem e a orientação do sistema global de eixos coordenados que será usado pelas câmaras MCU, com o braço maior do “L” a corresponder ao eixo dos xx e o braço menor ao eixo dos yy . E, é também utilizada, uma estrutura móvel, em forma de “T”, com duas marcas reflectoras posicionadas a uma distância fixa uma da outra, que é movimentada, durante o intervalo de tempo em que decorre a calibração, dentro do volume de medição, em todas as direcções e cobrindo o maior volume possível, Fig. 71. (Rosa-Santos, 2010).



Fig. 71 – Instrumentos de calibração do sistema *Qualisys*.

A qualidade da calibração será tanto melhor quanto maior o número de direcções e de posições que a estrutura móvel, em forma de “T”, tomar dentro do volume útil de medição. Nas calibrações efectuadas, o tempo de calibração do sistema foi 120 s.

5.4. MODELO FÍSICO EM ESTUDO

Neste trabalho, inserido numa fase inicial do projecto InanoWEC, foi testado um modelo simplificado hemisférico, Fig. 72, de maneira a preparar terreno para os futuros ensaios com um modelo mais complexo duma bóia real. Este modelo simplificado é feito de plástico resistente e tem um diâmetro de 30 cm e uma altura de 17 cm e um peso de 488 g. Tendo como referencia a bóia escolhida no projecto (SEALITE ATLANTIC 2600) considerou-se que este modelo físico simplificado representa, à escala geométrica 1/20, a bóia real, porque as dimensões do calado (0.86 m em protótipo) e o período natural para o modo de oscilação de balanço, a essa escala, aproximam-se das projecções iniciais dos valores da bóia real fornecidas pelo INEGI.



Fig. 72 – Modelo simplificado.

A amarração do modelo simplificado é metálica. Devido ao seu peso linear, esta amarração funciona pelo peso próprio, assumindo o perfil em catenária, Fig. 61. Foi utilizada uma corrente, sem estais, soldada, de elo curto, com 2 mm de espessura, com 1.5 m de comprimento, Fig. 73.



Fig. 73 – Pormenor da amarração do modelo simplificado.

O conjunto de características técnicas desta bóia (protótipo) SEALITE ATLANTIC 2600, Fig. 74 pode ser analisado no anexo A da presente dissertação.



Fig. 74 – Fotografia da bóia SEALITE ATLANTIC 2600.

Importa referir que estudo experimental estaria inicialmente pensado para se fazer com um modelo “real” da bóia oceânica SEALITE ATLANTIC 2600 construído pelo INEGI a uma escala geométrica previamente seleccionada de 1/8, a partir de representações tridimensionais da forma do casco da bóia real fornecidas pela empresa SEALITE. Devido a um atraso no fornecimento destes dados, por parte da empresa SEALITE, foi decidido avançar no estudo com o modelo simplificado. Os materiais e as técnicas construtivas empregues na construção do modelo “real” dependem das suas dimensões e das condições de utilização previstas. A reprodução das propriedades de massa da bóia pode tornar-se difícil dada a dificuldade prática de construir um modelo suficientemente leve que permita a posterior colocação (e arrumação) no seu interior do sistema TENG, que vai afectar quer o posicionamento do centro de gravidade, quer as propriedades de inércia da bóia.

Para a correcta reprodução das características oscilatórias da bóia no modelo físico, a geometria do seu casco terá de ser reproduzida de forma rigorosa, condição essencial para que as forças hidrodinâmicas exercidas sobre o modelo da bóia sejam reproduzidas segundo a semelhança de *Froude*. Além disso, o modelo da bóia, como foi anteriormente mencionado, deve apresentar uma distribuição de massas equivalente à da bóia oceânica real, para a condição de carga seleccionada (Rosa-Santos, 2010).

5.4.1. VERIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO MODELO

Na presente dissertação, procurou-se dar prioridade ao estudo do comportamento do TENG perante ondulação, sendo apenas necessário um objecto estanque capaz de o conter, para o efeito – *i.e.* um modelo físico simplificado. Foi escolhido um modelo aproximadamente hemisférico, e axissimétrico, pela sua simplicidade (num corpo axissimétrico o movimento de balanço é igual ao movimento de cabeceio), e para garantir qualidades hidrodinâmicas e pela sua semelhança com o casco do protótipo em questão.

Para se verificar as propriedades do modelo simplificado foram realizados, inicialmente, ensaios de decaimento livre (ensaios sem ondas). Estes ensaios foram elaborados num pequeno tanque, Fig. 75, com 1.0 m de comprimento, 0.6 m de largura e 0.5 m de altura, com o modelo simplificado livre.



Fig. 75 – Modelo simplificado no pequeno tanque onde foram realizados os ensaios de extinção.

Começou-se pela experiência de inclinação transversal para o modelo simplificado sem o peso de lastro. A experiência consiste em deslocar horizontalmente um dado bloco de peso - P , Fig. 76, incluído no deslocamento total do modelo e com o seu centro de gravidade aproximadamente coincidente com o do modelo da bóia carregada, e determinar uma certa distância a segundo a direcção transversal a bóia. Com esse dado a altura metacêntrica do modelo simplificado da bóia pode ser calculada com base na equação (92). Esta equação resulta do equilíbrio de momentos das massas (modelo da bóia e bloco) relativamente ao eixo longitudinal de rotação do modelo e pressupõe que o ângulo de inclinação deste, por aplicação do bloco, seja pequeno (Rosa-Santos, 2010).

$$\overline{GM}_t = \frac{P b l}{W a} \quad (92)$$

Em que W representa o peso da bóia, P o peso do bloco utilizado na experiência de inclinação transversal do modelo, b a distância que esse bloco é deslocado, medida transversalmente ao eixo longitudinal central da bóia, l a distância do ponto de referência utilizado na determinação da variação da inclinação transversal da bóia por aplicação do bloco, medida transversalmente ao eixo longitudinal central da bóia, e a o deslocamento vertical desse ponto de referência.

Nas condições da equação anterior, temos que: a massa do modelo simplificado é igual a 0.472 kg (peso de 4.629 N) e o bloco cubico azul, que tem 0.025 m de aresta, tem uma massa de 0.042 kg (peso de 0.412 N) a barra a vermelho tem 0.35 m de comprimento, Fig. 76, logo l é igual a 0.175 m e b é igual a 0.1625 m. A medição do ângulo de inclinação transversal, θ , permite a posterior determinação de a .

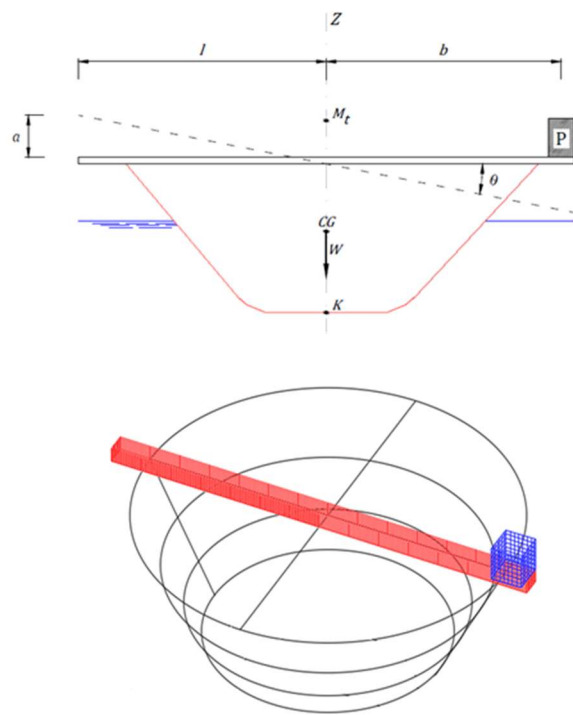


Fig. 76 – Representação esquemática da experiência de inclinação transversal.

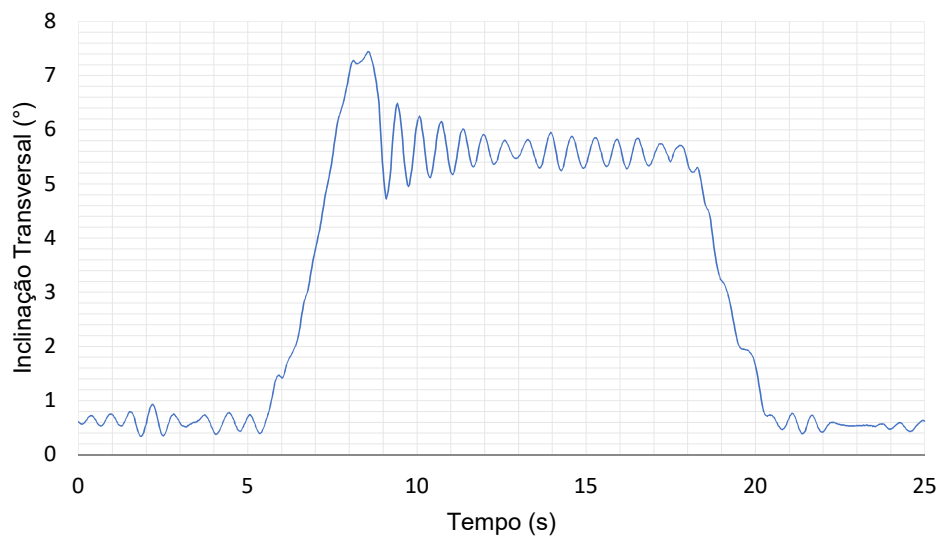


Fig. 77 – Variação da inclinação transversal do modelo simplificado.

Tabela 5 – Resultados da experiência da inclinação transversal.

Carga			Descarga		
P (N)	θ (°)	$\Delta\theta$ (°)	P (N)	θ (°)	$\Delta\theta$ (°)
0.000	0.5		0.412	5.5	
0.412	5.5	5.0	0.000	0.5	5.0
$\Delta\theta_f = 5.0^\circ$			$\Delta\theta_f = 5.0^\circ$		

Assim, o deslocamento vertical do ponto de referência a é 0.0153 m e aplicando a equação (92) resulta uma altura metacêntrica igual a 0.1653 m.

Após ter sido concluído o ensaio para a determinação da altura metacêntrica, foram feitos mais alguns ensaios de decaimento livre que permitem determinar os períodos naturais de oscilação de balanço e arfagem, bem como as curvas de decaimento para ambas as oscilações. Tal como no ensaio anterior, o modelo simplificado foi mantido no pequeno tanque, sem ondas, com uma altura de água de 0.45 m.

O período de oscilação natural de um corpo pode ser definido como o intervalo de tempo decorrido entre o início e o fim de um ciclo completo de movimento oscilatório livre do corpo, para cada grau de liberdade. Quando se dispõe de um registo do movimento em função do tempo, o período pode ser facilmente encontrado contando o tempo entre o início e o fim do registo e o número de ciclos existente. Dividindo estes dois dados, obtém-se o valor médio do período natural de oscilação. Assim, foi aplicado um ligeiro deslocamento ao modelo (afundou-se ligeiramente, no estudo do movimento em arfagem, e inclinou-se ligeiramente, no estudo do movimento em balanço) e soltou-se em seguida. Após a libertação do corpo, gerou-se um movimento oscilatório livre (vertical ou de rotação). Este movimento do corpo foi registado até à extinção através do sistema de aquisição de movimentos *Qualisys* (Fig. 78 e Fig. 79).

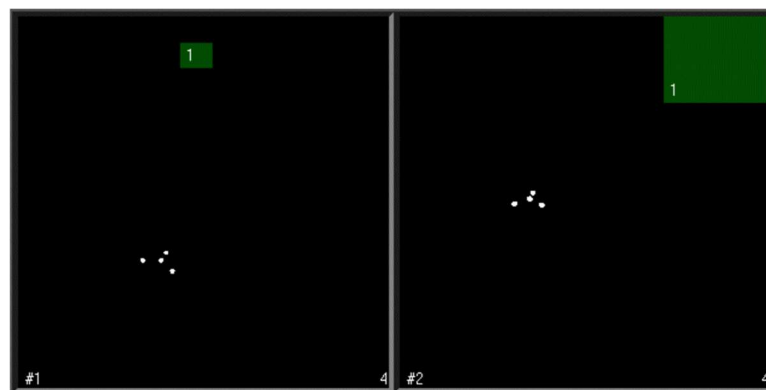


Fig. 78 – Vista em 2D da Câmera #1 e #2 do modelo simplificado, *software* QTM.

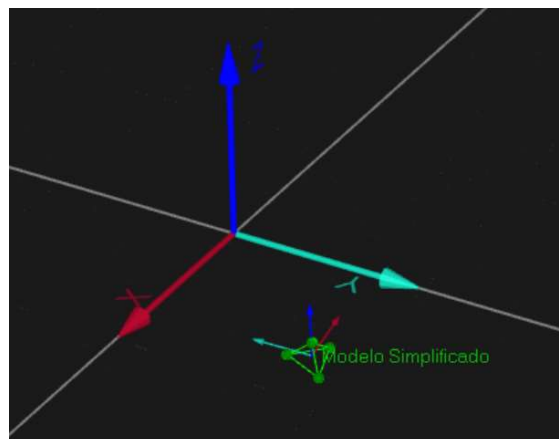


Fig. 79 – Vista em 3D do modelo simplificado, *software* QTM.

De forma a confirmar a análise do registo, optou-se, também, por se fazer um tratamento do mesmo por transformadas de *Fourier* (*Fast Fourier Transform* - FFT), recorrendo à folha de cálculo *Excel*, utilizando uma largura da banda espectral conveniente. Como resultado, obtém-se um espectro em que a frequência de pico é a frequência de oscilação natural.

Este método de análise apresenta algumas vantagens: ao decompor o movimento em várias frequências, permite determinar aquela com mais influência no movimento do corpo (frequência de oscilação natural) e filtrar as restantes, devidas a movimentos noutros graus de liberdade, instabilidades, oscilações de longo período eventualmente existentes no tanque, oscilações devidas a movimentos do próprio corpo no tanque, perturbações devidas ao operador, etc. Como desvantagem do método salienta-se o facto de o número de pontos a analisar ter de ser uma potência de dois, o que pode levar a que, para se obter um número de pontos adequado a ser analisado, parte dos pontos tenha que ser descartada. Além disto, as frequências componentes do espectro serão apenas múltiplas, ou submúltiplas, da frequência de aquisição.

A redução da amplitude dos movimentos do modelo simplificado ao longo do tempo – curva de decaimento – foi utilizada para, posteriormente, determinar o amortecimento. Assim, para cada grau de liberdade relevante para este estudo (arfagem e balanço) foram realizados múltiplos ensaios. Este período natural medido é comparado ao período natural previsto.

O período natural do modo de oscilação de balanço previsto para o modelo, T_R , depende, quer da altura metacêntrica transversal, quer do raio de giração da bóia relativamente ao seu eixo longitudinal central e pode ser determinado com base na equação (65).

A Fig. 80 apresenta a variação da amplitude das oscilações de balanço do modelo simplificado. O cálculo do período natural de balanço é efectuado apenas para a fase correspondente ao amortecimento natural dessas oscilações. A Fig. 81 apresenta o espectro de variância estimado para o modo de oscilação de balanço, obtido para uma janela de dados de 128 pontos.

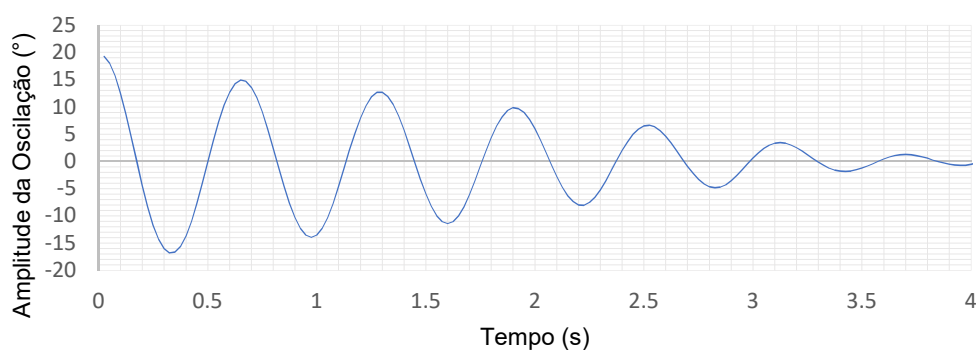


Fig. 80 – Amplitude da oscilação de balanço do modelo simplificado.

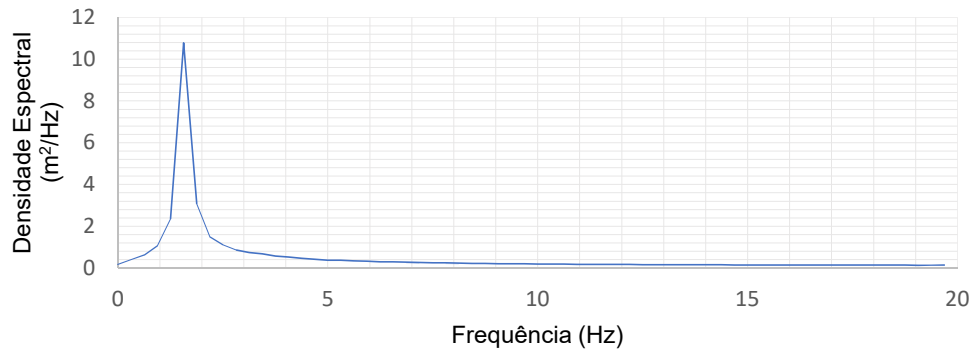


Fig. 81 – Espectro resultante da análise de *Fourier*, para a oscilação de balanço do modelo simplificado.

Após concordância entre os valores de T_R medidos no modelo e previstos (através das fórmulas), a altura metacêntrica transversal foi confirmada. A verificação das propriedades do modelo simplificado segundo a direcção transversal dá-se por concluída quando, quer a altura metacêntrica transversal, quer o período natural da oscilação de balanço, estão correctamente reproduzidos.

Como foi anteriormente mencionado, os resultados das experiências de determinação do período natural da oscilação de balanço, permitem também calcular o “decréscimo logarítmico” das oscilações de balanço. Este parâmetro relaciona-se com o amortecimento natural dessas oscilações e foi determinado ajustando às amplitudes máximas e mínimas de um conjunto de observações de oscilações sucessivas de balanço, uma função exponencial do tipo:

$$(t) = \pm A_0 e^{-\lambda t} \quad (93)$$

$$\delta = \lambda T_R \quad (94)$$

Em que $A(t)$ representa as curvas de decaimento da amplitude das oscilações de balanço (máxima ou mínima), A_0 a amplitude inicial dessas oscilações, λ uma constante, t a variável tempo e δ o decréscimo logarítmico das oscilações de balanço.

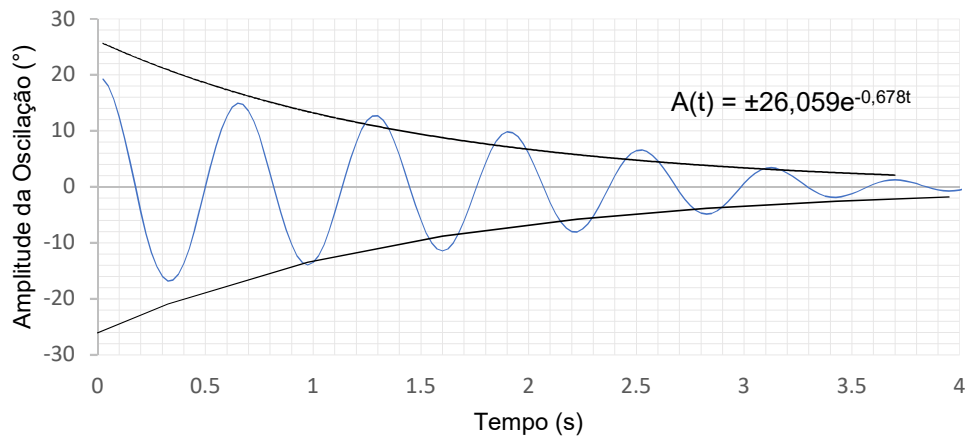


Fig. 82 – Curva de decaimento para a oscilação de balanço do modelo simplificado.

O período natural do modo de oscilação de arfagem do modelo, T_H , depende, quer da massa adicionada segundo o modo de oscilação de arfagem em fase com a aceleração dessa oscilação, como do peso volúmico da água e da área da bóia no plano de água, e pode ser determinado com base na equação (73).

A Fig. 83 apresenta a variação da amplitude das oscilações de arfagem do modelo simplificado. O cálculo do período natural de balanço é efectuado apenas para a fase correspondente ao amortecimento natural dessas oscilações. A Fig. 84 apresenta o espectro de variância estimado para o modo de oscilação de arfagem, obtido para uma janela de dados de 512 pontos.

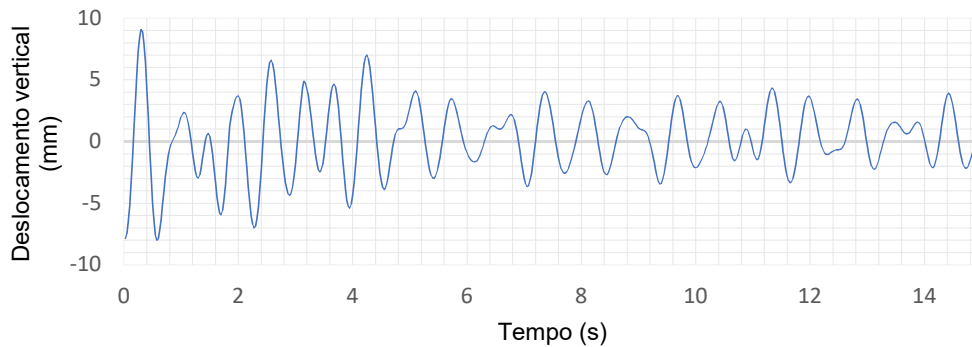


Fig. 83 – Amplitude da oscilação de arfagem do modelo simplificado.

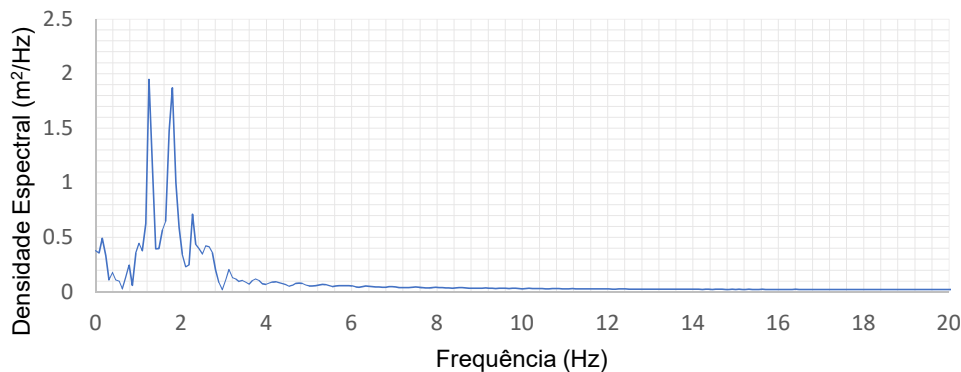


Fig. 84 – Espectro resultante da análise de *Fourier*, para a oscilação de arfagem do modelo simplificado.

O ensaio para a determinação do período natural de oscilação do modo de arfagem foi desprezado devido ao elevado erro associado às reflexões causadas pela pequena dimensão do tanque. Não voltaram a ser feitos ensaios deste tipo, neste pequeno tanque, devido a esse erro que seria sempre recorrente. A Tabela 6 e a Tabela 7 apresentam a síntese dos resultados obtidos na experiência de determinação do período natural da oscilação de balanço e arfagem, respectivamente para o modelo simplificado sem a adição do peso de lastro e sem o TENG.

Tabela 6 – Resultados da experiência de determinação do período natural da oscilação de balanço (apenas modelo simplificado).

Método	Balanço (<i>Roll</i>)			
	Modelo (esc. 1/20)		Protótipo (esc. 1/1)	
	T (s)	F (Hz)	T (s)	F (Hz)
Previsto	0.740	1.35	3.310	0.302
Medido – Gráfico das oscilações	0.627	1.60	2.804	0.357
Medido – Análise de <i>Fourier</i>	0.640	1.56	2.862	0.349
Erro	13.53%			

Tabela 7 – Resultados da experiência de determinação do período natural da oscilação de arfagem (apenas modelo simplificado).

Método	Arfagem (<i>Heave</i>)			
	Modelo (esc. 1/20)		Protótipo (esc. 1/1)	
	T (s)	F (Hz)	T (s)	F (Hz)
Previsto	0.428	2.338	1.912	0.523
Medido – Gráfico das oscilações	-	-	-	-
Medido – Análise de <i>Fourier</i>	0.800	1.250	3.578	0.280
Erro	87.08%			

Estes ensaios iniciais permitiram concluir que o período natural da oscilação de balanço do modelo simplificado (2.86 s no protótipo) é inferior ao esperado, uma vez que se pretendia alcançar valores para período natural de oscilação na ordem dos 3.0 – 4.0 s. Assim, para se conseguir aproximar o modelo simplificado do protótipo é necessário aumentar o período natural da oscilação de balanço. Através da equação (65) conclui-se que, para aumentar o período de oscilação natural de balanço, podemos diminuir a altura metacêntrica. No entanto, é necessário ter em atenção que essa alteração poderá causar instabilidade no modelo simplificado. Colocando um peso de lastro no modelo simplificado numa posição elevada, o raio de giração transversal mantém-se constante e o centro de gravidade do corpo sobe o que diminui a altura metacêntrica. Foram assim repetidos os vários ensaios utilizando o modelo simplificado com a adição de um peso de lastro. Após terem sido tentadas várias configurações, Fig. 85, com diferentes formas e pesos, foi obtida uma configuração com o período do modo de oscilação de balanço medido entre os valores desejados. A configuração final escolhida, configuração (c), tem o peso de 377 g. Foram repetidas as experiências de determinação do período natural do modo de oscilação de balanço, no tanque pequeno, desta vez com o modelo simplificado com o peso de lastro adicionado para confirmar o valor previsto. A síntese de resultados da experiência pode ser consultada na Tabela 8.



Fig. 85 – Fotografia das diferentes configurações do lastro do modelo simplificado: (a) configuração 1; (b) configuração 2; (c) configuração final.

A Fig. 86 apresenta a variação da amplitude das oscilações de balanço do modelo simplificado com o peso de lastro para a configuração final (c). O cálculo do período natural de balanço é efectuado apenas para a fase correspondente ao amortecimento natural dessas oscilações. A Fig. 87 apresenta o espectro de variância estimado para o modo de oscilação de balanço, obtido para uma janela de dados de 512 pontos.

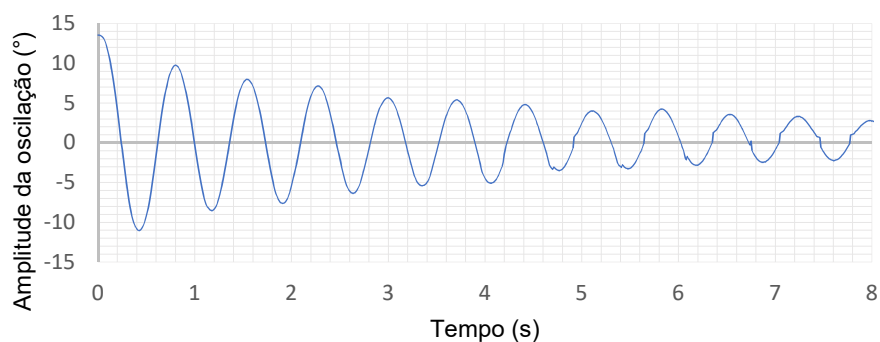


Fig. 86 – Amplitude da oscilação de balanço do modelo simplificado com o peso de lastro adicionado.

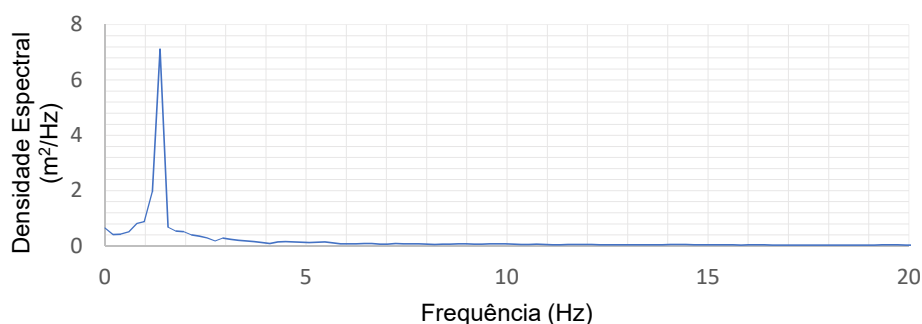


Fig. 87 – Espectro resultante da análise de *Fourier*, para a oscilação de balanço do modelo simplificado com o peso de lastro adicionado.

Tabela 8 – Resultados da experiência de determinação do período natural da oscilação de balanço (modelo simplificado com peso de lastro).

Método	Balanço (<i>Roll</i>)			
	Modelo (esc. 1/20)		Protótipo (esc. 1/1)	
	T (s)	F (Hz)	T (s)	F (Hz)
Previsto	0.743	1.345	3.325	0.301
Medido – Gráfico das oscilações	0.727	1.376	3.251	0.308
Medido – Análise de <i>Fourier</i>	0.731	1.367	3.271	0.306
Erro	1.62%			

5.4.2. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA TENG

O sistema TENG em estudo foi desenvolvido pela i.nanoE e é baseado no modo de operação por contacto e consiste num paralelepípedo totalmente fechado com dimensões aproximadas de

$15 \times 14 \times 6 \text{ cm}^3$, e um pequeno comando (*Datalogger*), anexo, que contém o sistema de aquisição e a bateria, Fig. 88. Inicialmente o sistema completo (*TENG* + sistema de aquisição + bateria) tinha uma massa de 305 g, apenas o *TENG* tinha uma massa de 203 g.

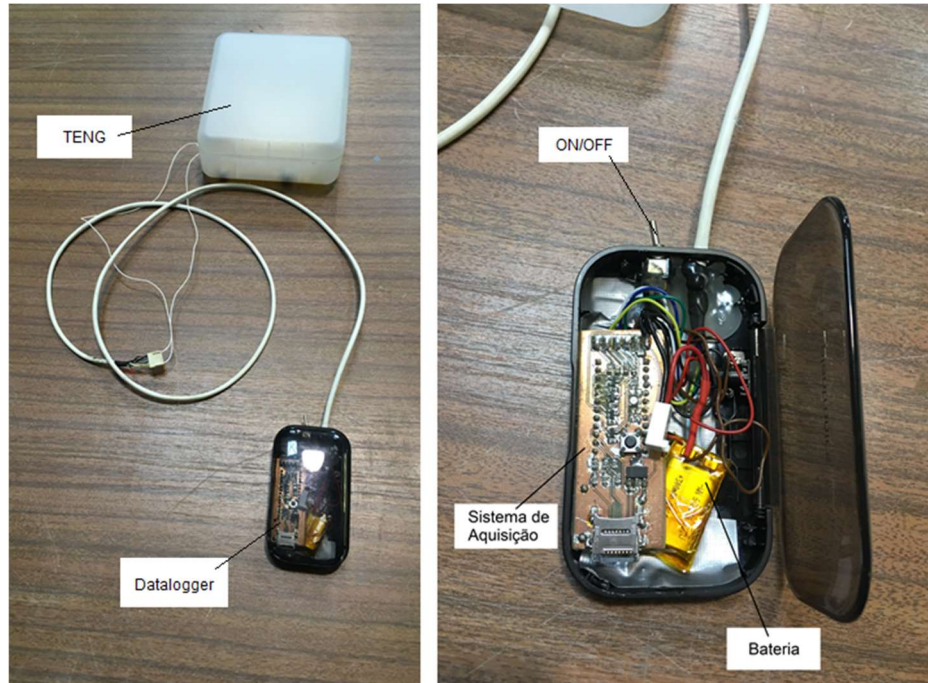


Fig. 88 – Fotografia do sistema completo: *TENG* + *datalogger* (esquerda) e pormenor do *datalogger*: sistema de aquisição + bateria (direita).

O *TENG*, Fig. 92, é composto por 13 esferas de aço com um diâmetro de 1.1 cm, com 10 g de massa, que se movem livremente numa superfície nivelada dentro do paralelepípedo, e por duas camadas triboelectricas distintas. Quando as duas superfícies entram em contato, devido ao rolamento das esferas sobre a camada superior, uma superfície perde a carga enquanto a outra a ganha. Quando os dois materiais se separam, as superfícies de contato têm potenciais elétricos diferentes pelo desequilíbrio das cargas elétricas, havendo troca de carga entre os dois materiais, o que leva a que um fluxo de corrente elétrica se forme. Quanto maior for a área de contacto, maior será a energia gerada. Não há uma frequência de ressonância, mas as frequências de teste típicas situam-se entre 0.1 e 5 Hz. O sistema de aquisição (*datalogger*) mede a tensão gerada em função do tempo com uma frequência de aquisição de 600 Hz.

O sistema *TENG* necessita de estar fixo, centrado e nivelado dentro do modelo simplificado, para evitar movimentos do sistema no interior do modelo simplificado, que possam causar qualquer interferência no rolamento das esferas. Assim sendo, foram usadas diferentes camadas de esferovite, como se pode observar na Fig. 89, para impedir quaisquer movimentos do sistema no interior do modelo simplificado.

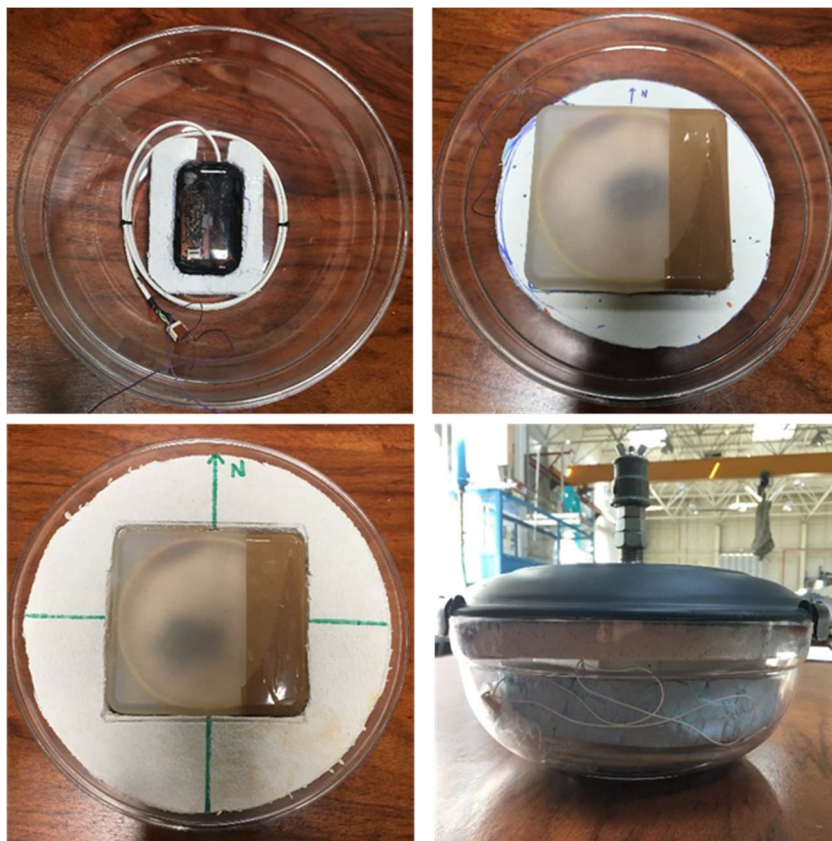


Fig. 89 – Arranjo do sistema *TENG* no interior do modelo simplificado.

Após alguns testes iniciais em tanque de ondas concluiu-se que a configuração inicial do TENG necessitava de algumas optimizações. Entre os problemas encontrados, destacam-se:

- O facto do nano-material não estar bem "esticado" dificultava o rolamento das esferas sobre o mesmo. Como as esferas tendem a seguir o caminho que oferece menos resistência evitavam passar sobre o nano-material, rolando ao invés à volta por onde não havia camada triboelétrica;
- Devido à sua configuração plana, acrescida ao defeito anterior, as esferas tendiam a ficar em repouso junto às paredes laterais do paralelepípedo onde não existia camada de nano-material. Esta dissimetria na distribuição de massas, era suficiente para que o modelo simplificado, imerso no tanque, em repouso, apresentasse uma ligeira inclinação, Fig. 90. Previu-se que para ondas com períodos elevados, as amplitudes das oscilações do modelo não seriam suficientes para modificar essa posição inicial das esferas, e o modelo manter-se-ia sempre na mesma posição inclinada, não havendo rolamento das esferas e, por isso, produção de energia.



Fig. 90 – Fotografia da inclinação apresentada pelo modelo simplificado para a configuração inicial do TENG.

Devido aos motivos mencionados, foi necessário promover uma alteração no *design* inicial do TENG, Fig. 92. Foi acrescentada uma peça côncava no interior do paralelepípedo, Fig. 91, que assegura que as esferas, em repouso, tendem sempre para o centro deste. A peça foi feita numa impressora 3D e possui um diâmetro de 14 cm e uma altura de 1 cm. Esta alteração não só minimiza o problema da inclinação do modelo simplificado como maximiza a produção de energia uma vez que aumenta o tempo de rolamento das esferas sobre o nano-material. Teve-se também o cuidado adicional, na disposição das camadas de nano-material sobre a peça côncava, que estas ficassem o mais possível “esticadas”, evitando quaisquer pregas que adicionassem resistência ao rolamento das esferas. Esta nova peça adicionou 77 g ao TENG, ficando todo o sistema (TENG + sistema de aquisição + bateria) com uma massa de 379 g.

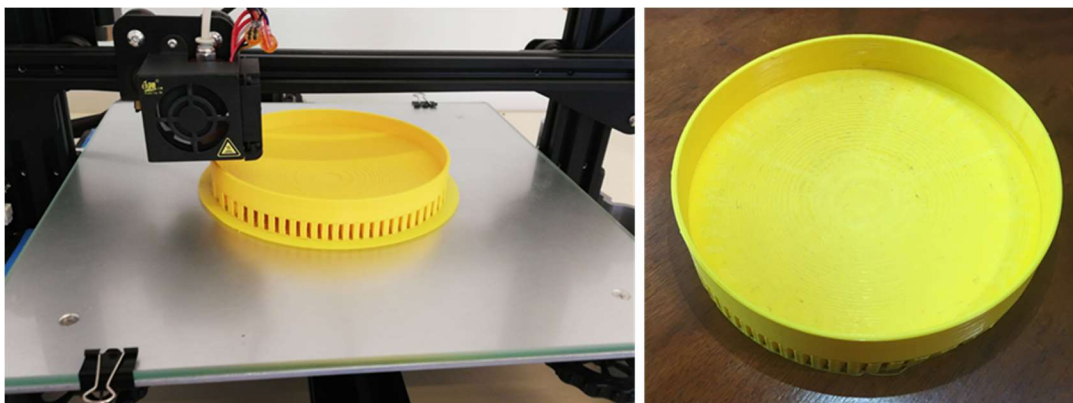


Fig. 91 – Impressão da peça côncava (esquerda) e peça côncava já completa (direita).



Fig. 92 – *Design* inicial do TENG (esquerda) e *design* final do TENG após as alterações mencionadas (direita).

5.4.3. SETUP E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O tanque de ondas foi dividido em duas partes, sendo que uma dessas partes (canal com 1.7 m de largura) foi utilizada num outro ensaio, não relacionado, restando assim 10.3 m de largura de tanque de ondas para os ensaios com o modelo simplificado. A separação do tanque de ondas foi feita através de divisórias, que foram mantidas na sua posição com cilindros de betão de peso elevado, de forma a prevenir que estas se movimentassem durante os testes por efeito da agitação marítima gerada. Para facilitar os ensaios, minimizando a perturbação da água, decidiu-se incluir uma ponte no *setup*, Fig. 64. A ponte permite a manipulação do modelo simplificado e da sonda de nível hidrodinâmico sem entrar dentro do tanque, ganhando tempo ao longo dos ensaios e facilitando a utilização dos equipamentos. Assim sendo, foi necessário que tanto a sonda de nível hidrodinâmico como a âncora da amarração do modelo simplificado estivessem dentro do alcance de uma pessoa que esteja na ponte, ficando cada uma a 50 cm, para a esquerda e para a direita da ponte, respectivamente, Fig. 93. As três câmeras do *Qualisys* foram posicionadas num andar superior, sobre o modelo simplificado.

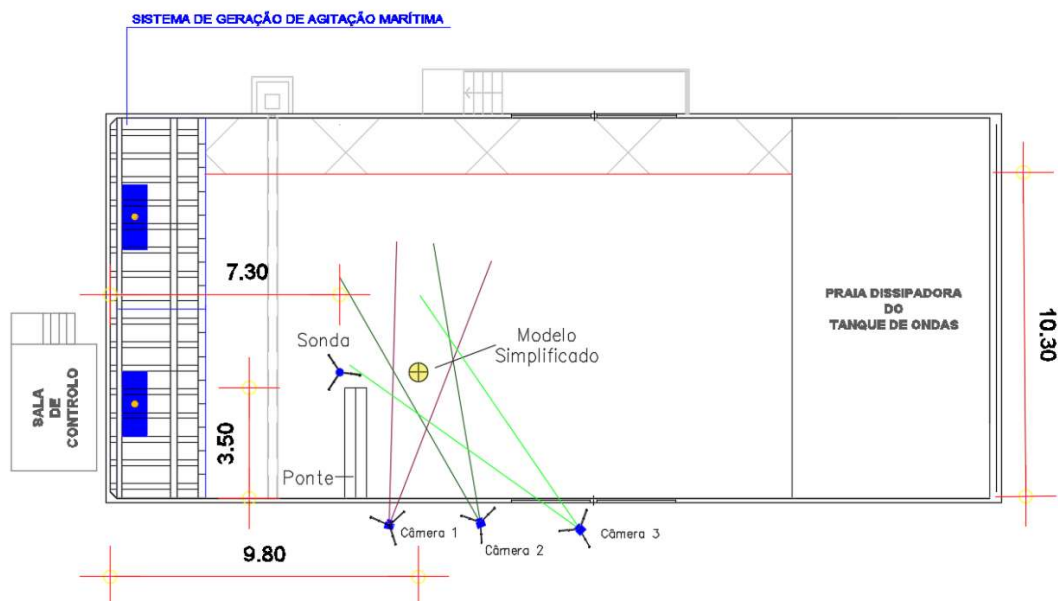


Fig. 93 – Esquema do *setup* experimental.

O procedimento experimental contém os seguintes passos:

- Verificar se o nível de água dentro do tanque de ondas corresponde ao pretendido, devido às variações devido à evaporação, fugas ou entrada de água indesejada no tanque;
- Calibração do sistema *Qualisys*, efectuada antes de se iniciar os ensaios;
- Calibração da sonda de níveis hidrodinâmicos, efectuada todos os dias antes de se iniciar os ensaios;
- Sequência de iniciação do sistema de geração de ondas;
- Calibração dos factores de ganho e procedimentos iniciais;
- Início do ensaio, começando pela geração de agitação, e de seguida a aquisição de dados pela sonda de nível hidrodinâmico e pelo *Qualisys*;
- Finalizado cada ensaio, e antes de realizar o seguinte, espera-se que a superfície livre da água volte ao estado de repouso total, evitando assim que a geração de ondas do ensaio seguinte seja comprometida por reflexões ou perturbações indesejadas.

Importa referir que, para se ajustar as compensações e os factores de ganho, calibrando o sistema de geração de agitação *WaveMaker*, deve-se escolher todas as variáveis relevantes relacionadas com as condições em estudo, tais como o período da onda, a altura significativa da onda, o tipo de onda e o espectro. Depois de um teste inicial com aquisição de dados por parte da sonda de níveis hidrodinâmicos é que se pode comparar os resultados obtidos com o que era esperado, e introduzir (se necessário) os ajustes finais – o factor de ganho, com o objectivo de que o *software* reproduza as ondas como pretendido, com mínimas discrepâncias.

5.5. PLANO DE ENSAIOS

Foi elaborado um plano de ensaios tendo em vista a posterior análise da resposta do modelo simplificado e TENG à ondulação gerada. A definição do plano foi baseada numa série de parâmetros: o tipo de agitação marítima (regular ou irregular); os períodos naturais de oscilação obtidos anteriormente, procurando reproduzir de forma precisa cenários de quase ressonância, as condições de agitação marítima de um possível local de implementação da bóia de navegação, os períodos de onda, com o objectivo de determinar a curva do factor de amplificação dinâmica, a altura de onda, e por fim, a altura de água no tanque de ondas.

Assim, numa fase inicial do estudo, foram feitos ensaios onde foi gerada agitação regular, para uma variada gama de períodos de onda, escolhidos tendo em conta o período natural do modo de oscilação de balanço do modelo simplificado. Estes testes, por um lado, proporcionariam um controlo de fundo das condições ressonantes a reproduzir para tentar maximizar o potencial enérgico do TENG, por outro lado permitem determinar a curva do factor de amplificação dinâmica experimental através das frequências que geram respostas mais acentuadas do corpo (em cada um dos seus graus de liberdade) e dos valores medidos pela sonda de nível.

Numa segunda fase do estudo, foram realizados ensaios com ondas irregulares, uma vez que este tipo de agitação é uma representação mais realista das condições marítimas e fluviais. Para isso, foi necessário estudar as condições de agitação marítima de um possível local de implementação *offshore* da bóia de navegação SEALITE ATLANTIC 2600. Neste estudo, foram reproduzidas as condições de agitação marítima características da costa oeste portuguesa. O plano de ensaios foi definido tendo por base os registos de uma bóia ondógrafo *offshore* instalada ao largo do Porto de Leixões, no ponto L (bóia de Leixões), Fig. 94, ao longo dum período de cerca de 10 anos (2004-2013) (LNEC, 2017). Foram

analisadas as distribuições das alturas de onda significativas, e os respectivos períodos de onda mais frequentes e a média de todos os registos obtidos.

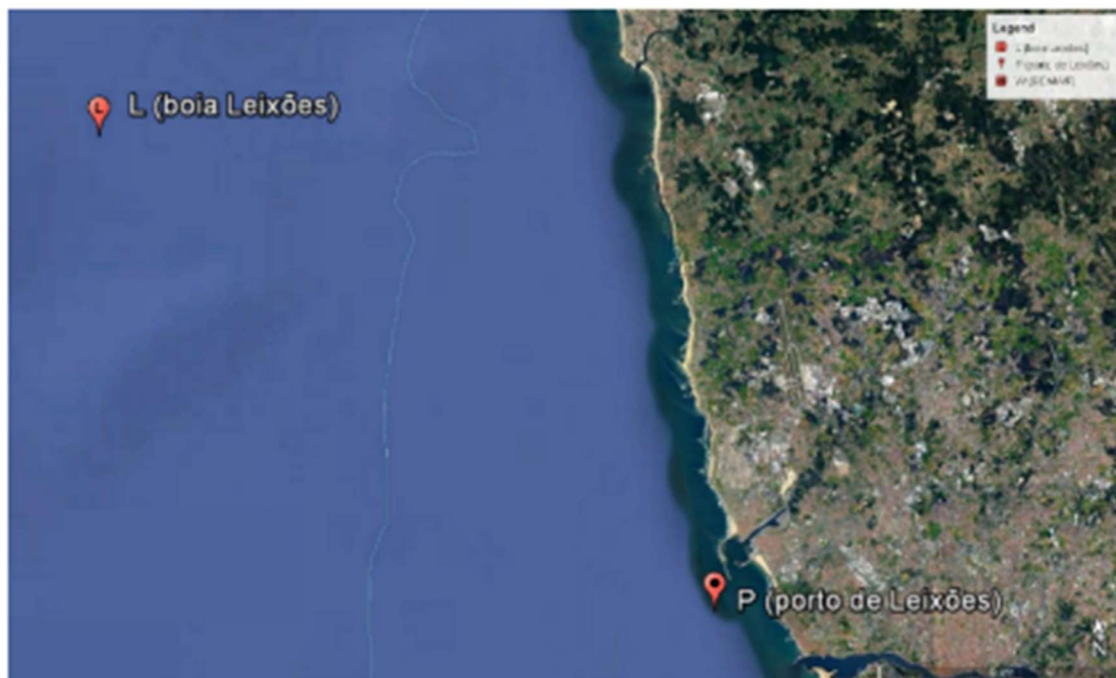


Fig. 94 – Localização da bóia de Leixões (ponto L) (LNEC, 2017).

Importa referir que H_s representa a altura de onda significativa (média do terço mais elevado das alturas de onda que foram registadas durante o período de observação), T_p o período de pico (período correspondente à banda de frequência com o máximo valor de densidade espectral), T_z representa o período médio (média dos períodos observados no registo) e T_e o período energético. Como no presente estudo, a agitação marítima foi definida com base numa forma espectral de JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*) com um factor de forma igual a 3.3. A relação entre os períodos de onda característicos T_e , T_p e T_z , é dada por:

$$1.12 T_e = 1.29 T_z = T_p \quad (95)$$

Com base nos registos de agitação marítima ao largo do porto de Leixões, Fig. 95, medidos na bóia ondógrafo, no período referido anteriormente (10 anos, embora com falhas), apresenta-se na Tabela 9 a estatística das séries totais da altura de onda significativa, H_s , e do período de onda médio, T_z .

H _s (m)	Largo. Distribuição conjunta de H _s -T _z . Dados da boia de Leixões (ponto L)																	
9.5																		
8.5																		
7.5																		
6.5																		
5.5																		
4.5									1%	1%								2%
3.5								1%	2%	3%	2%	1%						9%
2.5						3%	5%	6%	5%	3%	1%	1%						24%
1.5					4%	14%	13%	9%	5%	2%	1%							48%
0.5					3%	5%	4%	2%	1%									15%
T _p (s)	0.6	1.9	3.2	4.5	5.8	7.1	8.4	9.7	11.0	12.3	13.5	14.8	16.1	17.4	18.7	20.0	21.3	22.6
T _z (s)	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5
					7%	22%	23%	19%	15%	8%	3%	1%						

Fig. 95 – Distribuição conjunta de H_s, T_z e T_p. Dados da bóia de Leixões (ponto L) (LNEC, 2017).Tabela 9 – Estatísticas das series totais de H_s e T_z, com base em dados medidos pela bóia de Leixões (LNEC, 2017).

Parâmetros	H _s (m)	T _z (s)
Média	1.92	7.10
Desvio Padrão	1.02	1.70
Mínimo	0.28	3.10
Máximo	8.82	14.69
Número de Registos	12150	12150

Por outro lado, como o protótipo em estudo é uma bóia de navegação (SEALITE ATLANTIC 2600) e, como uma grande parte das bóias de navegação se localizam em rios (*e.g.* portos, canais e foz de rios), e como se verifica que o período das ondas nesses locais poderá ser, por vezes, próximo do período natural de oscilação do modelo simplificado, potenciando a produção de energia do TENG, considerou-se pertinente fazer uma análise adicional das condições de agitação fluvial. Essa ondas podem ser geradas pela acção do vento e pela passagem de embarcações.

Assim sendo, o plano de ensaios, referente às condições de agitação fluvial, foi baseado num estudo de Gomes (Gomes, 2014) dessas mesmas condições na albufeira da barragem de Crestuma-Lever, localizada no rio Douro. A escolha da albufeira de Crestuma-Lever deveu-se a esta apresentar uma grande massa de água que está exposta às acções do vento e por se verificar uma significativa circulação de embarcações, quer para montante, quer para jusante da barragem.

Nesse estudo, Gomes aplicou diferentes metodologias paramétricas, Fig. 96, para avaliar a altura de onda significativa (H_s) gerada pela acção do vento e o período de onda associado (T_s). Esta avaliação foi feita para um local central da albufeira da barragem, através de parâmetros conhecidos: a velocidade do vento, o *fetch*, a profundidade da água e a direcção do vento. Aplicando as metodologias, Gomes (2014) chegou aos valores apresentados na Tabela 10.

Hasselman et al.(1976)	$\frac{g H_{m0}}{U_A^2} = 1.6 \times 10^{-3} \left(\frac{g F}{U_A^2} \right)^{\frac{1}{2}}$ $T_m = 6.238 \times 10^{-2} \left(\frac{g H_{m0}}{U_A^2} \right)^{\frac{1}{2}}$
Sverdrup-Munk-Bretschneider (SMB)	$\frac{g H_s}{U_{10}^2} = 0.283 \tanh \left(0.0125 \left(\frac{g F}{U_{10}^2} \right)^{0.42} \right)$ $\frac{g T_s}{U_{10}^2} = 7.54 \tanh \left(0.077 \left(\frac{g F}{U_{10}^2} \right)^{0.25} \right)$ $\frac{g t_{min}}{U_{10}} = 0.00183 \exp \left((0.0161m^2 - 0.3692m + 2.2024)^{\frac{1}{2}} + 0.8798m \right)$
Bhomwik (1976)	$\frac{g * H_s}{U^2} = 3.23 * 10^{-3} * \left(\frac{g * F}{U^2} \right)^{0.435}$
Demirbilek, Bratos e Thompson (1993)	$\frac{g * H_{m0}}{U_A^2} = 4.13 * 10^{-2} * \left(\frac{g * F}{U_A^2} \right)^{\frac{1}{2}}$ $\frac{g * T_p}{U_A} = 0.751 * \left(\frac{g * F}{U_A^2} \right)^{\frac{1}{2}}$
Wilson (1965)/Goda(2003)	$\frac{g * H_s}{U_{10}^2} = 0.3 * \left(1 - \left(1 + 0.004 * \left(\frac{g * F}{U_{10}^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{-2} \right)$ $\frac{g * T_s}{U_{10}} = 8.61 * \left(1 - \left(1 + 0.008 * \left(\frac{g * F}{U_{10}^2} \right)^{\frac{1}{3}} \right)^{-5} \right)$
Kahma e Calkoen (1992)	$\frac{g * H_s}{U_{10}^2} = A * \left(\frac{g * F}{U_{10}^2} \right)^B$ $\frac{g * T_s}{U_{10}} = C * \left(\frac{g * F}{U_{10}^2} \right)^D$
Saville(1954)/Carlson e Sayre(1961)	$\frac{g * H_s}{U e^2} = 3.23 * 10^{-3} * \left(\frac{g * F e}{U e^2} \right)^{0.435}$
Donelan (1980)	$\frac{g * H_s}{(U_{10} * \cos(\theta - \phi_w))^2} = 0.00366 * \left(\frac{g * F_\theta}{(U_{10} * \cos(\theta - \phi_w))^2} \right)^{0.38}$ $\frac{g * T_p}{U_{10} * \cos(\theta - \phi_w)} = 0.542 * \left(\frac{g * F_\theta}{(U_{10} * \cos(\theta - \phi_w))^2} \right)^{0.23}$
Young e Verhagen (1996)	$\frac{g * H_s}{U_{10}^2} = 0.241 * \left(\tanh(A_1) * \tanh \left(\frac{B_1}{\tanh(A_1)} \right) \right)^{0.87}$ $\frac{g * T_p}{U_{10}^2} = 7.519 * \left(\tanh(A_2) * \tanh \left(\frac{B_2}{\tanh(A_2)} \right) \right)^{0.37}$

Fig. 96 – Síntese das metodologias paramétricas para previsão da altura e do período de onda da agitação gerada pelo vento (Gomes, 2014).

Tabela 10 – Alturas de onda significativa, H_s , e períodos de onda associados, T_s , e períodos de onda de pico T_p , para um ponto central da albufeira de Crestuma-Lever (Gomes, 2014).

Método	H_s (m)	T_s (s)	T_p (s)
Hasselman (1976)	0.30	1.72	2.22
SMB (1970)	0.36	2.23	2.88
Bhomwik (1976)	0.35	-	-
Demirbek, Bratos e Thompson (1993)	0.24	1.44	1.86
Wilson (1965) e Goda (2003)	0.34	1.80	2.32
Kahma and Calkoen (1992)	0.32	1.96	2.53
Saville (1954)	0.24	-	-
Donelan (1980)	0.31	1.85	2.39
Young and Verhagen (1996)	0.24	1.90	2.45

Para a avaliação das características da agitação gerada pela passagem de embarcações Gomes (2014), seleccionou as três embarcações mais comuns que passam pela eclusa da barragem de Crestuma-Lever: Douro *Queen*, Douro *Cruiser* e pequenas embarcações de recreio (com menores dimensões, mas com maior velocidade). Posteriormente foi feita uma avaliação da agitação gerada por estas embarcações tendo em conta as suas características físicas e as características da via de navegação, aplicando as metodologias paramétricas apresentadas na Fig. 97. A Tabela 11, a Tabela 12 e a Tabela 13 apresentam os valores obtidos para a altura de onda de interferência para as embarcações do tipo Douro *Queen*, Douro *Cruiser* e pequenas embarcações de recreio, respectivamente.

Sorensen e Weggel (1984)	$H^* = \alpha x^{*n}$ $\log(\alpha) = a + b \log(h^*) + c \log^2(h^*)$
Balanin e Bykov (1965)	$H_i = 2.5 \frac{V^2}{2g} \left(1 - \left(1 - \frac{1}{(4.2 + \frac{A_c}{A_m})^{0.5}} \right) \left(\frac{\frac{A_c}{A_m} - 1}{\frac{A_c}{A_m}} \right)^2 \right)$
Hochstein (1980)	$H_i = 0.0448 V^2 \left(\frac{D}{L} \right)^{0.5} \left(1 - \frac{BD}{A_c} \right)^{-2.5}$
Kriebel e Seelig (2005)	$\frac{g H_i}{V^2} = \beta (Fr_* - 0.1)^2 \left(\frac{x}{L} \right)^{-\frac{1}{3}}$
Bhowmik (1975)	$\left(\frac{H_i}{D} \right)^2 = 0.139 V^{1.174} \left(\frac{x}{L} \right)^{-0.915}$
Bhowmik et al. (1991)	$H_i = 0.537 V^{-0.356} x^{-0.345} L^{0.56} h^{0.355}$

Fig. 97 – Síntese das metodologias paramétricas utilizadas para previsão da altura de onda gerada pela passagem de embarcações (Gomes, 2014).

Tabela 11 – Metodologias paramétricas para o cálculo da altura de onda de interferência para as embarcações Douro *Queen* (Gomes, 2014).

Método	Altura de onda de interferência – H_i (m)
Sorensen e Weggel (1984)	0.317
Balanin e Bykov (1965)	0.203
Hochstein (1980)	0.146

Tabela 12 – Metodologias paramétricas para o cálculo da altura de onda de interferência para as embarcações Douro *Cruiser* (Gomes, 2014).

Método	Altura de onda de interferência – H_i (m)
Sorensen e Weggel (1984)	0.365
Balanin e Bykov (1965)	0.215
Hochstein (1980)	0.150

Tabela 13 – Metodologias paramétricas para o cálculo da altura de onda de interferência para as embarcações de recreio (Gomes, 2014).

Método	Altura de onda de interferência – H_i (m)
Balanin e Bykov (1965)	0.757
Bhowmik (1975)	0.853
Bhomik <i>et al.</i> (1991)	0.453

Após a análise anterior das alturas de onda significativas e períodos de onda de pico, para os casos reais da costa portuguesa e albufeira de Crestuma-Lever, é necessário escolher as condições de teste, partindo da informação recolhida.

Para o estudo em questão, e devido às limitações de tempo de teste no tanque de ondas, foi decidido testar, relativamente à agitação marítima, as alturas de onda significativa e períodos de onda de pico mais frequentemente registados, na bóia ondógrafo *offshore* de Leixões (Fig. 95, a vermelho). Em relação à agitação fluvial, foi decidido testar: (i) apenas a altura e o período de onda mais frequente, para o caso da ocorrência de agitação gerada pelo vento, e (ii) agitação gerada pelo vento simultaneamente com agitação gerada pela passagem de embarcações, considerando-se que existe sobreposição dos efeitos da agitação gerada pela passagem de embarcações com a agitação gerada pelo vento. Neste último caso, testou-se uma altura de onda fruto do somatório da altura de onda significativa (acção do vento) com a altura de onda de interferência (passagem das embarcações). Para a determinação das alturas significativas e de interferência, e dos períodos de onda, foram feitas médias dos valores obtidos através das diferentes metodologias paramétricas, para ambos os casos.

A altura de água no tanque foi definida de maneira a permitir que as condições de teste ficassem dentro dos limites de desempenho do sistema de geração das ondas, e atendendo às características de funcionamento de uma bóia oceânica. Desta forma, a profundidade de água escolhida foi de 0.8 m, que corresponde em protótipo a 16.0 m.

Sabendo que a altura de onda máxima que pode ser gerada para um determinado período é limitada, pelos critérios de rebentação da onda e pelas características de desempenho do sistema de geração de ondas. Por seu turno, o desempenho deste sistema de geração de agitação marítima é função da sua excursão máxima (1.08 m), da velocidade máxima das pás (0.87 m/s) e da força (1.5 kN). A relação entre a altura de onda máxima que pode ser gerada numa profundidade de água sem rebentação e o seu comprimento, para qualquer que seja a condição de agitação, é dada por:

$$H_{m\acute{a}x} = \frac{L}{7} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \text{ ou } H_{m\acute{a}x} = \frac{L}{10} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (96)$$

O segundo critério, que é mais conservativo que o primeiro, dá mais garantias na prática de que as ondas geradas não sofrem rebentação. A profundidade de água no interior do tanque de ondas impõe que:

$$H_{m\acute{a}x} \leq 0.6 d \text{ ou } H_{m\acute{a}x} \leq 0.5 d \quad (97)$$

em que $H_{m\acute{a}x}$ representa a altura de onda máxima que pode ser gerada numa profundidade de água sem rebentação, L o comprimento de onda e d a profundidade de água.

Tendo em conta todos os parâmetros e condicionantes mencionados, os planos de ensaios da primeira fase (estado de agitação regular), e da segunda fase (estado de agitação irregular) são apresentados Tabela 14 e Tabela 15, respectivamente:

Tabela 14 – Plano de ensaios da primeira fase do estudo – Estado de agitação regular

Tipo de Agitação	Modelo (esc. 1/20)		Protótipo (esc. 1/1)		Nº de ondas
	H _{mod} (m)	T _{mod} (s)	H _{pro} (m)	T _{pro} (s)	
Regular	0.038	0.53; 0.63; 0.73; 0.83; 0.93; 1.34; 1.79; 2.68; 3.13	0.75	2.37; 2.82; 3.26; 3.71; 4.16; 6.00; 8.00; 12.00; 14.00	120
	0.100	0.71; 0.73; 0.83; 0.93; 1.34; 1.79; 2.68; 3.13	2.00	3.18; 3.26; 3.71; 4.16; 6.00; 8.00; 12.00; 14.00	120

Tabela 15 – Plano de ensaios da segunda fase do estudo – Estado de agitação irregular

Tipo de Agitação	Modelo (esc. 1/20)		Protótipo (esc. 1/1)		Nº de ondas
	H _{mod} (m)	T _{mod} (s)	H _{pro} (m)	T _{pro} (s)	
Irregular	0.018	0.54	0.36	2.40	512
	0.038	0.71	0.75	3.18	512
	0.025	1.59	0.50	7.10	512
	0.075	1.59; 1.88; 2.17; 2.46	1.50	7.10; 8.40; 9.70; 11.00	512
	0.125	1.88; 2.17; 2.46	2.50	8.40; 9.70; 11.00	512

A Fig. 98 e a Fig. 99 traduzem os limites da instalação experimental para a primeira fase (agitação regular), e para a segunda fase (agitação irregular) respectivamente, para uma altura de água no tanque de ondas de 0.80 m. Estes gráficos permitem verificar a exequibilidade das condições de teste definidas. Importa ainda referir que o sistema de geração foi utilizado com o módulo de absorção activa de reflexões desligado.

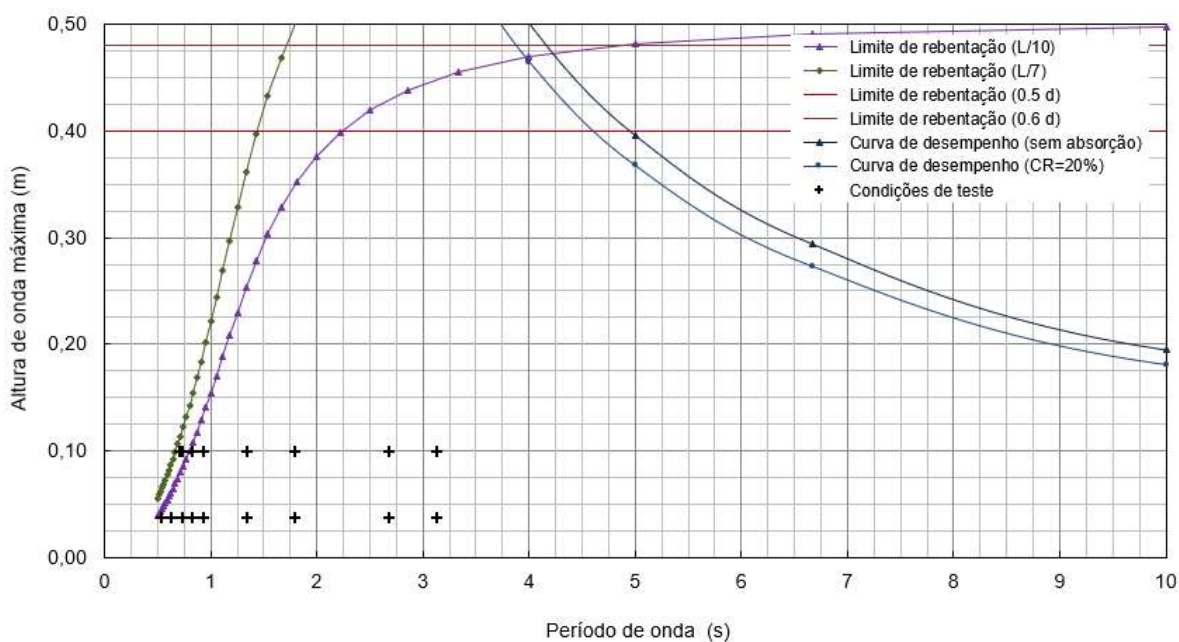


Fig. 98 – Condições de teste vs. Condições limite da instalação experimental para ondas regulares.

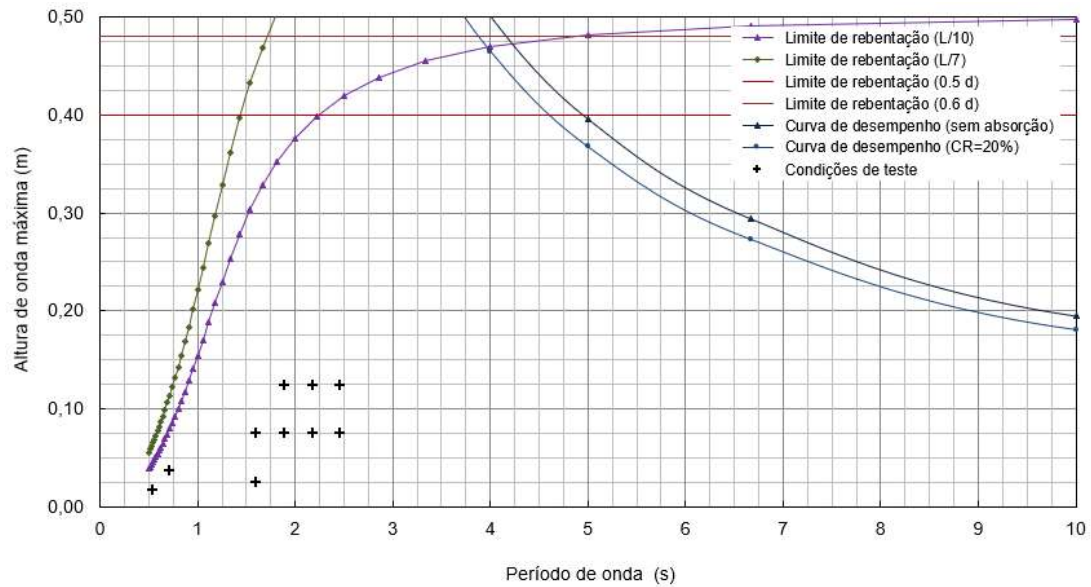


Fig. 99 – Condições de teste vs. Condições limite da instalação experimental para ondas irregulares.

5.7. ANÁLISE DE RESULTADOS

5.7.1. RESPOSTA GLOBAL DO SISTEMA SEM ONDAS

Numa fase inicial foram repetidos os ensaios decaimento livre, no tanque de ondas, para determinação dos períodos naturais para os modos de oscilação de balanço e arfagem do modelo simplificado com o TENG. A repetição destes ensaios deve-se a, por um lado, eliminar os erros dos ensaios anteriores, fruto das reflexões e da pequena profundidade de água do pequeno tanque onde estes foram realizados, Fig. 75, e, por outro lado, para perceber a influência da amarração do modelo simplificado nos períodos naturais de oscilação de ambos os modos. Para isso foram feitos testes para o modelo livre e para o modelo amarrado, Fig. 100.

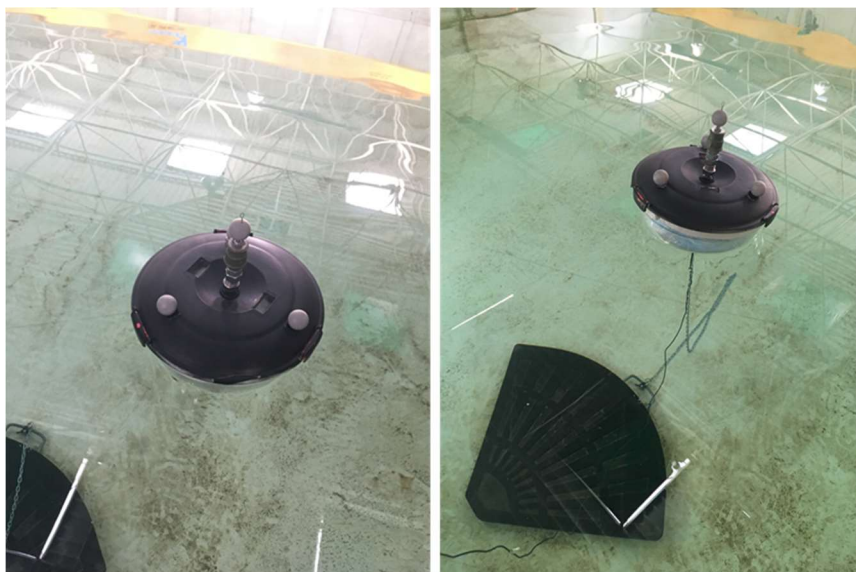


Fig. 100 – Modelo simplificado livre (esquerda) e modelo simplificado amarrado (direita).

Os ensaios foram repetidos 3 vezes para cada modo de oscilação e, no final, foi feita uma média dos valores obtidos. Foram utilizadas análises de *Fourier* para a determinação do período natural do modo de oscilação de balanço e do período natural do modo de oscilação de arfagem. Em primeiro lugar foram feitos os ensaios com o modelo simplificado livre, seguidos dos ensaios com o modelo amarrado. Por simplificação, apenas vão ser apresentados os gráficos dos primeiros ensaios.

A Fig. 101 apresenta a variação da amplitude das oscilações de balanço e arfagem do modelo simplificado livre.

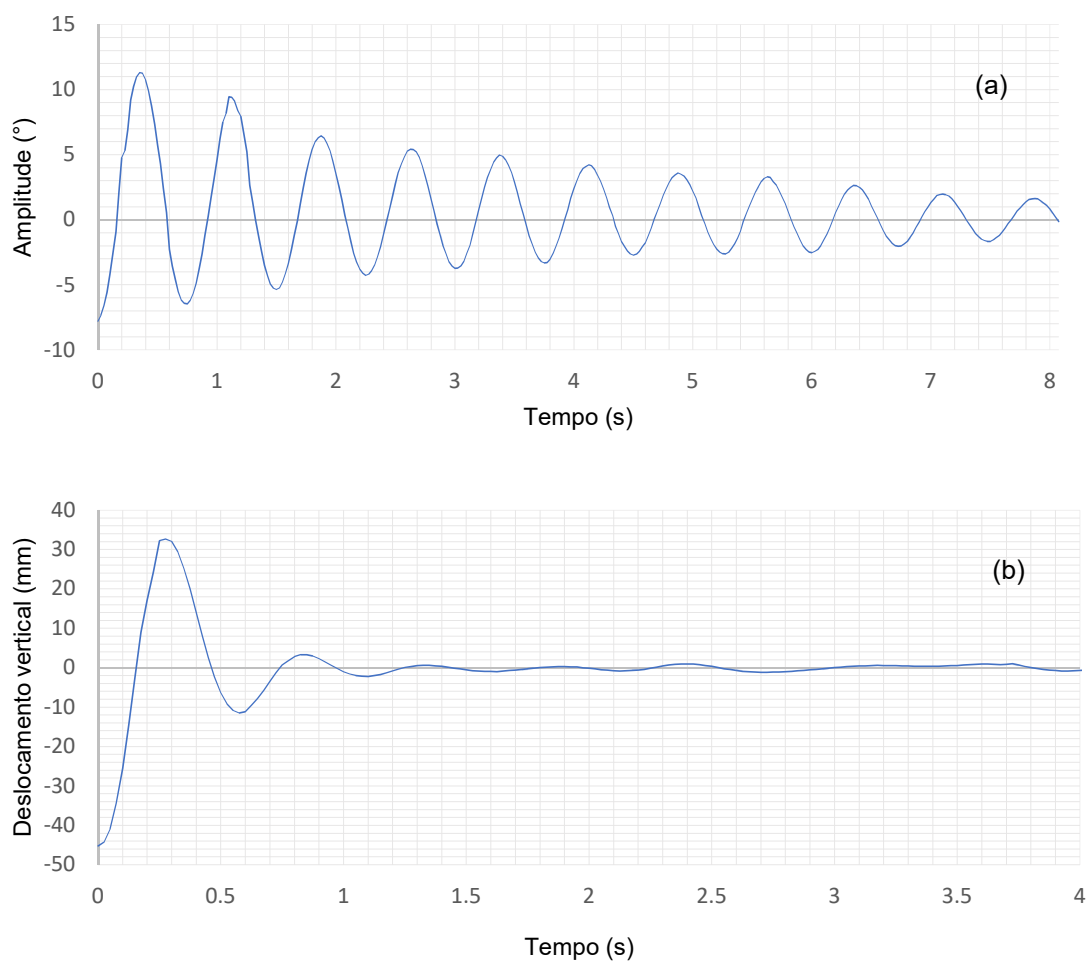


Fig. 101 – Variação da amplitude das oscilações de balanço (a) e arfagem (b) do modelo simplificado livre.

A Fig. 102 apresenta a variação da amplitude das oscilações de balanço e arfagem do modelo simplificado amarrado.

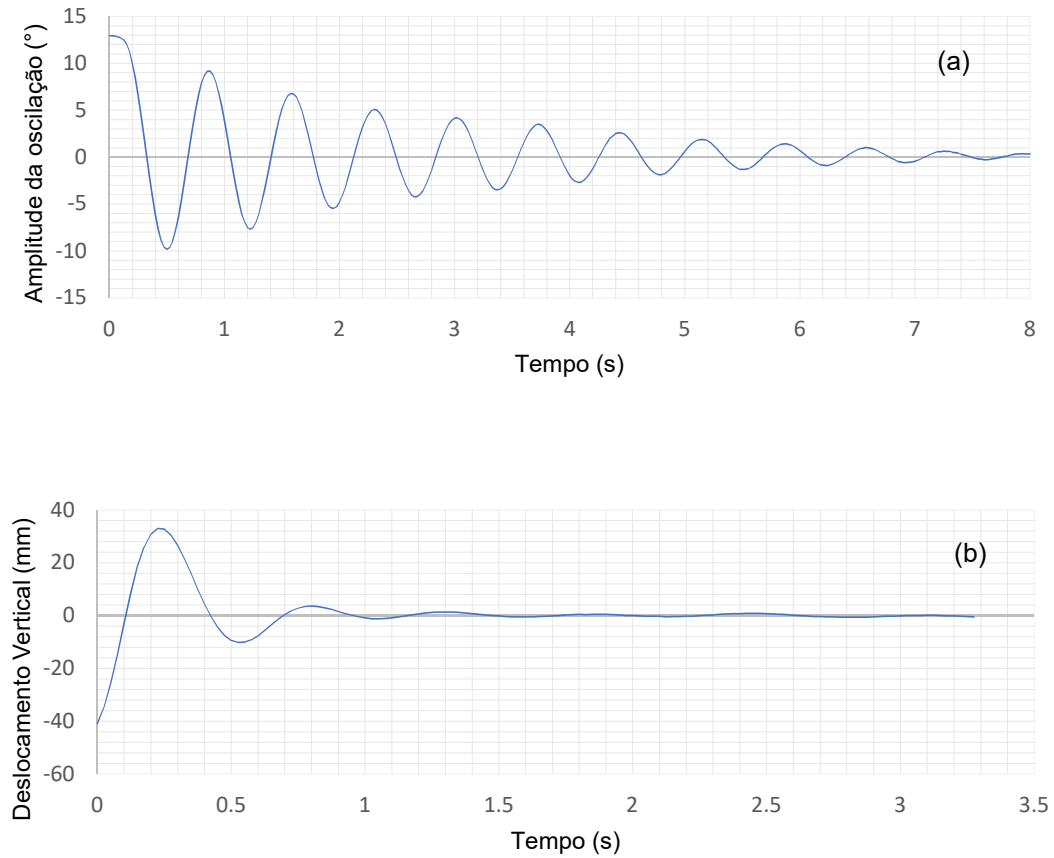


Fig. 102 – Variação da amplitude das oscilações de balanço (a) e arfagem (b) do modelo simplificado amarrado.

A Fig. 103 representa, respectivamente, o espectro resultante da análise de *Fourier* do primeiro ensaio com o modelo simplificado livre (a) e com o modelo simplificado amarrado (b), para a oscilação de balanço.

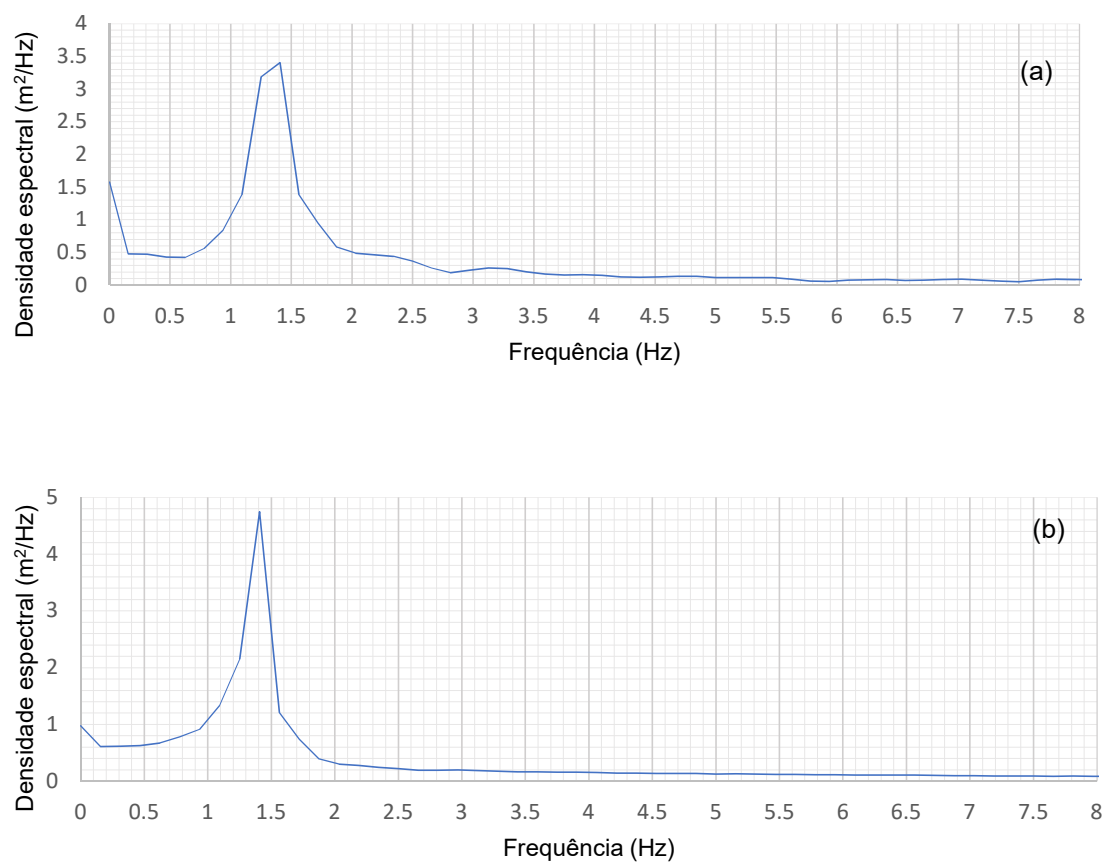


Fig. 103 – Espectro resultante da análise de *Fourier*, para a oscilação de balanço do modelo simplificado livre (a) e amarrado (b).

A Fig. 104 representa, respectivamente, o espectro resultante da análise de *Fourier* do primeiro ensaio com o modelo simplificado livre (a) e com o modelo simplificado amarrado (b), para a oscilação de arfagem.

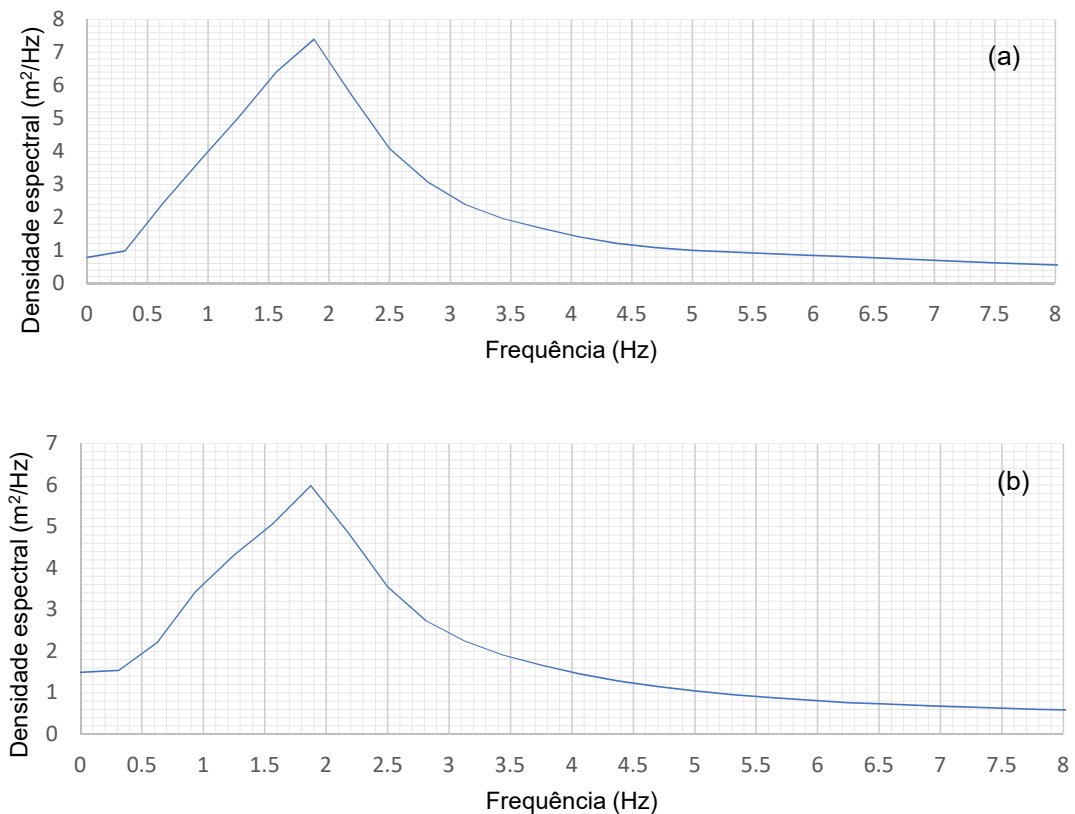


Fig. 104 – Espectro resultante da análise de *Fourier*, para a oscilação de arfagem do modelo simplificado livre (a) e amarrado (b).

A Tabela 16 apresenta a síntese dos resultados obtidos nos ensaios sem ondas. Através da sua análise podemos concluir que o período natural para o modo de oscilação de balanço (0.711 s) não sofreu uma alteração significativa entre os testes com o modelo simplificado livre e os testes com o modelo simplificado amarrado. No entanto, pela comparação dos gráficos da Fig. 101 e Fig. 102, podemos concluir que embora o período se mantenha o mesmo, quando o modelo simplificado está amarrado o número de oscilações até à extinção do movimento diminui, ou seja, o decréscimo logarítmico, δ , das oscilações de balanço diminui para o modelo amarrado. Por outro lado, e tal como seria de esperar, o período natural para o modo de oscilação de balanço diminuiu em relação ao valor obtido no teste no pequeno tanque (Tabela 8), isso deve-se à inclusão do TENG no interior do modelo simplificado, o que provoca um aumento de 379 g no peso total do sistema, bem como uma diminuição do centro de gravidade e um aumento da altura metacêntrica o que leva, por fim, a uma diminuição do período natural de oscilação.

Relativamente ao período natural do modelo simplificado, para o modo de oscilação de arfagem podemos concluir que o peso adicional da corrente de amarração também não tem influência, uma vez que o valor do período é igual no modelo simplificado amarrado.

Tabela 16 – Síntese dos resultados dos ensaios sem ondas com modelo livre e amarrado (valores em modelo).

Modelo Simplificado	Modo de Oscilação	T(s)	F (Hz)	Fourier 2 ⁿ	Média T(s)
Livre	Balanço (<i>roll</i>)	0.7111	1.4063	256	0.711
		0.7112	1.4060	256	
		0.7110	1.4065	256	
	Arfagem (<i>heave</i>)	0.5330	1.8762	128	0.533
		0.5310	1.8832	128	
		0.5340	1.8727	128	
Amarrado	Balanço (<i>roll</i>)	0.7111	1.4063	256	0.711
		0.7110	1.4065	256	
		0.7111	1.4063	256	
	Arfagem (<i>heave</i>)	0.5330	1.8762	128	0.533
		0.5320	1.8797	128	
		0.5330	1.8762	128	

5.7.2. RESPOSTA GLOBAL DO SISTEMA COM ONDAS

A partir dos dados registados pela sonda de níveis hidrodinâmicos, através *software HR DAQ*, é possível analisar a série temporal da elevação da superfície livre da água em cada um dos ensaios, Fig. 105. O *software* QTM permite determinar a amplitude dos movimentos para os graus de liberdade do modelo físico simplificado em estudo. Espera-se que, com a análise das séries temporais dos movimentos experimentados pelo modelo simplificado durante os diferentes ensaios, seja possível compreender o comportamento de todo o sistema.

5.7.2.1. Agitação Regular

Começou-se pela análise das ondas regulares. Para este tipo de agitação, o perfil regular, segundo a teoria linear, segue uma evolução sinusoidal com um período constante e uma elevação da superfície livre da água entre dois limites que somados resultam na altura final da onda. O objectivo da análise da resposta do sistema a agitação regular é construir curvas do factor de amplificação dinâmica do movimento do corpo, para os graus de liberdade de balanço e arfagem. Para isso é necessário conjugar os dados registados pela sonda hidrodinâmica com os dados registados pelo sistema de aquisição de movimentos *Qualisys*.

A título de exemplo, as próximas Figuras 105 a 107, mostram as séries temporais completas da elevação da superfície livre da água e das amplitudes dos movimentos do modelo simplificado segundo os modos de oscilação de balanço e arfagem obtidos através do *software HR DAQ* para o teste realizado com agitação regular e com as seguintes características: $H = 2$ m e $T = 6$ s (valores em protótipo).

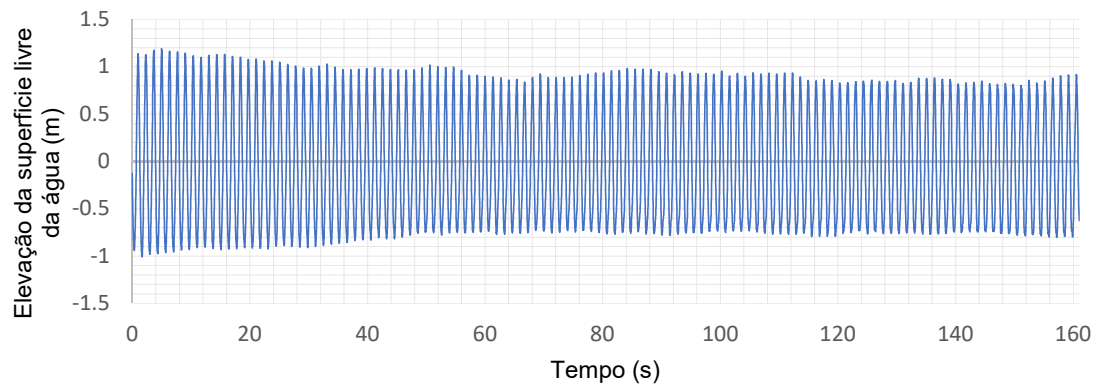


Fig. 105 – Série temporal da elevação da superfície livre da água. Agitação regular: $T = 6$ s; $H = 2$ m (valores em protótipo).

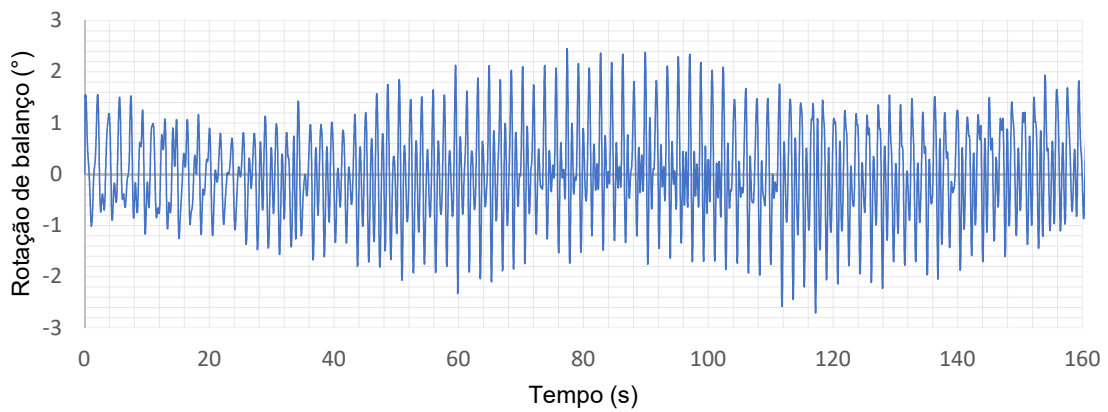


Fig. 106 – Série temporal da rotação de balanço do modelo simplificado. Agitação regular: $T = 6$ s; $H = 2$ m (valores em protótipo).

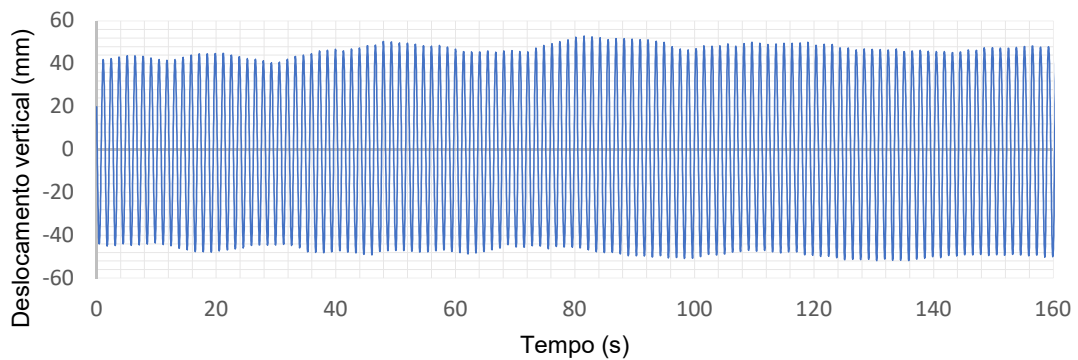


Fig. 107 – Série temporal do deslocamento vertical de arfagem do modelo simplificado. Agitação regular: $T = 6$ s; $H = 2$ m (valores em protótipo).

Para o modo de oscilação de balanço, o factor de amplificação dinâmica (*response amplitude operator*, RAO) foi definido, para cada frequência de onda incidente, como:

$$RAO_{\text{balanço}} = \frac{A_R}{H/2} \quad (98)$$

em que: A_R representa a amplitude do movimento do corpo flutuante e H a altura da onda (utilizou-se a altura significativa por forma a eliminar o erro associado aos efeitos de arranque e paragem dos batedores).

Para o modo de oscilação de arfagem, o factor de amplificação dinâmica RAO, para cada frequência de onda incidente, foi definido como:

$$RAO_{\text{arfagem}} = \frac{A_H}{H/2} \quad (99)$$

em que: A_H representa a amplitude do movimento do corpo flutuante e H a altura da onda.

Foram contruídos os gráficos para ambas as alturas de onda testadas de 2.00 m e 0.750 m (0.100 m e 0.038 m, respectivamente, em modelo). As Fig. 108 e Fig. 109 representam as curvas do factor de amplificação dinâmica para os modos de oscilação de balanço e arfagem, respectivamente, para a altura de onda de 0.750 m. A Tabela 17 apresenta a síntese dos resultados obtidos para o cálculo dos factores de amplificação dinâmica de balanço e arfagem, para a altura de onda de 0.750 m (valores em protótipo).

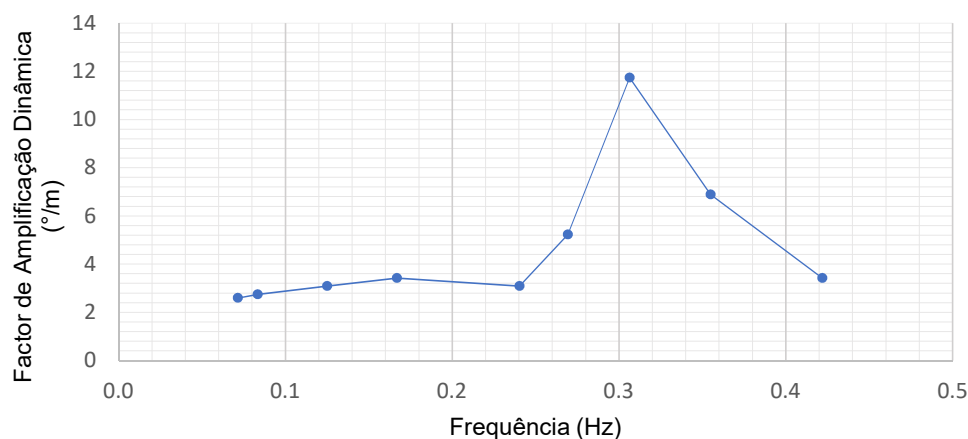


Fig. 108 – Curva do factor de amplificação dinâmica de balanço para a altura de onda de $H = 0.75$ m (valores em protótipo).

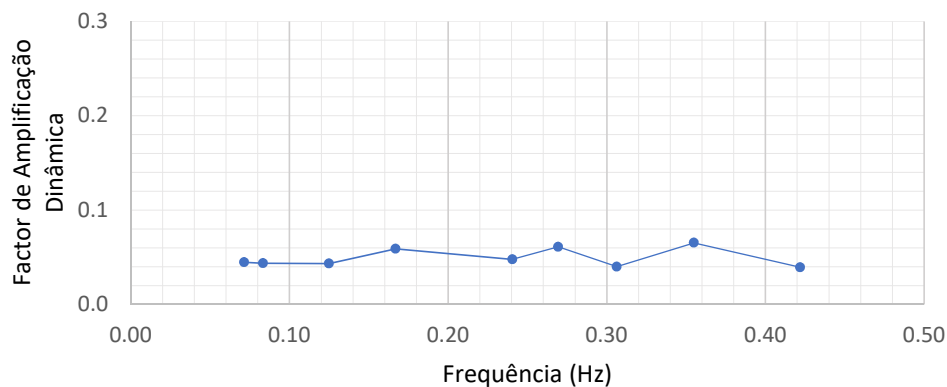


Fig. 109 – Curva do factor de amplificação dinâmica de arfagem para a altura de onda de $H = 0.750$ m (valores em protótipo).

Tabela 17 – Síntese dos resultados do estudo da curva do factor de amplificação dinâmica para uma altura de onda de $H = 0.750$ m.

Ensaio	F (Hz)	Hs (m)	Média das Amplitudes. Oscilações de Balanço (°)	Média das Amplitudes. Oscilações de Arfagem (m)	RAO Balanço	RAO Arfagem
1	0.071	0.719	0.931	0.0160	2.590	0.045
2	0.083	0.750	1.027	0.0163	2.739	0.044
3	0.125	0.799	1.234	0.0172	3.089	0.043
4	0.167	0.764	1.308	0.0225	3.423	0.059
5	0.240	0.785	1.210	0.0187	3.083	0.048
6	0.269	0.746	1.950	0.0227	5.229	0.061
7	0.306	0.738	4.330	0.0147	11.734	0.040
8	0.355	0.790	2.720	0.0257	6.886	0.065
9	0.422	0.775	1.326	0.0152	3.421	0.039

Os resultados obtidos no estudo da curva do factor de amplificação dinâmica para o modo de oscilação de balanço, para a altura de onda de 0.750 m, estão de acordo com o esperado. A curva começa próximo de zero e cresce de forma relativamente gradual até à frequência de 0.24 Hz, de seguida cresce de maneira mais abrupta até ao máximo na frequência de 0.306 Hz, a frequência testada mais próxima da frequência de ressonância, de seguida, decresce para valores próximos de zero.

Ao contrário do que se verifica para o modo de oscilação de balanço, a curva do factor de amplificação dinâmica para o modo de oscilação de arfagem apresenta um resultado bastante diferente do esperado. Embora não muito elevado em relação aos demais, o valor máximo do factor de amplificação dinâmica ocorre para uma frequência de 0.355 Hz e não para a frequência de 0.422 Hz, como seria de esperar, uma vez que esta é frequência mais próxima da frequência de ressonância determinada anteriormente. Apenas se pode concluir que a curva é pouco conclusiva e que é impossível determinar com exactidão a resposta do sistema para este modo de oscilação.

As Fig. 110 e Fig. 111 representam as curvas do factor de amplificação dinâmica para os modos de oscilação de balanço e arfagem respectivamente, para a altura de onda de 2.00 m. A Tabela 18 apresenta a síntese dos resultados obtidos para o cálculo dos factores de amplificação dinâmica de balanço e arfagem para a altura de onda de 2.00 m.

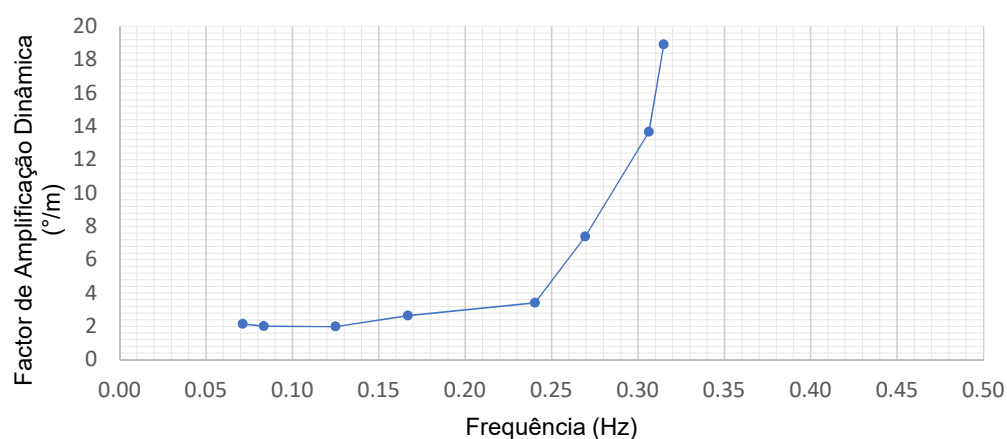


Fig. 110 – Curva do factor de amplificação dinâmica de balanço para a altura de onda de $H = 2.00$ m (valores em protótipo).

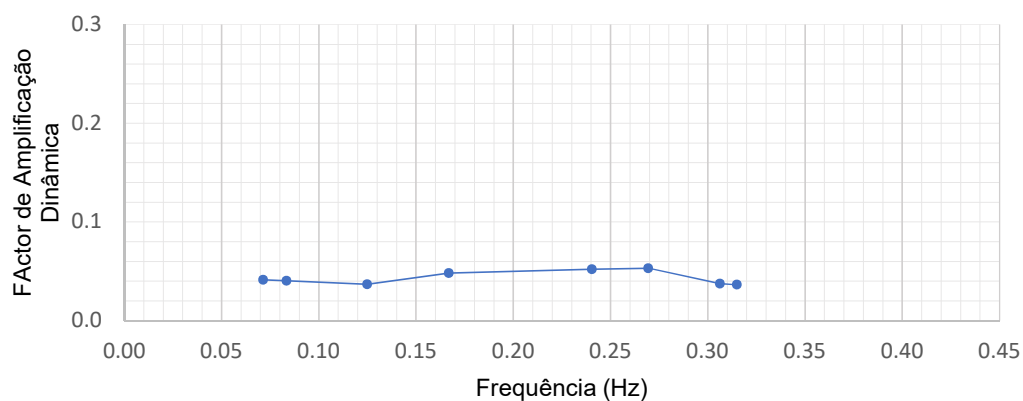


Fig. 111 – Curva do factor de amplificação dinâmica de arfagem para a altura de onda de $H = 2.00$ m (valores em protótipo).

Tabela 18 – Síntese dos resultados do estudo da curva do factor de amplificação dinâmica para uma altura de onda de $H = 2.00$ m.

Ensaio	F (Hz)	Hs (m)	Média das Amplitudes. Oscilações de Balanço (°)	Média das Amplitudes. Oscilações de Arfagem (m)	RAO Balanço	RAO Arfagem
1	0.071	2.012	2.151	0.0417	2.138	0.041
2	0.083	2.009	2.029	0.0405	2.019	0.040
3	0.125	2.061	2.050	0.0380	1.989	0.037
4	0.167	1.930	2.560	0.0466	2.653	0.048
5	0.240	2.118	3.620	0.0552	3.418	0.052
6	0.269	2.013	7.438	0.0534	7.390	0.053
7	0.306	2.078	14.193	0.0388	13.660	0.037
8	0.315	1.974	18.669	0.0360	18.915	0.036

Os resultados obtidos no estudo da curva do factor de amplificação dinâmica para o modo de oscilação de balanço, para a altura de onda de 2.00 m, também estão de acordo com o esperado. A curva começa próximo de dois e, mais uma vez cresce de forma relativamente gradual até à frequência de 0.240 Hz, e depois de uma forma mais abrupta até ao máximo na frequência de 0.315 Hz, que é a frequência de ressonância determinada anteriormente. Devido às limitações dos batedores, foi impossível testar, para esta altura de onda, frequências mais elevadas. No entanto, seria de esperar que para frequências mais elevadas, a curva do factor de amplificação, começasse a decrescer para valores próximos de zero.

A curva do factor de amplificação dinâmica para o modo de oscilação de arfagem apresenta um resultado mais uma vez inconclusivo. Os valores obtidos são bastante uniformes e não se conseguem identificar picos relevantes, no entanto, o valor máximo foi obtido para a frequência de 0.269 Hz. Devido às limitações referidas anteriormente, não foi possível testar frequências próximas da frequência de ressonância desse grau de liberdade, estimada em 0.420 Hz.

As Fig. 112 e Fig. 113 representam a comparação entre as curvas do factor de amplificação dinâmica das oscilações de balanço e arfagem, respectivamente, para as duas alturas de onda testadas.

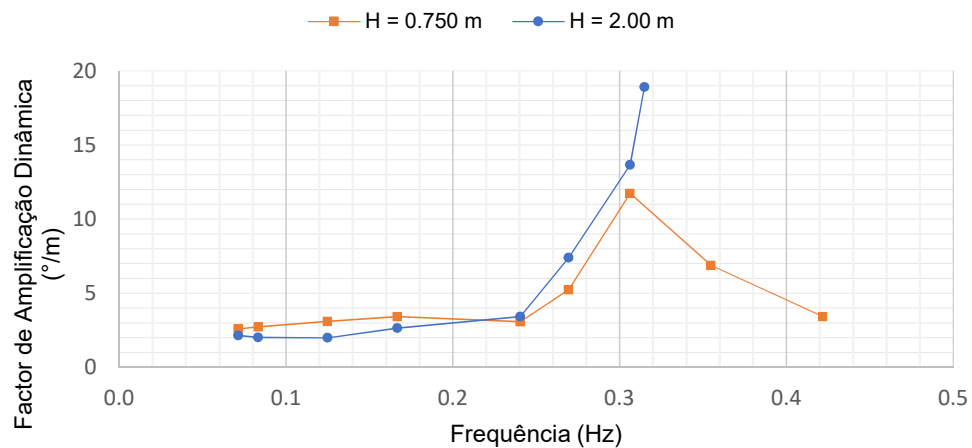


Fig. 112 – Comparação das curvas do factor de amplificação dinâmica de balanço para as duas alturas de onda testadas (valores em protótipo).

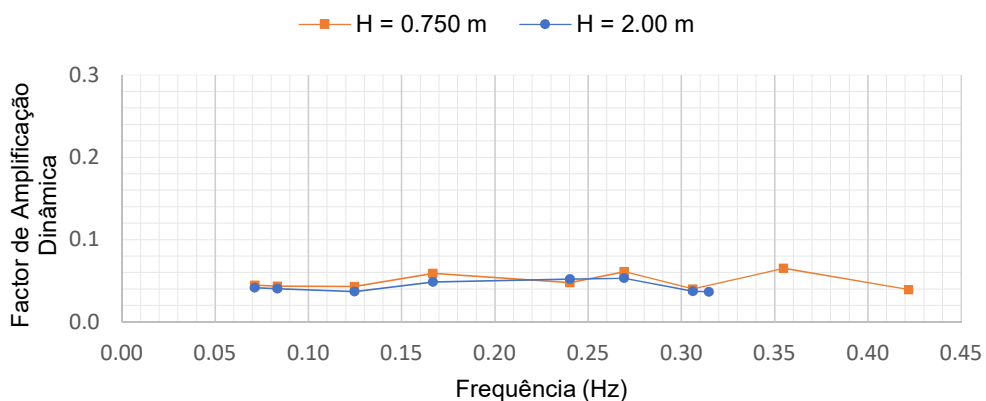


Fig. 113 – Comparação das curvas do factor de amplificação dinâmica de arfagem para as duas alturas de onda testadas (valores em protótipo).

Podemos concluir que as curvas do factor de amplificação dinâmica para o modo de oscilação de balanço, para as duas alturas de onda, seguem a mesma tendência, apresentando um crescimento até uma frequência de pico que coincide com a frequência de ressonância do modelo simplificado (0.315 Hz), seguido dum decréscimo para o caso dos testes com altura de onda de 0.750 m, uma vez que, para esta altura de onda, foram testadas frequências mais elevadas. As curvas do factor de amplificação para o modo de oscilação de arfagem, para as duas alturas de onda, seguem praticamente a mesma tendência. O aumento da altura de onda provoca um aumento linear nas amplitudes de oscilação. É assim possível concluir que o aumento da altura de onda tem um efeito linear na resposta global do modelo simplificado à agitação para os modos de oscilação de balanço e arfagem, uma vez que as curvas do factor de amplificação dinâmica variam de maneira muito similar para ambas as alturas.

5.7.2.2. Agitação Irregular

Nos ensaios com agitação irregular, o *software HR DAQ*, foi também usado para obter a série temporal da elevação da superfície livre da água e o correspondente espectro de densidade de energia para análise no domínio das frequências. A título de exemplo, as próximas figuras mostram as séries temporais completas da elevação da superfície livre da água, Fig. 114, e das amplitudes dos movimentos dos modos de oscilação de balanço, Fig. 115, e arfagem, Fig. 116, para o ensaio realizado com agitação irregular e $H = 2.5$ m, $T = 11$ s (valores em protótipo).

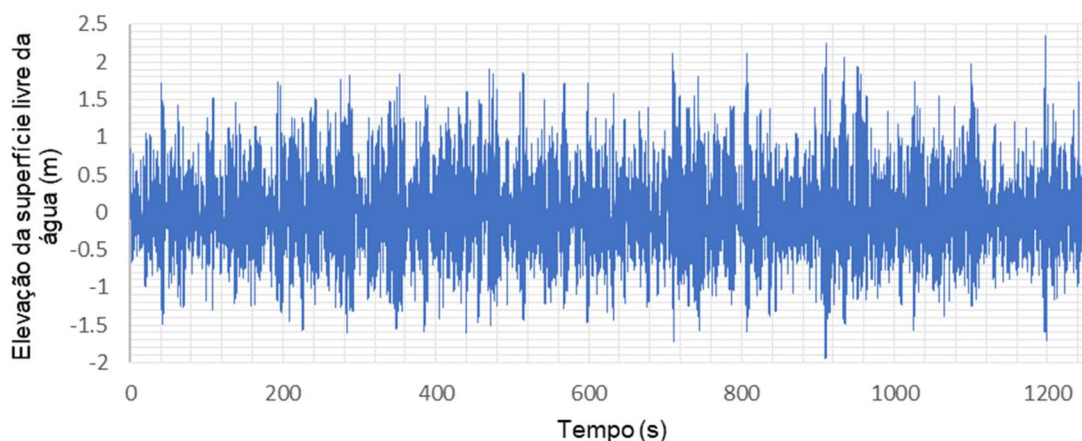


Fig. 114 – Série temporal da elevação da superfície livre da água. Agitação irregular: $T = 11$ s; $H = 2.5$ m.

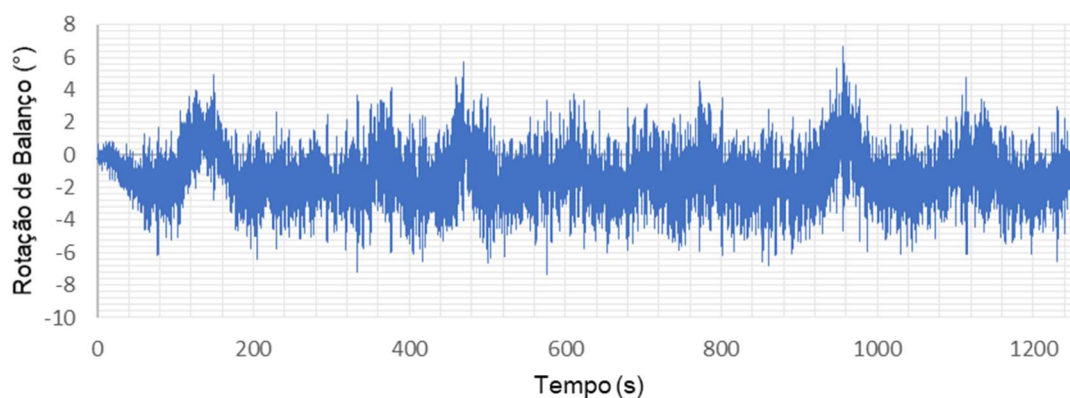


Fig. 115 – Série temporal da amplitude dos movimentos de balanço do modelo simplificado. Agitação irregular: $T = 11$ s; $H = 2.5$ m (valores em modelo).

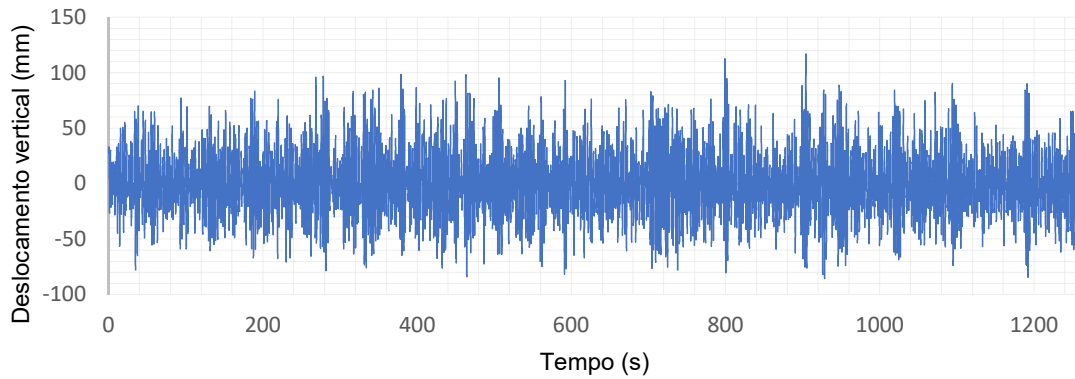


Fig. 116 – Série temporal da amplitude dos movimentos de arfagem do modelo simplificado. Agitação irregular: T = 11 s; H = 2.5 m (valores em modelo).

Após a calibração dos factores de ganho, garantiu-se que a altura de onda média obtida tinha sempre um erro inferior a 5% relativamente à altura de onda média pretendida. A Tabela 19 apresenta a síntese dos resultados obtidos.

Tabela 19 – Síntese das alturas de onda obtidas nos testes com agitação irregular (valores em modelo).

Ensaio	F_P (Hz)	T_P (s)	H_{mo} expectável (m)	H_{mo} obtida (m)	Erro
1	0.407	2.46	0.125	0.1248	0.16%
2	0.461	2.17	0.125	0.1254	0.32%
3	0.532	1.88	0.125	0.1256	0.48%
4	0.407	2.46	0.075	0.0756	0.73%
5	0.461	2.17	0.075	0.0742	1.13%
6	0.532	1.88	0.075	0.0735	2.00%
7	0.629	1.59	0.075	0.0748	0.33%
8	0.629	1.59	0.025	0.0252	0.80%
9	1.408	0.71	0.038	0.0385	1.18%
10	1.852	0.54	0.018	0.0174	3.61%

Nos ensaios com agitação irregular, o factor de amplificação dinâmica (RAO) foi definido como:

$$RAO_{balanço} = \left[\frac{S_{AA}(f)}{S_{HH}(f)} \right]^{0.5} \quad (100)$$

em que $S_{AA}(f)$ representa o espectro das amplitudes do movimento de balanço do corpo flutuante e $S_{HH}(f)$ o espectro da agitação marítima correspondente. Uma vez que o TENG testado depende sobretudo das oscilações de balanço para a produção de energia, apenas foi calculado o RAO para este grau de liberdade.

A análise espectral da série temporal da elevação da superfície livre da água e da série temporal dos movimentos de balanço do modelo simplificado correspondentes, foi realizada através de uma rotina *MatLab* aplicando a técnica das *Fast Fourier Transformation* – FFT's. Essa rotina primeiro faz uma subdivisão das séries temporais da elevação da superfície livre da água e movimento do modelo

simplificado correspondente, num determinado número de blocos de dados, sendo que cada um desses blocos se sobrepõe em 50% ao bloco anterior. O número de pontos destes blocos terá de ser sempre uma potência de base 2. No final é feita a média dos espectros obtidos em cada um desses blocos de dados. Quanto menor o número de pontos definidos menor é a resolução no domínio das frequências e mais suave é o espectro obtido.

A Fig. 117 apresenta os gráficos obtidos através da análise espectral da agitação marítima irregular e correspondentes oscilações de balanço (a), bem como o factor de amplificação dinâmica calculado (b) para as condições de teste: $T_P = 7.1$ s e $H_{mo} = 0.5$ m.

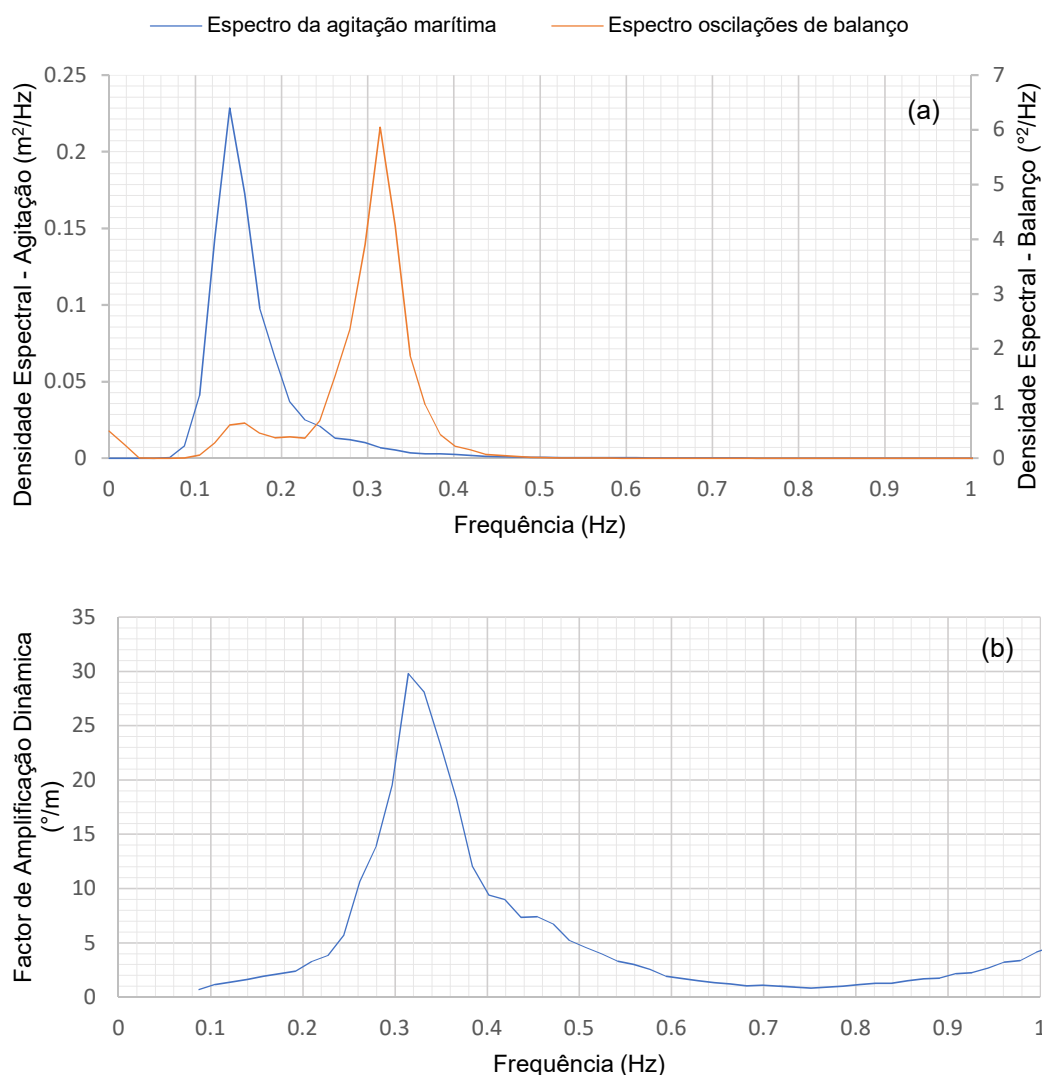


Fig. 117 – Análise espectral da: (a) da agitação marítima e oscilações de balanço e (b) factor de amplificação dinâmica. Agitação irregular: $T_P = 7.1$ s; $H = 0.5$ m (valores em protótipo).

Para este teste com agitação irregular e as condições $T_P = 7.1$ s e $H_{mo} = 0.5$ m o gráfico da curva factor de amplificação dinâmica obtido apresenta um pico para a frequência de 0.314 Hz. Esta frequência

coincide com a frequência de ressonância do modelo simplificado obtida anteriormente para o modo de oscilação de balanço

A Fig. 118 representa os gráficos obtidos através da análise espectral da agitação marítima irregular e correspondentes oscilações de balanço (a), bem como o factor de amplificação calculado (b) para as condições de teste: $T_P = 7.1$ s e $H_{mo} = 1.5$ m.

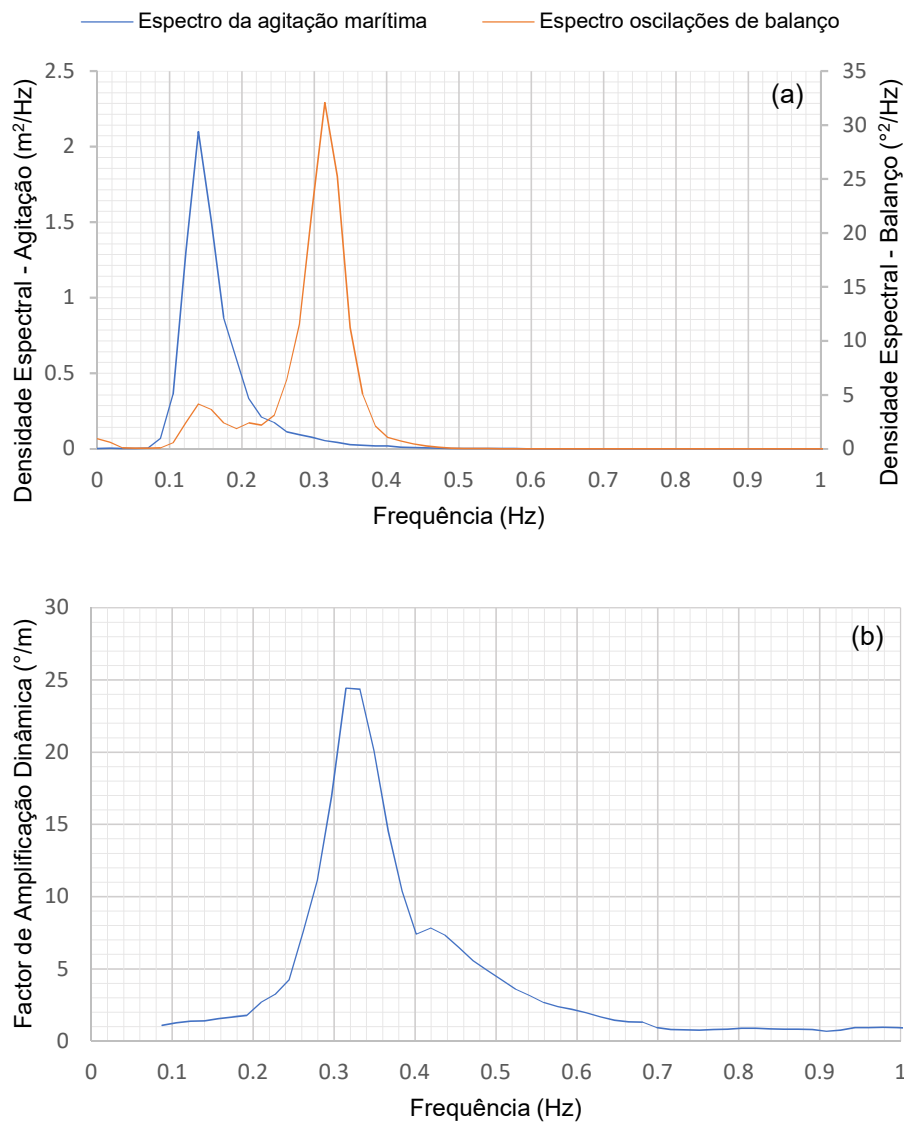


Fig. 118 – Análise espectral da: (a) da agitação marítima e oscilações de balanço e (b) factor de amplificação dinâmica. Agitação irregular: $T_P = 7.1$ s; $H = 1.5$ m (valores em protótipo).

Para este teste com agitação irregular e as condições $T_P = 7.1$ s e $H_{mo} = 1.5$ m, o gráfico da curva factor de amplificação dinâmica obtido apresenta um pico para a frequência de 0.314 Hz. Esta frequência coincide com a frequência de ressonância do modelo simplificado obtida anteriormente para o modo de oscilação de balanço.

A Fig. 119 apresenta os gráficos obtidos através da análise espectral da agitação marítima irregular e correspondentes oscilações de balanço (a), bem como o factor de amplificação calculado (b) para as condições de teste: $T_P = 8.4$ s e $H_{mo} = 1.5$ m.

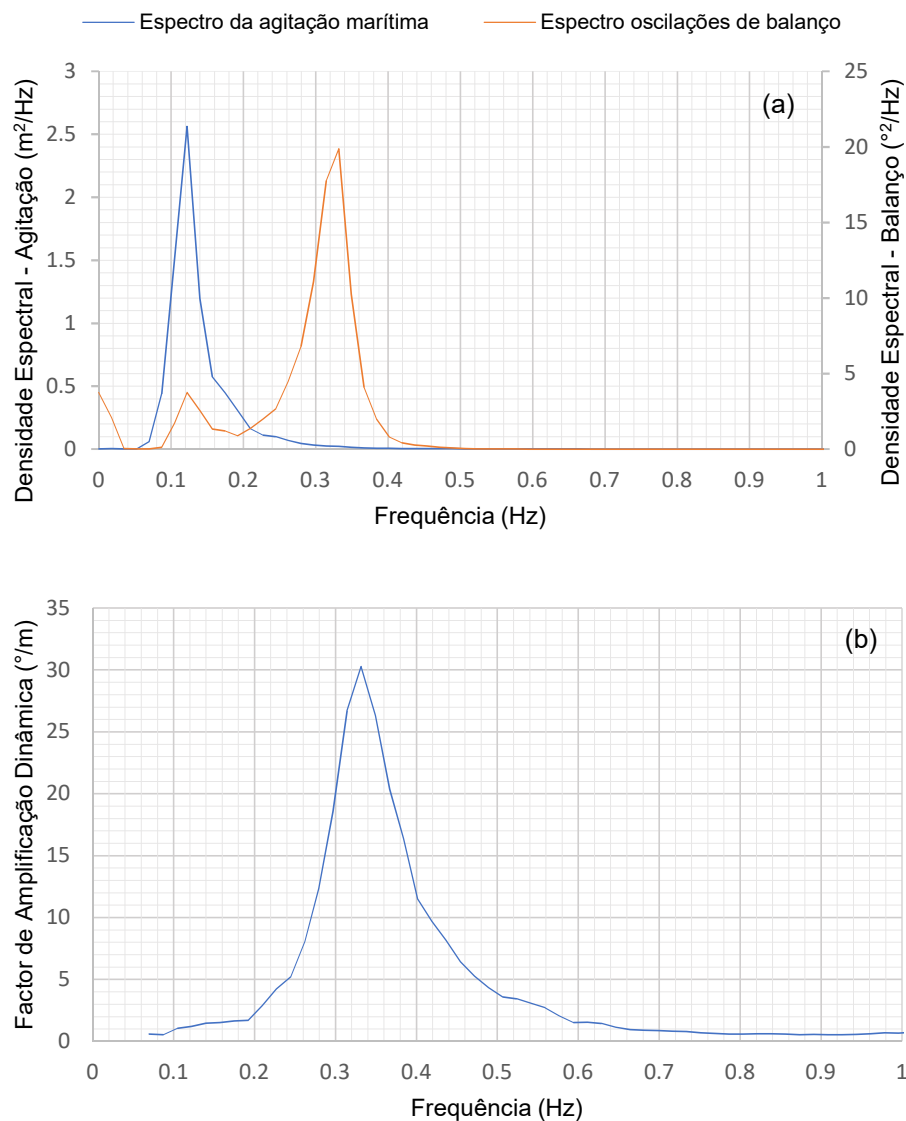


Fig. 119 – Análise espectral (a) da agitação marítima e oscilações de balanço e (b) factor de amplificação dinâmica. Agitação irregular: $T_P = 8.4$ s; $H = 1.5$ m (valores em protótipo).

Para este teste com agitação irregular e as condições $T_P = 8.4$ s e $H_{mo} = 1.5$ m o gráfico da curva factor de amplificação dinâmica obtido apresenta um pico para a frequência de 0.332 Hz. Este pico não coincide com a frequência de ressonância do modelo simplificado para este modo de oscilação. Por vezes o pico pode não ser bem apanhado devido à divisão da energia pelas bandas de frequência.

A Fig. 120 apresenta os gráficos obtidos através da análise espectral da agitação marítima irregular e correspondentes oscilações de balanço (a), bem como o factor de amplificação calculado (b) para as condições de teste: $T_P = 9.7$ s e $H_{mo} = 2.5$ m.

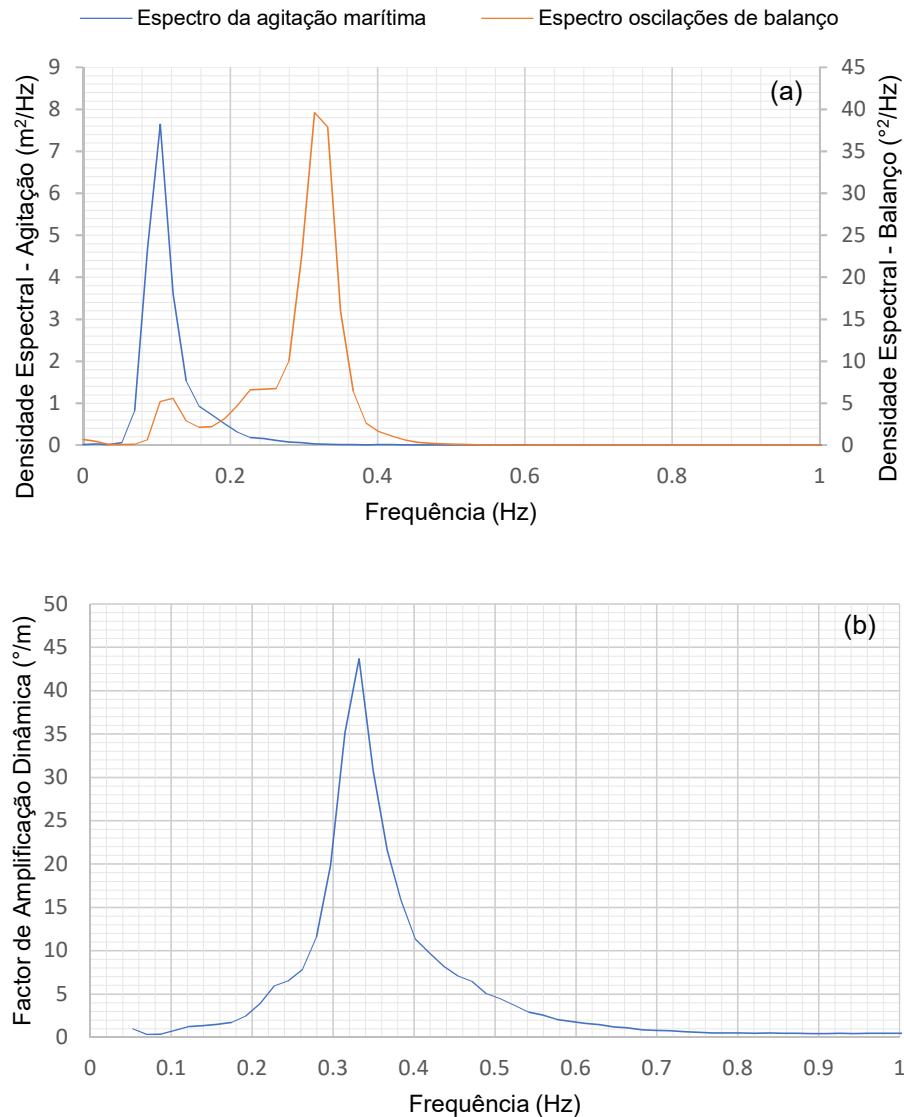


Fig. 120 – Análise espectral (a) da agitação marítima e oscilações de balanço e (b) factor de amplificação dinâmica. Agitação irregular: $T_P = 9.7$ s; $H = 2.5$ m (valores em protótipo).

Para este teste com agitação irregular e as condições $T_P = 9.7$ s e $H_{mo} = 2.5$ m, o gráfico da curva factor de amplificação dinâmica obtido apresenta um pico para a frequência de 0.332 Hz. Este pico não coincide com a frequência de ressonância do modelo simplificado para este modo de oscilação (0.3145 Hz).

A Fig. 121 apresenta a comparação entre as diferentes curvas do factor de amplificação dinâmica para os testes com agitação irregular.

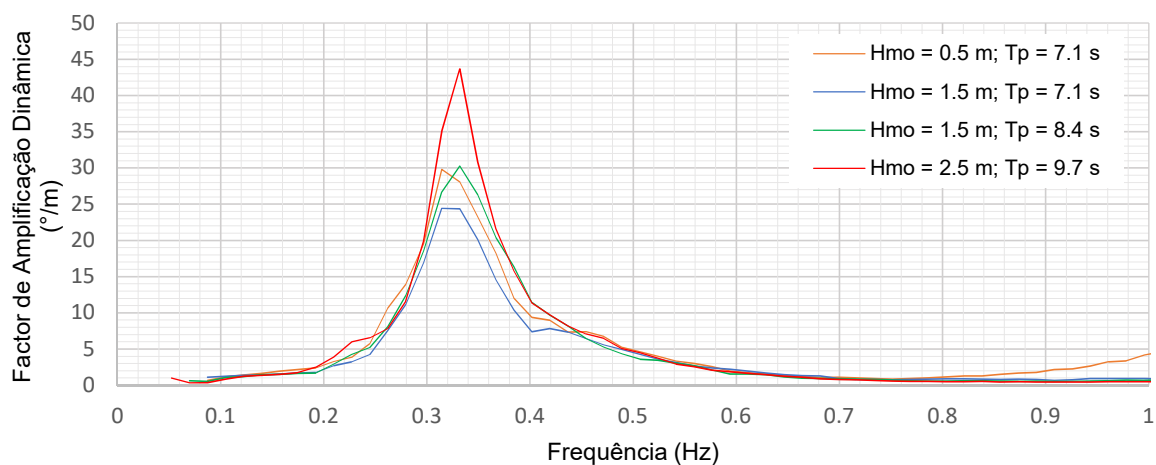


Fig. 121 – Comparação entre os factores de amplificação dinâmica obtidos nos testes de agitação marítima irregular (valores em protótipo).

Através da Fig. 121 conferimos que os resultados estão de acordo com o esperado, as curvas do factor de amplificação dinâmica dos diferentes testes seguem tendências similares. As curvas começam próximo de zero e crescem de forma relativamente gradual até à frequência de 0.240 Hz, a partir desta frequência o crescimento das curvas é de forma mais abrupta até alcançarem o pico que, para os testes realizados, se situou entre as frequências de 0.314 Hz e 0.332 Hz. Para frequências mais elevadas, a curva decresce para valores próximos de zero. Os picos obtidos são muito próximos da frequência de ressonância do modelo simplificado para o modo de oscilação de balanço (0.3145 Hz, em protótipo) obtida através dos ensaios de decaimento livre elaborados no tanque de ondas, em condições de águas paradas.

É perceptível também concluir que com o aumento da altura de onda a resposta do modelo simplificado aumenta também, embora não seja regra, devido à aleatoriedade de cada espectro de agitação marítima irregular. Podemos confirmar esse facto uma vez que o factor de amplificação máximo obtido no teste com altura significativa de onda 0.5 m e período de onda de pico de 7.1 s, é ligeiramente maior que o obtido para o teste com altura de onda significativa 1.5 m e período de onda de pico de 7.1 s. A Tabela 20 apresenta a síntese dos valores obtidos.

Tabela 20 – Síntese das frequências de pico e dos factores de amplificação dinâmico de balanço obtidos para os testes com agitação irregular (valores em protótipo).

Ensaio	Condições Testadas		Resposta do Sistema	
	H _{mo} (m)	T _P (s)	F _P (Hz)	RAO balanço
1	0.5	7.1	0.314	29.8
2	1.5	7.1	0.314	24.4
3	1.5	8.4	0.332	30.3
4	2.5	9.7	0.332	43.7

5.7.3. RESPOSTA GLOBAL DO TENG

O TENG tem como finalidade a conversão da energia das ondas em energia eléctrica, logo é importante converter as voltagens medidas em potência gerada, ou energia. Para fazer essa conversão utilizam-se as expressões (101) e (102) (Nilsson *et al.*, 2010). Para comparar com outras tecnologias de produção de energia é necessário também determinar a densidade de potência do TENG, utilizando para o efeito a expressão (103).

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{Voc^2}{4R} \quad (101)$$

$$E = \int_0^t P(t) dt \quad (102)$$

$$S = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A} \quad (103)$$

em que $P_{m\acute{a}x}$ representa a potência máxima gerada, Voc a média dos picos de tensão eléctrica, R a resistência equivalente do circuito, E a energia produzida, dt o intervalo de tempo considerado, S a densidade de potência e A a área de contacto entre as esferas e o nano-material.

5.7.3.1. Agitação Regular

A Fig. 122 apresenta, a título de exemplo, a configuração de um gráfico da tensão gerada em função do tempo de ensaio para o teste com agitação regular, altura de onda de 0.1 m e período de onda de 0.83 s (valores em modelo). Estes dados são obtidos através do sistema de aquisição do TENG (*datalogger*).

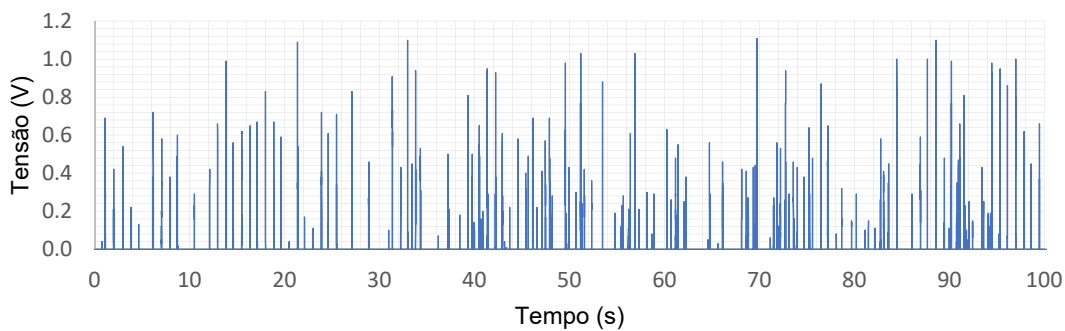


Fig. 122 – Série temporal da tensão gerada pelo TENG. Agitação regular: $T = 0.83$ s; $H = 0.100$ m.

Em primeiro lugar foi feita uma análise aos valores da tensão total gerada por cada ensaio. Como as ondas são regulares, em teoria dividindo a tensão total gerada por teste pelo número de ondas temos a tensão gerada por onda. Importa referir que ao realizar uma análise deste tipo se está a cometer um erro, uma vez que a tensão gerada não depende directamente da onda, mas sim das oscilações de balanço que a onda provoca no modelo simplificado, e essas oscilações do modelo simplificado não são regulares como as ondas. Em todo o caso, ao fazer esta análise com o único objectivo de comparar a resposta do TENG com as curvas do factor de amplificação dinâmica do modo de oscilação de balanço do modelo simplificado consegue-se facilmente inferir a sua interligação. A Fig. 123 representa o gráfico das tensões geradas por onda para os testes com agitação regular e altura de onda de 0.038 m (valor em modelo).

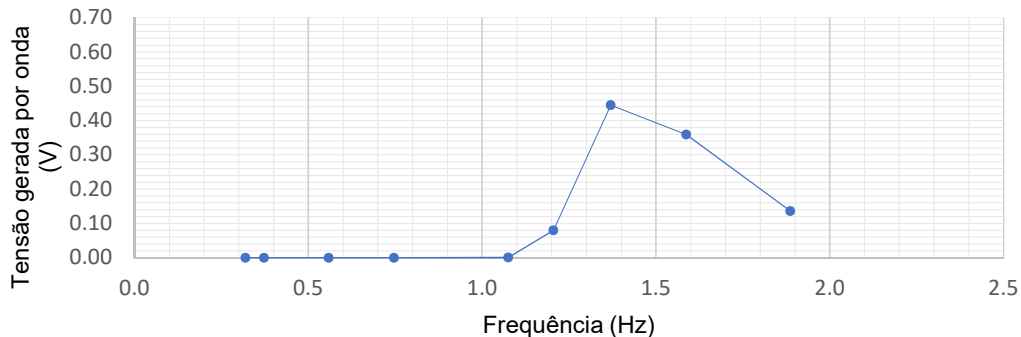


Fig. 123 – Tensão gerada por onda para os testes realizados com agitação regular com altura de onda de 0.038 m (valores em modelo).

Comparando o gráfico da Fig. 108 com o gráfico da Fig. 123, é possível observar que a tensão gerada por onda segue o crescimento da curva do factor de amplificação dinâmica de balanço. Até à frequência de 0.240 Hz (1.075 Hz em modelo), a curva do factor de amplificação dinâmica de balanço comporta-se de maneira bastante regular, variando apenas entre os valores 2.6 e 3.0, e não há tensão gerada. Passando a frequência de 0.240 Hz (1.075 Hz, em modelo) o factor de amplificação dinâmica aumenta até atingir o máximo 0.306 Hz (1.370 Hz, em modelo), para a frequência testada mais próxima da frequência de ressonância. A tensão gerada por onda acompanha esse crescimento atingido o máximo também para a frequência de 1.370 Hz. O valor máximo de tensão gerada por onda foi de 0.445 V. Passado o patamar de ressonância, à medida que a frequência vai aumentando, a tensão gerada diminui,

assim como o factor de amplificação dinâmica de balanço. É possível concluir assim que a tensão gerada esta intimamente ligada às oscilações de balanço do modelo simplificado. Quanto maior for a amplitude destas oscilações maior será a tensão gerada. Importa ainda referir que, pela análise comparativa entre a Tabela 17 e a Tabela 21, só começa a ser gerada tensão, para esta altura de onda, para uma amplitude de oscilações de balanço na ordem de 2° e para a frequência de 1.205 Hz.

Tabela 21 – Síntese dos resultados das tensões geradas nos ensaios com agitação regular e uma altura de onda de $H = 0.038$ m (valores em modelo).

Ensaio	Frequência (Hz)	Duração do ensaio (s)	Nº de Ondas do ensaio	Tensão total gerada no ensaio (V)	Tensão gerada por onda (V)
1	0.319	376	120	0.000	0.000
2	0.373	322	120	0.000	0.000
3	0.559	215	120	0.000	0.000
4	0.746	161	120	0.000	0.000
5	1.075	112	120	0.020	0.000
6	1.205	100	120	9.570	0.080
7	1.370	64	120	53.400	0.445
8	1.587	76	120	43.130	0.359
9	1.887	88	120	16.310	0.136

A Fig. 124 representa o gráfico da tensão gerada por onda, para os testes com agitação regular, e uma altura de onda de 0.100 m (valor em modelo).

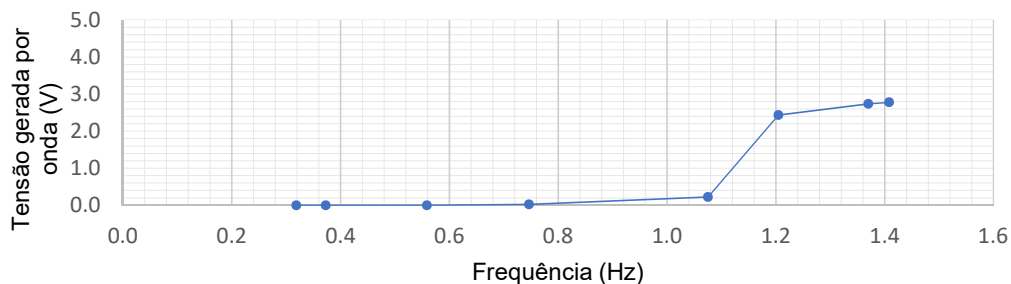


Fig. 124 – Tensão gerada por onda nos testes realizados com agitação regular e uma altura de onda de 0.100 m.

Comparando o gráficos da Fig. 110 com o gráfico da Fig. 124, verificamos que a tensão gerada por onda segue o crescimento da curva do factor de amplificação dinâmica de balanço. Até à frequência de 0.167 Hz (0.746 Hz, em modelo), a curva do factor de amplificação dinâmica de balanço é praticamente linear, variando apenas entre os valores 2.0 e 2.7, não havendo tensão gerada nessas condições. Passando a frequência de 0.167 Hz (0.746 Hz, em modelo) o factor de amplificação dinâmica sobe até atingir o máximo para a frequência de ressonância de 0.314 Hz (1.408 Hz, em modelo). A tensão gerada por onda acompanha esse crescimento atingido o máximo também para a frequência de 1.408 Hz.

O valor máximo de tensão gerada por onda foi de 2.776 V. Uma vez mais é possível observar que a tensão gerada depende das oscilações de balanço do modelo simplificado. Importa ainda referir que, pela análise comparativa entre a Tabela 18 e a Tabela 22, para esta altura de onda, só começa a ser gerada tensão para uma amplitude pico-a-pico de oscilações de balanço na ordem do 2.5° para a frequência de 0.746 Hz.

Tabela 22 – Síntese dos resultados da tensão gerada nos ensaios com agitação regular e uma altura de onda de $H = 0.100$ m (valores em modelo).

Ensaio	Frequência (Hz)	Duração do ensaio (s)	Nº de Ondas do ensaio	Tensão total gerada no ensaio (V)	Tensão gerada por onda (V)
1	0.319	376	120	0.000	0.000
2	0.373	322	120	0.000	0.000
3	0.559	215	120	0.000	0.000
4	0.746	161	120	2.490	0.021
5	1.075	112	120	26.270	0.219
6	1.205	100	120	291.560	2.430
7	1.370	88	120	327.930	2.733
8	1.408	84	120	333.060	2.776

A Fig. 125 representa, para a altura de onda de 0.038 m, a média dos *outputs* máximos de voltagem e a média do integral destes *outputs* máximos, para cada frequência testada. A Fig. 126 representa, para a altura de onda de 0.038 m, o gráfico da potência máxima para cada frequência testada. A Tabela 23 apresenta a síntese dos resultados (potência máxima, densidade de potência e energia) para os ensaios de agitação regular com altura de onda de 0.038 m.

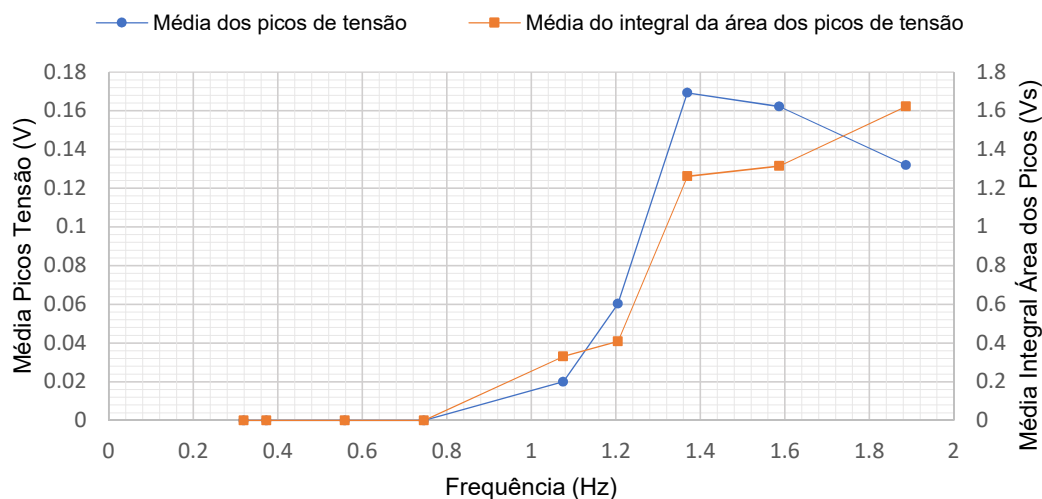


Fig. 125 – Média dos picos de tensão e média do integral da área total para os testes de agitação regular com altura de onda de 0.038 m (valores em modelo).

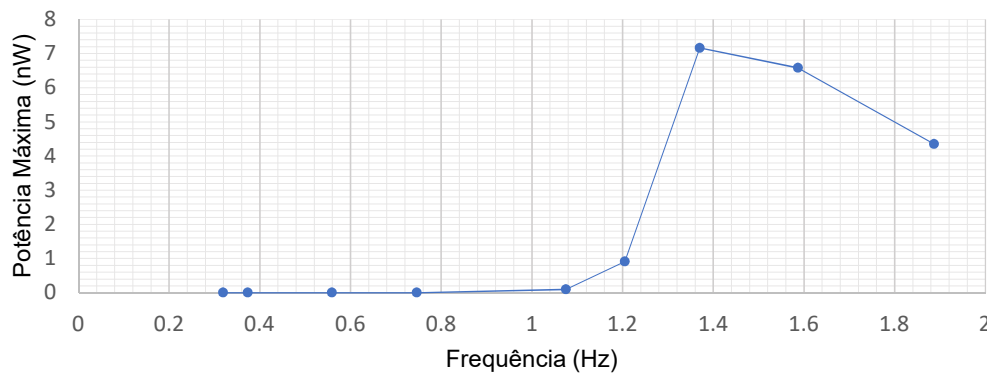


Fig. 126 – Potência máxima dos testes de agitação regular com altura de onda de 0.038 m (valores em modelo).

A análise adicional da média do integral da área dos picos permite minorar o erro na análise das tensões geradas, pois a média dos picos de tensão falha em contabilizar a evolução da tensão em função do tempo. Através da observação da Fig. 125 é possível constatar que a média dos picos de tensão (linha azul) e a média do integral da área dos picos (linha laranja) é nula até à frequência de 0.559 Hz, ou seja, até esta frequência não houve conversão da energia das ondas pelo TENG. A partir dessa frequência a linha azul apresenta um crescimento até atingir o pico (0.169 V) para a frequência de 1.370 Hz, a frequência testada mais próxima da frequência de ressonância do modelo simplificado para o modo de balanço, decrescendo para frequências superiores. A linha da média do integral da área dos picos de tensão (linha laranja) acompanha o crescimento da linha da média dos picos de tensão, mas apresenta o valor máximo (1.622 Vs), não para a frequência de ressonância, mas para a maior frequência testada, 1.887 Hz.

O gráfico das potências máximas, Fig. 126, segue a mesma evolução que a média dos picos de tensão (linha azul), atingindo o máximo de potência (7.162 nW) para a frequência de 1.370 Hz, decrescendo para frequências superiores a essa.

Tabela 23 – Síntese dos resultados: potência máxima, densidade de potência e energia. Agitação regular, altura de onda de $H = 0.038$ m (valores em modelo).

Ensaio	Frequência (Hz)	Média dos Picos de tensão (V)	Integral da área dos picos de tensão (Vs)	Potência Máxima (nW)	Densidade de potência (W/m^2)	Energia (nJ)
1	0.319	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.000
2	0.373	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.000
3	0.559	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.000
4	0.746	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.000
5	1.075	0.020	0.330	0.100	0.0000	11.200
6	1.205	0.060	0.407	0.908	0.0000	90.810
7	1.370	0.169	1.261	7.162	0.0002	630.274
8	1.587	0.162	1.315	6.582	0.0002	500.240
9	1.887	0.132	1.622	4.347	0.0001	278.234

A Fig. 127 representa, para a altura de onda de 0.100 m, a média dos *outputs* máximos de voltagem e a média do integral destes *outputs* máximos, para cada frequência testada. A Fig. 128 representa, para a altura de onda de 0.100 m, o gráfico da potência máxima para cada frequência testada.

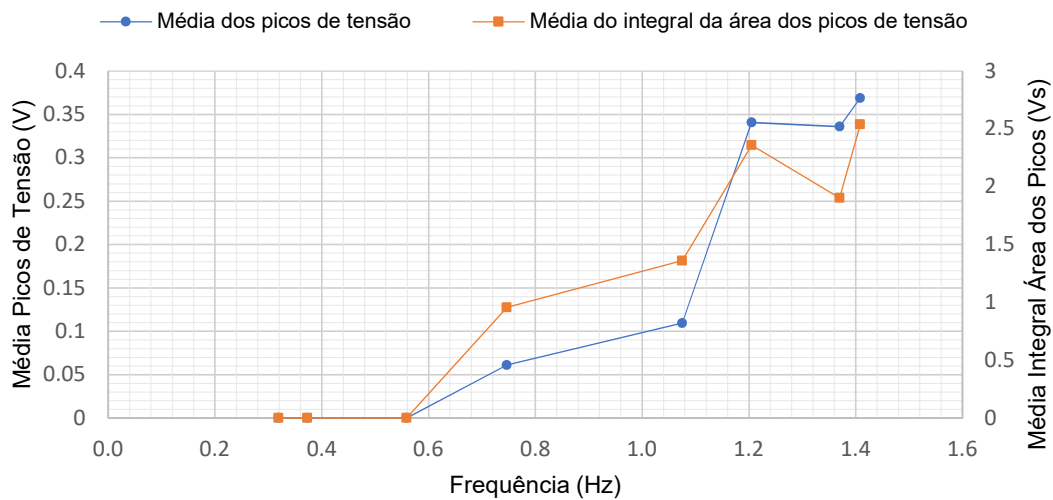


Fig. 127 – Média dos picos de tensão e média do integral da área total para os testes de agitação regular com altura de onda de 0.100 m (valores em modelo).

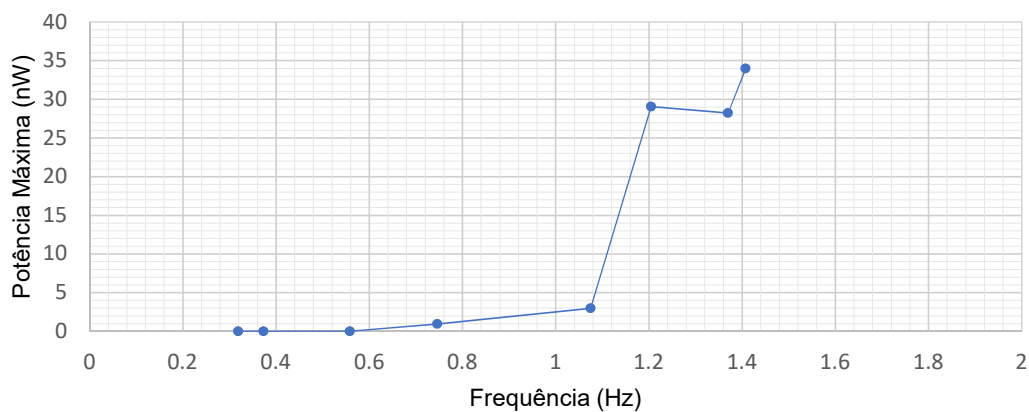


Fig. 128 – Potência máxima dos testes de agitação regular com altura de onda de 0.100 m (valores em modelo).

Através da observação da Fig. 127 podemos concluir que a média dos picos de tensão (linha azul) e a média do integral da área dos picos (linha laranja) são nulas até à frequência de 0.559 Hz, ou seja, até esta frequência não houve conversão da energia das ondas. A partir dessa frequência, a média dos picos de tensão aumenta até atingir o pico (0.369 V) para a frequência de 1.408 Hz, a frequência de ressonância do modelo simplificado para o modo de balanço, decrescendo para frequências superiores. A linha da média do integral da área dos picos de tensão (linha laranja) acompanha o crescimento da linha da média dos picos de tensão, e apresenta também o seu valor máximo (2.538 Vs) para a frequência de ressonância, 1.408 Hz. O gráfico das potências máximas, Fig. 128, segue a mesma evolução que a média dos picos de tensão (linha azul), atingindo o máximo de potência (34.0 nW) para a frequência de 1.408 Hz. A Tabela 24 apresenta a síntese dos resultados (potência máxima, densidade de potência e energia) para os ensaios realizados com agitação regular, com altura de onda de 0.100 m.

Tabela 24 – Síntese dos resultados: potência máxima, densidade de potência e energia. Agitação regular, altura de onda de $H = 0.100$ m (valores em modelo).

Ensaio	F_P (Hz)	Média dos Picos de tensão (V)	Integral da área dos picos de tensão (Vs)	Potência Máxima (nW)	Densidade de potência (W/m ²)	Energia (nJ)
1	0.319	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.000
2	0.373	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.000
3	0.559	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.000
4	0.746	0.061	0.956	0.934	0.0000	150.310
5	1.075	0.109	1.360	2.980	0.0001	333.704
6	1.205	0.341	2.359	29.038	0.0007	2 903.790
7	1.370	0.336	1.901	28.224	0.0007	2 483.710
8	1.408	0.369	2.538	34.000	0.0008	2 855.970

A densidade de potência, para a melhor condição testada: agitação regular, altura de onda 0.100 m e período de onda 0.71 s (frequência de 1.408 Hz) foi 0.0008 W/m², valor bastante aquém do esperado, uma vez que existe literatura onde TENGs para aplicações semelhantes chegaram a densidades de potência na ordem dos 0.21 W/m² (Liu *et al.*, 2019).

5.7.3.2. Agitação Irregular

Relativamente aos ensaios com agitação irregular foi feita a mesma análise. Foi calculada a média dos picos de tensão e a média integral da área dos picos para cada ensaio, através do *software OriginPro*. A Tabela 25 apresenta a síntese dos resultados obtidos em cada ensaio.

Tabela 25 – Síntese dos resultados obtidos nos ensaios com agitação irregular.

Ensaio	H_{mo} (m)	Frequência (Hz)	Média dos Picos de tensão (V)	Integral da área dos picos de tensão (Vs)	Potência Máxima (nW)	Densidade de potência (W/m ²)	Energia (nJ)
1	0.1248	0.407	0.043	0.792	0.465	0.00001	54.137
2	0.1254	0.461	0.062	0.737	0.970	0.00002	68.882
3	0.1256	0.532	0.074	0.874	1.380	0.00003	71.188
4	0.0756	0.407	0.018	0.353	0.077	0.00000	22.662
5	0.0742	0.461	0.026	0.334	0.170	0.00000	28.886
6	0.0735	0.532	0.053	0.651	0.706	0.00002	50.986
7	0.0748	0.630	0.055	0.503	0.758	0.00002	44.715
8	0.0252	0.630	0.020	0.154	0.100	0.00000	125.202
9	0.0385	1.406	0.066	0.761	1.075	0.00003	18.150
10	0.0174	1.863	0.149	1.109	5.585	0.00014	121.576

A Fig. 129 apresenta um gráfico comparativo entre os diferentes *outputs* de voltagem para as diferentes condições de agitação marítima irregular testadas (valores em modelo).

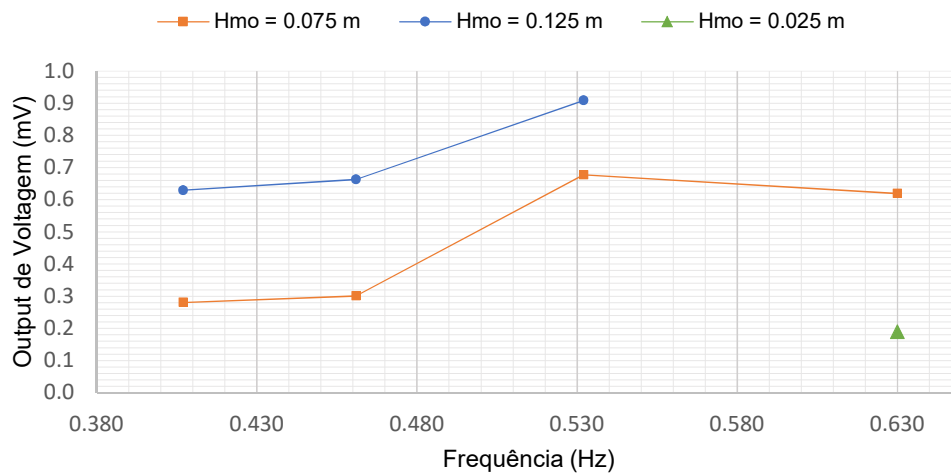


Fig. 129 – Comparação dos *outputs* de tensão (mV) para as diferentes alturas de onda testadas (agitação marítima irregular).

Este *output* de tensão em mV foi calculado através da divisão do integral da área dos picos de tensão (V_s) (obtido previamente pelo *software OriginPro*) pelo tempo de ensaio, uma vez que é necessário ter um termo de comparação entre os diferentes ensaios com agitação irregular que apresentam durações distintas. Podemos então concluir, através desta análise, que: os testes com maior altura significativa de onda ($H_{mo} = 0.125$ m, a azul) obtiveram os melhores resultados em termos absolutos e o teste com a menor altura significativa de onda ($H_{mo} = 0.025$ m, a verde) obteve o pior. É assim perceptível que com o aumento de 0.05 m (valor em modelo) na altura de onda significativa entre ensaios, os *outputs* de tensão são em média 2.25 vezes maiores. A Tabela 26 apresenta os valores obtidos de uma forma sintetizada.

Tabela 26 – Tabela comparativa dos ensaios com condições de agitação marítima irregular.

Ensaio	F_P (Hz)	T_P (s)	Duração ensaio (s)	Integral da área dos picos de tensão (V_s)	<i>Output</i> de tensão (mV)
1	0.407	2.46	1259	0.792	0.629
2	0.461	2.17	1111	0.737	0.663
3	0.532	1.88	962	0.874	0.908
4	0.407	2.46	1259	0.353	0.280
5	0.461	2.17	1111	0.334	0.300
6	0.532	1.88	962	0.651	0.677
7	0.630	1.59	813	0.503	0.619
8	0.630	1.59	813	0.154	0.189

O desempenho do TENG pode também ser avaliado através da sua eficiência. A eficiência refere-se à relação entre a potência extraída (potência produzida pelo TENG) e a potência disponível (potência da onda).

Por simplificação, neste caso usou-se o valor da potência de onda para águas profundas.

$$P_{onda} = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (104)$$

$$C_{WR} = \frac{\frac{V_{oc}^2}{4R}}{\frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e d} \cdot 100 \quad (105)$$

em que C_{WR} representa a largura de captura relativa (%), ρ a massa volúmica da água (kg.m^{-3}), g a aceleração da gravidade (m.s^{-2}), H_s a altura de onda significativa (m), T_e o período energético (s), e d o diâmetro do corpo flutuante.

A Fig. 130 apresenta uma comparação entre a largura de captura relativa dos testes realizados com agitação irregular e diferentes alturas significativas de onda testadas (valores em modelo).

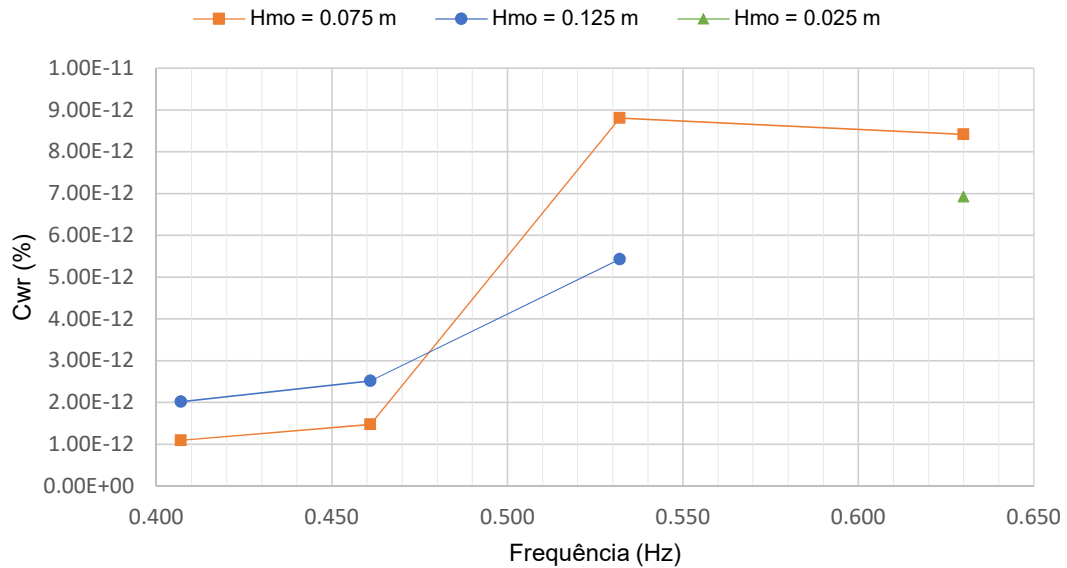


Fig. 130 – Comparação da largura de captura relativa para as diferentes alturas de onda testadas (agitação marítima irregular).

Pela observação da Fig. 130 concluímos que a largura de captura relativa aumenta com o aumento da frequência de onda de pico (e diminuição do período de onda de pico) testada, mas não depende de forma notória da altura de onda testada, uma vez que a maior e a menor largura de captura relativa foram ambas obtidas para a altura de onda média de 0.075 m. A maior menor largura de captura relativa (8.81×10^{-12}) para a frequência de pico de 0.532 Hz, e a menor largura de captura relativa (1.09×10^{-12}) para

a frequência de pico de 0.407 Hz, (valores em modelo). A Tabela 27 apresenta os valores obtidos de uma forma sintetizada.

Tabela 27 – Tabela comparativa da largura de captura relativa dos ensaios com condições de agitação marítima irregular.

Ensaio	F_P (Hz)	T_P (s)	H_{mo} (m)	C_{WR} (%)
1	0.407	2.46	0.1248	2.02×10^{-12}
2	0.461	2.17	0.1254	2.51×10^{-12}
3	0.532	1.88	0.1256	5.43×10^{-12}
4	0.407	2.46	0.0756	1.09×10^{-12}
5	0.461	2.17	0.0742	1.48×10^{-12}
6	0.532	1.88	0.0735	8.81×10^{-12}
7	0.630	1.59	0.0748	8.42×10^{-12}
8	0.630	1.59	0.0252	6.92×10^{-12}

Após toda a análise feita, concluiu-se que a produção de energia por parte do TENG e a sua eficiência, ficaram bastante aquém do esperado. Ao pensar nas razões que pudessem explicar os resultados obtidos, reflectiu-se acerca das mudanças feitas na configuração original do TENG, Fig. 92. Ao incluir a peça côncava foi necessário fabricar novas camadas triboeléctricas com a mesma forma que a peça. Devido às limitações de tempo de utilização do tanque de ondas, o método utilizado no fabrico do eléctrodo para estas novas camadas não foi o mesmo que o utilizado anteriormente, uma vez que isso iria atrasar bastante os ensaios. Assim, foi utilizado um método de fabrico mais rápido (e por isso mais grosseiro), com as novas camadas triboeléctricas a apresentar uma espessura do eléctrodo bastante superior em relação às iniciais, o que condicionou a sua adesão ao material triboeléctrico, provocou um aumento na resistência e, em última instância, condicionou os *outputs* de tensão gerada. Decidiu-se então, fazer uma comparação entre as duas configurações do TENG utilizando as mesmas condições de teste: agitação irregular, altura de onda de 0.125 m e período de onda de 1.89 s. Esta foi a condição de teste utilizada não por escolha, mas por ter sido a única das condições testadas com a configuração inicial (antes de se ter feito as alterações no TENG) que não foi perdida devido a um erro no sistema de aquisição, explicado em detalhe no capítulo 6. As Fig. 131 e Fig. 132 representam os gráficos da tensão gerada em função do para a configuração final (configuração utilizada nos ensaios) e configuração inicial do TENG, respectivamente. A Tabela 28 apresenta as diferenças entre os resultados obtidos para os dois *designs* do TENG.

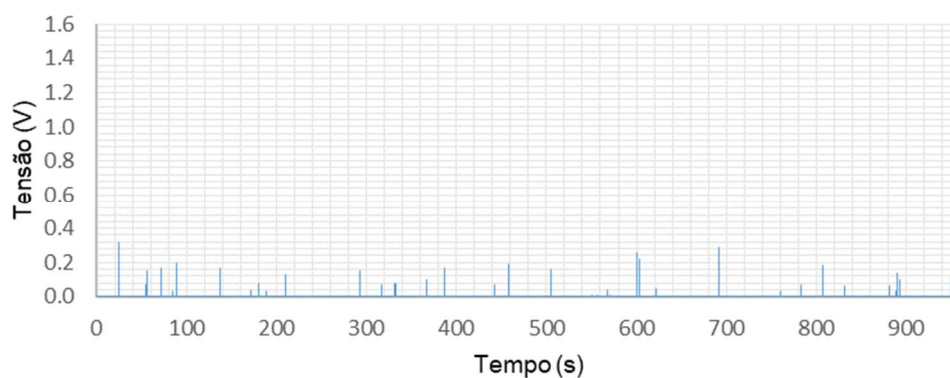


Fig. 131 – Série temporal da tensão gerada pelo TENG com a configuração final. Agitação irregular: $T_P = 1.88$ s; $H_{mo} = 0.125$ m (valores em modelo).

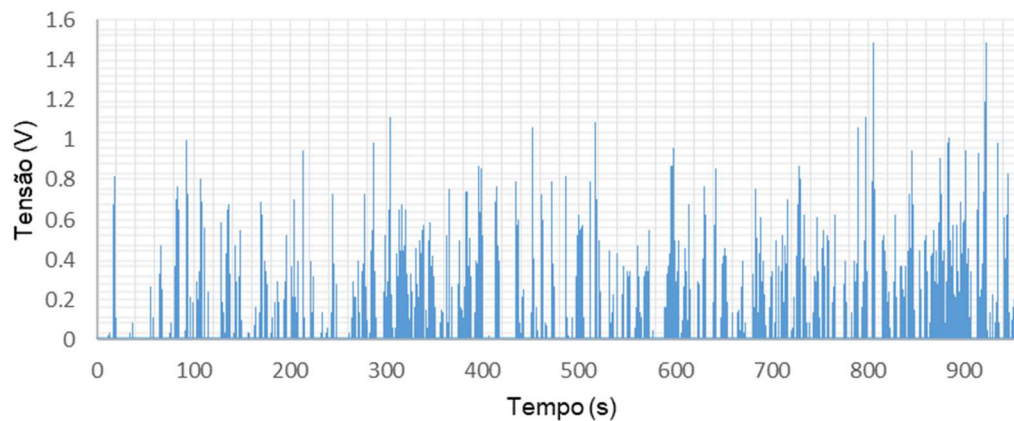


Fig. 132 – Série temporal da tensão gerada pelo TENG com a configuração inicial. Agitação irregular: $T_P = 1.88$ s; $H_{mo} = 0.125$ m (valores em modelo).

Tabela 28 – Comparação dos resultados obtidos para as duas configurações do TENG. Agitação irregular: $T_P = 1.89$ s; $H_{mo} = 0.125$ m (valores em modelo).

Design do TENG	H_{mo} (m)	F_P (Hz)	Tensão total gerada no ensaio (V)	Média dos Picos de Tensão (V)	Potência máxima (nW)
Inicial	0.125	0.532	5129.080	0.203	10.337
Final	0.125	0.532	52.780	0.074	1.369

Através deste estudo complementar é possível concluir que: embora a alteração no TENG tivesse melhorado substancialmente o rolamento das esferas, aumentado a área do nano-material e resolvido o problema da inclinação do modelo simplificado causado pela primeira configuração (Fig. 90), o facto das novas camadas triboeléctricas não terem seguido o mesmo processo de fabrico que as anteriores, condicionou em larga escala os resultados obtidos. O valor obtido da tensão total gerada no ensaio, para a configuração inicial, é cerca de 100 vezes superior à obtida para a configuração final. Já a potência máxima é cerca de 8 vezes superior. Se estas proporções fossem constantes para todos os ensaios, então, para a melhor condição testada, a potência máxima seria 272 nW e a densidade de potência seria em torno de 0.007 W/m^2 , valores bastantes superiores aos valores máximo obtidos (34 nW e 0.0008 W/m^2), mas, em todo o caso, inferiores ao esperado (Liu *et al.*, 2019).

Chega-se assim à conclusão que a energia produzida pelo TENG testado é insuficiente para servir como unidade de produção de energia de equipamentos *offshore* tendo em conta o consumo real destes equipamentos e dos sensores mais comuns neles incluídos (anexo A e anexo B, respectivamente).

5.7.4. RESPOSTA GLOBAL DA CÉLULA DE CARGA.

De forma a aumentar o número de componentes avaliadas e o interesse do estudo, integrou-se uma célula de carga na ligação entre a corrente de amarração e o modelo simplificado. A célula de carga, da marca FUTEK, é capaz de determinar as forças de tracção que a amarração exerce sobre o modelo simplificado. Este equipamento mede uma tensão que, após calibração, é convertida em N. A frequência de aquisição

foi fixada em 40 Hz. Os dados são posteriormente transmitidos pelo sistema de aquisição, em tempo real, via *wireless* para um computador, Fig. 133.

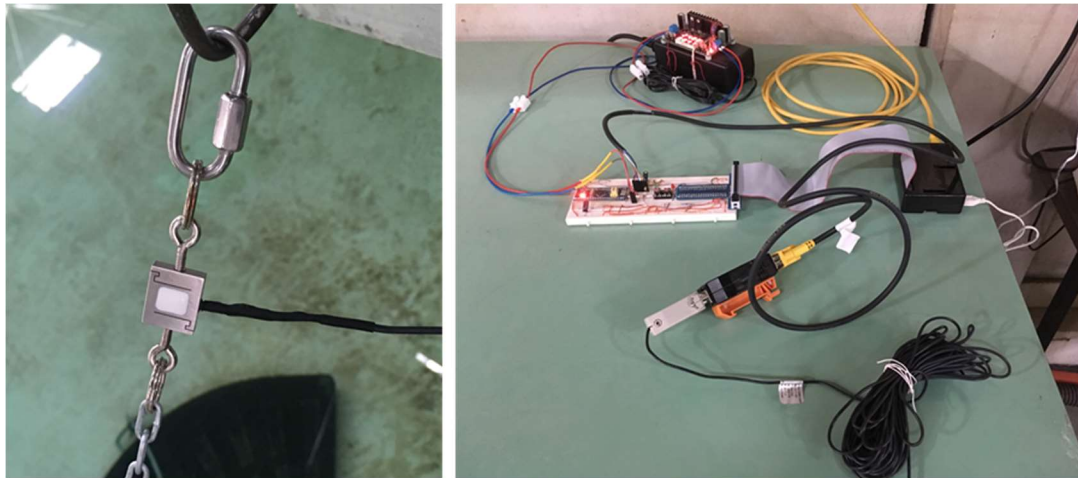


Fig. 133 – Célula de carga (esquerda) e sistema de aquisição de dados da célula de carga (direita).

Para este trabalho foi necessário fazer uma calibração inicial da célula de carga. Para esse efeito foi medida a tensão na célula para diferentes massas de valor conhecido, nomeadamente 0.25 kg, 0.5 kg, 0.75 kg, 1.0 kg e 1.92 kg, traçando posteriormente uma recta de calibração, com o objectivo de descobrir a inclinação da recta m , Fig. 134. Tendo esta inclinação é então possível transformar a tensão medida em kgf e, multiplicando, posteriormente pela aceleração da gravidade, em N.

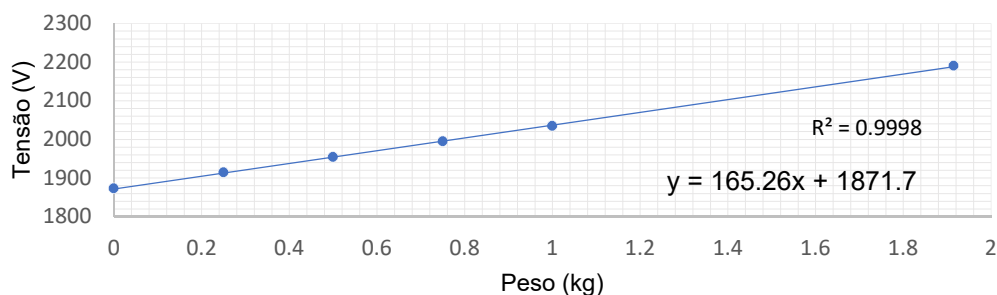


Fig. 134 – Recta obtida na calibração da célula de carga.

Após a análise dos resultados preliminares concluiu-se que a célula de carga não tinha sensibilidade suficiente para medir com exactidão as pequenas forças que se fizeram sentir na maioria dos testes, uma vez que não era possível distinguir essas medições do ruído associado ao meio em que a célula de carga estava inserida. Por esse motivo só foram considerados válidos os ensaios onde as forças medidas eram duma ordem de grandeza maior *i.e.* os ensaios de agitação regular próximos da frequência de ressonância do modelo simplificado. Foram considerados válidos 6 ensaios, apresentados nos próximos gráficos. Foi calculada a média das forças obtidas e o valor máximo obtido para os primeiros 60 s de cada ensaio. A Tabela 29 apresenta a síntese dos resultados.

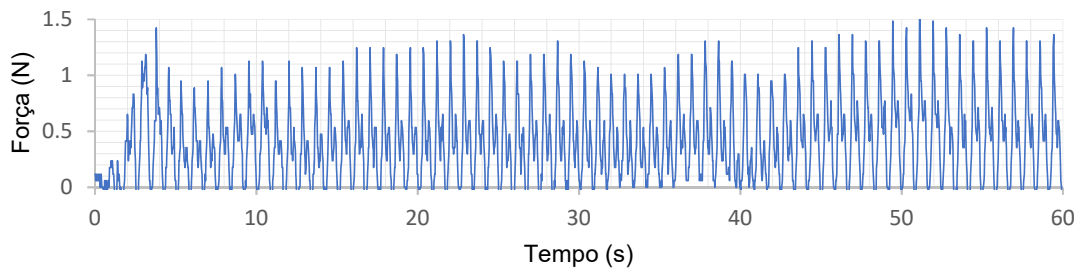


Fig. 135 – Ensaio 1 ($H=0.100$ m e $T= 0.71$ s, modelo). Valores medidos na célula de carga.

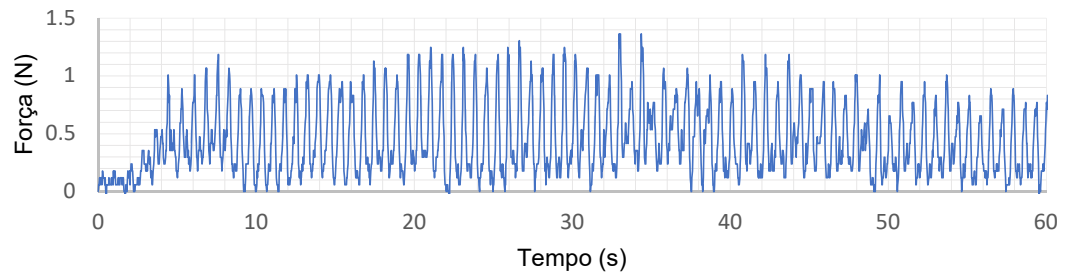


Fig. 136 – Ensaio 2 ($H=0.100$ m e $T= 0.73$ s, modelo). Valores medidos na célula de carga.

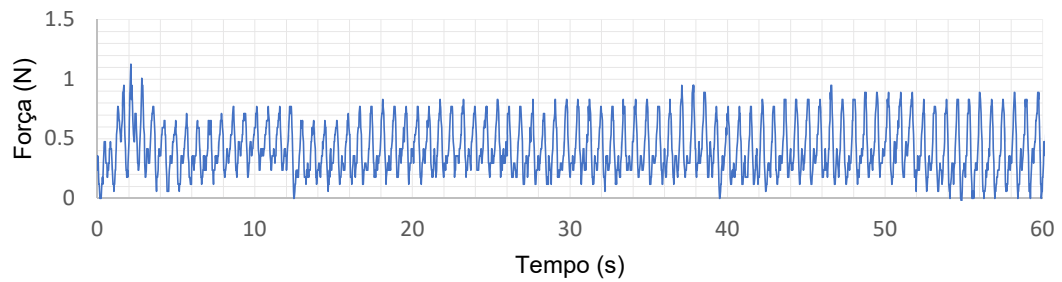


Fig. 137 – Forças aplicadas no cabo de amarração. Ensaio 3 ($H=0.100$ m e $T= 0.83$ s, modelo).

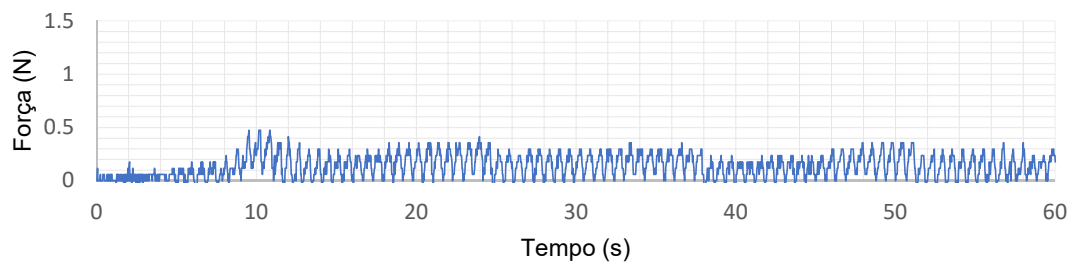


Fig. 138 – Forças aplicadas no cabo de amarração. Ensaio 4 ($H=0.038$ m e $T=0.63$ s, modelo).

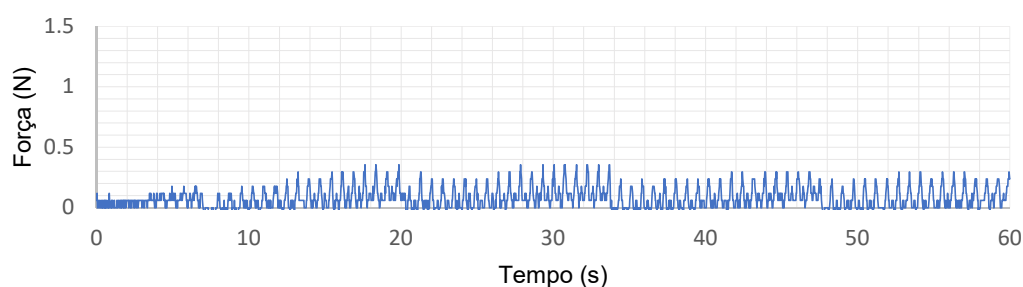
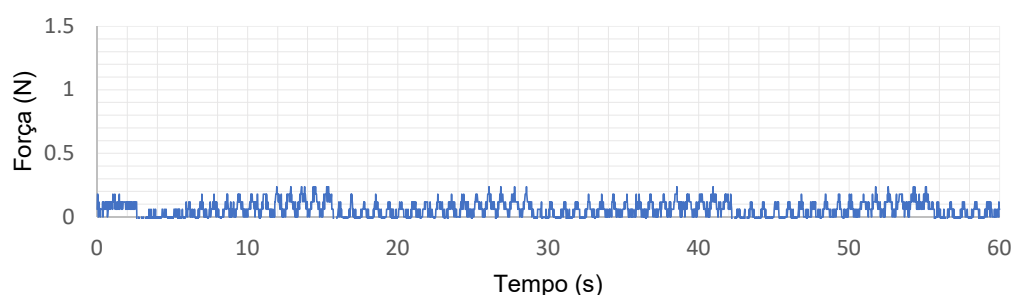
Fig. 139 – Forças aplicadas no cabo de amarração. Ensaio 5 ($H=0.038$ m e $T=0.73$ s, modelo).Fig. 140 – Forças aplicadas no cabo de amarração. Ensaio 6 ($H=0.038$ e $T=0.83$ s, modelo).

Tabela 29 – Forças aplicadas no cabo de amarração nos testes considerados válidos (valores em modelo).

Ensaio	Tipo de Agitação	H (m)	T (s)	F Média (N)	F Máxima (N)
1	Regular	0.100	0.710	0.425	1.602
2	Regular	0.100	0.730	0.427	1.365
3	Regular	0.100	0.830	0.388	1.128
4	Regular	0.038	0.630	0.139	0.475
5	Regular	0.038	0.730	0.080	0.356
6	Regular	0.038	0.830	0.054	0.237

Como seria de esperar, a força máxima no cabo de amarração foi mais elevada para o ensaio onde foi testada a altura de onda de 0.100 m e um período de onda igual ao período de ressonância do modelo simplificado para o modo de oscilação de balanço ($T = 0.71$ s). Os valores obtidos nos outros ensaios foram diminuindo progressivamente à medida que o período testado se afastava do período natural de oscilação de balanço. Conclui-se, assim, que as forças de tração aplicadas no cabo de amarração estão relacionadas com as amplitudes de oscilação de balanço, quanto mais próximo do período natural, maior serão estas oscilações e maior será a força na amarração. O grande interesse desta componente adicional do trabalho é que pode servir como referência para uma futura continuação deste estudo usando modelos numéricos, concretamente no dimensionamento dos cabos de amarração, confirmando os valores obtidos através das simulações.

A Tabela 30 apresenta a síntese dos resultados, em protótipo, das forças de tração medidas através da célula de carga colocada no cabo de amarração do modelo simplificado.

Tabela 30 – Forças aplicadas no cabo de amarração nos testes considerados válidos (valores em protótipo).

Ensaio	Tipo de Agitação	H (m)	T (s)	F Média (N)	F Máxima (N)
1	Regular	2.00	3.18	3483.61	13131.15
2	Regular	2.00	3.26	3500.00	11188.52
3	Regular	2.00	3.71	3180.33	9245.90
4	Regular	0.75	2.82	1139.34	3893.44
5	Regular	0.75	3.26	655.74	2918.03
6	Regular	0.75	3.71	442.62	1942.62

6

CONCLUSÕES

6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O grande objectivo deste trabalho preliminar no âmbito do projecto “*I.nano.WEC – Innovative nano-technology for Wave Energy Conversion*” foi iniciar o estudo experimental do sistema TENG, integrado num modelo simplificado de uma bóia à escala 1/20, quando sujeito à acção da agitação marítima. Para isso foi necessário determinar as características dinâmicas do modelo simplificado, as suas frequências de oscilação natural nos graus de liberdade estudados, e o seu comportamento sob efeito de agitação regular e irregular, para diferentes frequências e alturas de onda. Com os dados recolhidos foi então possível perceber para que gamas de alturas e períodos de onda a produção de energia é potenciada e, acima de tudo, contabilizar todas as condicionantes existentes, defeitos do sistema e possíveis melhorias, para que nos testes que se seguem, no âmbito do projecto, com o modelo real à escala 1/8 da bóia oceânica SEALITE ATLANTIC 2600 todas estas considerações já estejam devidamente acauteladas.

Os resultados obtidos com a configuração do TENG testada ficaram um pouco aquém, uma vez que a densidade de potência obtida para a condição de teste mais favorável (agitação regular e frequência de onda igual à frequência de ressonância do modelo simplificado) foi 0.0008 W/m^2 , ou seja, muito baixa em relação ao esperado, uma vez que TENGs para aplicações semelhantes chegaram a densidades de potência na ordem dos 0.21 W/m^2 (Liu *et al.*, 2019). Num esforço final para tentar perceber quais os possíveis defeitos na configuração do TENG que expliquem os resultados obtidos, concluiu-se que a elevada espessura do eléctrodo do TENG testado condicionou bastante o *output* de tensão, uma vez que aumentou bastante a resistência. O trabalho desenvolvido na presente dissertação teve bastante utilidade na medida em que ajudou o projecto a perceber quais as alterações e melhoramentos que são fundamentais implementar no *design* futuro do TENG.

6.2. CONCLUSÕES E DIFICULDADES ENCONTRADAS

Com os testes sem ondas concluiu-se que o período natural para o modo de oscilação de balanço (0.711 s) e para o modo de oscilação de arfagem (0.533 s) não sofreu alteração entre os testes com o modelo simplificado livre e os testes com o modelo simplificado amarrado (valores em modelo).

Nos ensaios com ondas regulares, através do estudo da resposta do modelo simplificado a partir da curva do factor de amplificação dinâmica, concluiu-se que: para o modo de oscilação de balanço a curva cresce de forma relativamente gradual até à frequência de onda de 0.240 Hz (1.075 Hz, em modelo) e, passando este patamar, de maneira mais abrupta até ao atingir o pico na frequência de onda de 0.314 Hz (1.408 Hz, em modelo), frequência esta que corresponde à frequência de ressonância do modelo simplificado para o modo de oscilação de balanço, decrescendo para valores próximos de zero, para frequências

superiores à frequência de ressonância. Ao contrário do que se verifica para o modo de oscilação de balanço, a curva do factor de amplificação dinâmica para o modo de oscilação de arfagem apresenta um resultado bastante diferente do esperado. Apenas se pode concluir que a curva é pouco conclusiva e que é impossível determinar com exactidão a resposta do sistema para este modo de oscilação.

O aumento da altura de onda provoca um aumento linear nas amplitudes de oscilação. É assim possível concluir que o aumento da altura de onda tem um efeito linear na resposta global do modelo simplificado à agitação para os modos de oscilação de balanço e arfagem, uma vez que as curvas do factor de amplificação dinâmica variam de maneira muito similar para ambas as alturas.

Através da análise da resposta do TENG a partir da curva da tensão gerada por onda concluiu-se que: para frequências de onda inferiores a 1.075 Hz não há tensão gerada e a tensão máxima por onda é atingida para a frequência de ressonância 1.408 Hz do modo de oscilação de balanço. O valor máximo de tensão gerada por onda foi de 2.776 V para o teste com altura de onda 0.100 m (valores em modelo). É possível concluir assim que a tensão gerada esta intimamente ligada às oscilações de balanço do modelo simplificado. Quanto maior for a amplitude destas oscilações maior será a tensão gerada, para oscilações com pouca amplitude (frequência de onda afastada da frequência de ressonância de balanço do modelo simplificado) não há produção de energia.

Através da análise da curva da média dos picos de tensão para a altura de onda de 0.100 m concluiu-se que a média dos picos de tensão aumenta até atingir o pico (0.369 V) para a frequência de onda de 1.408 Hz, decrescendo para frequências superiores. A linha da média do integral da área dos picos de tensão acompanha o crescimento da linha da média dos picos de tensão, e apresenta também o seu valor máximo 2.538 Vs para a frequência de ressonância, 1.408 Hz, sendo que o máximo de potência 34.0 nW e a densidade de potência 0.0008 W/m² também foram obtidos para esta frequência (valores em modelo).

Nos ensaios com ondas irregulares, através do estudo da curva do factor de amplificação dinâmica, para o modo de oscilação de balanço, concluiu-se que as curvas do factor de amplificação dinâmica dos diferentes testes seguem tendências similares. As curvas começam próximo de zero e crescem de forma relativamente gradual até à F_p de 0.240 Hz, a partir desta frequência o crescimento das curvas é de forma mais abrupta até alcançarem o pico que, para os testes realizados, se situou entre as F_p de 0.314 Hz e 0.332 Hz. Para F_p mais elevadas, a curva decresce para valores próximos de zero. Os picos obtidos são muito próximos da frequência de ressonância do modelo simplificado para o modo de oscilação de balanço (0.3145 Hz, em protótipo), obtida através dos ensaios de decaimento livre no tanque de ondas, em condições de águas paradas.

Através do gráfico comparativo entre os diferentes *outputs* de voltagem para as diferentes condições de agitação marítima irregular testadas concluiu-se que: os testes com maior altura significativa de onda obtiveram os melhores resultados em termos absolutos e o teste com a menor altura significativa de onda obteve o pior. É assim perceptível que com o aumento de 0.05 m (valor em modelo) na altura de onda significativa entre ensaios, os *outputs* de voltagem são em média 2.25 vezes maiores.

Por último, através da análise da largura de captura relativa dos testes com agitação irregular, concluiu-se que esta aumenta com a diminuição do período de onda de pico testada, mas não depende de forma notória da altura de onda testada, uma vez que a maior e a menor largura de captura relativa foram ambas obtidas para a altura de onda média de 0.075 m, $8.81 \times 10^{-12} \%$ e $2.02 \times 10^{-12} \%$, respectivamente (valores em modelo).

Ao longo do trabalho foram encontradas algumas dificuldades relacionadas com o sistema TENG. A principal dificuldade prendeu-se com o processo de aquisição de dados do *datalogger*. Para que um

ficheiro de dados de aquisição fosse criado era necessário ligar e desligar o *datalogger*. Este processo envolvia estar constantemente a retirar o modelo simplificado do tanque de ondas (obrigatório que o processo fosse feito fora da água, em condições secas, para não danificar o *datalogger*) desligar e voltar a ligar para criar um ficheiro de dados diferente para cada ensaio e, por fim, recolocar o modelo simplificado na correcta posição no tanque de ondas. Todo este processo envolvia, não só, bastante tempo, como também trazia a necessidade acrescida da constante monitorização do tempo de início de aquisição e tempo de cada ensaio, uma vez que o *datalogger* começa a fazer a aquisição dos dados a partir do momento em que é ligado, fora da água, antes de começar o ensaio. Por simplificação e devido às limitações no tempo de ocupação do tanque de ondas, escolheu-se fazer três ensaios por cada ficheiro de aquisição. Seria importante que, com o avançar do projecto, fosse desenvolvido um *datalogger* com a opção de desligar e ligar remotamente, esta alteração simplificava bastante todo o processo de aquisição de dados.

A segunda dificuldade foi provocada pela falta de informação sobre a autonomia da bateria que fornece energia ao *datalogger*, e a um erro de origem na concepção do sistema de aquisição. Sempre que o *datalogger* ficava sem bateria, ocorria um *reset* automático a todos os ficheiros de dados que estivessem guardados no cartão de memória inserido. A conjugação do desconhecimento sobre a autonomia da bateria com o erro de origem, levou a que no final do primeiro dia de ensaios a bateria tivesse acabado e todos os dados desse dia tivessem sido perdidos. A partir desse momento foi necessário, para precaver, ir guardando os ficheiros de dados obtidos no computador o que implicava um gasto de tempo adicional. Nos trabalhos futuros seria importante ter informações concretas sobre a autonomia da bateria e que este *reset* dos dados fosse corrigido.

Por último, o elevado número de componentes e sistemas em constante monitorização, apresentava uma dificuldade por si só. Durante os ensaios foi necessário iniciar as aquisições e monitorizar simultaneamente o sistema de aquisição da agitação marítima (sonda hidrodinâmica), o sistema de geração de ondas *WaveMaker*, o sistema de aquisição de movimentos *Qualisys*, o sistema de aquisição de dados do TENG e o sistema de aquisição da Célula de Carga FUTEK. Assim, existe um erro associado ao facto das aquisições de dados, dos diferentes componentes, não se terem iniciado ao mesmo tempo. Houve sempre um desfasamento de alguns segundos entre o início da aquisição de dados da agitação e do TENG e o começo da aquisição dos movimentos e da célula de carga.

6.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Com base nas observações efectuadas e nos resultados que foram obtidos no estudo realizado conclui-se que existem alguns pontos fundamentais a melhorar no sistema TENG. Para além de corrigir os problemas mencionados anteriormente, seria importante, nos trabalhos futuros, utilizar sempre TENGs com os eléctrodos elaborados a partir do processo de fabrico mais complexo e demorado, para que a sua espessura seja menor. Com este trabalho ficou claro que, de outra forma, a adesão entre o material triboelétrico e o eléctrodo fica condicionada e a conversão da energia é severamente afectada. Por outro lado, verificou-se que, para frequências de agitação próximas da frequência de ressonância de balanço, as esferas chocam com frequência contra as paredes do TENG. Prolongando as camadas triboelétricas até as paredes, e aproveitando estes impactos, optimizava-se ainda mais a capacidade de conversão da energia da ondulação, por parte do TENG.

Será também importante realizar estudos adicionais para identificar o conjunto de características do TENG que maximiza a produção de energia. A realização de um estudo para determinar a concavidade que potencia a energia convertida, a optimização do número de esferas e a definição da massa das esferas que maximiza os resultados obtidos, uma vez que este modo de operação do TENG depende da circulação sobre a camada superior de uma massa que promove o contacto entre as camadas triboelétricas, são etapas essenciais.

Mantendo os mesmos objectivos, isto é, utilizar apenas os movimentos de balanço (ou cabeceio) do equipamento *offshore* como meio de produção de energia, será necessário porventura equacionar a alteração do modo de operação do TENG, passando do modo por contacto para o modo por esferas rolantes. Este último é, em teoria, é o mais indicado para este tipo de aproveitamentos. De outro modo será necessário alterar totalmente o *design* do TENG para um *design* que permita converter a energia das oscilações noutros graus de liberdade, nomeadamente as oscilações de arfagem, uma vez que, utilizando esferas rolantes a produção de energia depende totalmente das oscilações de balanço do equipamento *offshore* onde o TENG está incluído.

Aproveitando o facto de que esta tecnologia permite ter vários patamares de TENGs em paralelo (ou em série) a funcionar em conjunto na conversão da energia das ondas, seria interessante desenvolver um TENG com pelo menos três patamares em altura diferentes. O patamar mais alto seria responsável pela conversão da energia das oscilações de balanço e cabeceio (as bóias oceânicas são normalmente axissimétricas, logo as oscilações de balanço são iguais às de cabeceio) para isso seria utilizado um TENG similar ao testado neste trabalho. No patamar intermédio estaria um TENG com o modo de operação deslizante para converter os movimentos de avanço, por fim, no patamar inferior estaria um TENG com o modo de operação por contacto que, em teoria, utilizando molas para promover o contacto entre as camadas triboelétricas é capaz de converter as oscilações de arfagem (Jiang *et al.*, 2017). Estaria assim garantida uma continua produção de energia.

Por outro lado, os estudos futuros deverão ser elaborados com o modelo real da bóia SEALITE ATLANTIC 2600 uma vez que a geometria do casco e a distribuição de massas reproduzida de forma rigorosa, assegurando que as forças hidrodinâmicas exercidas sobre o modelo da bóia serão reproduzidas segundo a semelhança de *Froude*, e que serão reproduzidas correctamente as características oscilatórias da bóia no modelo físico, aproxima o projecto duma demonstração em ambiente real. Um estudo para perceber qual a melhor disposição do TENG no interior do modelo real para potenciar a energia produzida também seria pertinente.

O uso da modelação numérica, validada através dos resultados experimentais, também deveria fazer parte dos estudos futuros, uma vez que permite facilmente o teste de novas condições.

Por último, será importante testar não só as condições mais frequentes de agitação marítima de um determinado caso de estudo escolhido, mas também as condições extremas (*i.e.* analisar a sobrevivência). A realização de testes de fadiga, de longa duração, será crucial para perceber qual a resposta do TENG, não só do ponto de vista da produção de energia, como também permitirá avaliar a resistência e durabilidade dos seus componentes, nomeadamente das camadas triboelétricas, uma vez que o rolamento prolongado das esferas é passível de causar danos a longo prazo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AANDERAA (2019) - Sensors and complete systems for monitoring in aquaculture [Em linha]. [Consult. 21-02-2019]. Disponível em WWW: <URL: <https://www.aanderaa.com/applicationsdetail.php?Aquaculture-15>>.
- AHSAN, Dewan [et al.] (2019) - Why does the offshore wind industry need standardized HSE management systems? An evidence from Denmark. Renewable Energy [Em linha]. 136: 691-700. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119300345>>. ISSN 0960-1481.
- ALMARIN (2019) - Aids to Navigation [Em linha]. [Consult. 15-03-2019]. Disponível em WWW: <URL: <https://www.almarin.es/en/aids-to-navigation>>.
- ANDRÉ, Rui Alexandre Aranda (2010) - Modelação de um Sistema de Conversão de Energia das Ondas. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- ARGO (2016) - How Argos Floats Work. Disponível em WWW: <http://www.argo.ucsd.edu/How_Argo_floats.html>.
- BAKER, NJ; MUELLER, Markus A (2001) - Direct drive wave energy converters. [Em linha].
- BARANOVA, Olga (2015) - World ocean atlas 2005. [Em linha].
- BARKAS, D. A. [et al.] (2019) - Sustainable Energy Harvesting through Triboelectric Nano – Generators: A Review of current status and applications. Energy Procedia [Em linha]. 157: 999-1010. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218312402>>. ISSN 1876-6102.
- BERESFORD, PJ (2010) - Ballasting moored model ships – Technical Note
- BIROL, Fatih %J Paris: International Energy Agency (2008) - World energy outlook. [Em linha]. 23:4. 329.
- BOTSFORD, Louis W; CASTILLA, Juan Carlos; PETERSON, Charles H %J Science (1997) - The management of fisheries and marine ecosystems. [Em linha]. 277:5325. 509-515. ISSN 0036-8075.
- BRITANNICA, Encyclopædia (2019) - Anemometer. Disponível em WWW: <<https://www.britannica.com/technology/anemometer>>.
- CABRAL, Tomás Barreira Calheiros Barbosa (2018) - Avaliação do Desempenho de um Sistema Híbrido de Aproveitamento da Energia das Ondas para o Quebramar Norte de Leixões. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- CASTRO, Sandra L.; WICK, Gary A.; EMERY, William J. (2012) - Evaluation of the relative performance of sea surface temperature measurements from different types of drifting and moored buoys using satellite-derived reference products. [Em linha]. 117:C2. Disponível em WWW: <URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2011JC007472>>.
- CENTRE, Met Office Hadley (2015) - Met Office Hadley Centre observations datasets [Em linha]. [Consult. 14-03-2019]. Disponível em WWW: <URL: <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadnmat2/>>.
- CHAKRABARTI, S. K. (1987) - Hydrodynamics of offshore structures: Mathematical theory and its applications in structures.
- CHENG, Fang [et al.] (2017) - Design and optimization of an inductively coupled power transfer system for the underwater sensors of ocean buoys. Energies [Em linha]. 10:1. 84 (18 pp.). Disponível em WWW: <URL: <http://dx.doi.org/10.3390/en10010084>>. ISSN 1996-1073.
- CHENG, Ping [et al.] (2019) - Largely enhanced triboelectric nanogenerator for efficient harvesting of water wave energy by soft contacted structure. Nano Energy [Em linha]. 57: 432-439. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285518309674>>. ISSN 2211-2855.
- CHITAS, Bárbara (2017) - Sistema de Balizagem Marítima- Aprenda o que é! [Em linha]. [Consult. 05-06-2019]. Disponível em WWW: <URL: <https://seagirl.pt/curiosidades/sistema-balizagem-maritima/>>.

- COMMERCE, U.S. Dept. of (2018) - National Data Buoy Center. National Oceanic and Atmospheric Administration's. Disponível em WWW: <https://www.ndbc.noaa.gov/station_page.php?station=44031>.
- CRUZ, João MBP; SARMENTO, António JNA (2004) - Energia das ondas: introdução aos aspectos tecnológicos, económicos e ambientais. ISBN 9728577117.
- CRUZ, Nuno; ALVES, Jose C (2008) - Ocean sampling and surveillance using autonomous sailboats. 2008.
- DBCP (2019) - Data Buoy Types. Data Buoy Cooperation Panel. Disponível em WWW: <<http://www.jcommops.org/dbcp/platforms/types.html>>.
- DREW, B.; PLUMMER, A. R.; SAHINKAYA, M. N. (2016) - A review of wave energy converter technology. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy [Em linha]. 223:8. 887-902. ISSN 0957-6509
- 2041-2967.
- DUCKERS, Les %J Renewable Energy: Power for a Sustainable Future (2004) - Wave energy. [Em linha]. 2: 297-340.
- FALCÃO, António F. de O. (2010) - Wave energy utilization: A review of the technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews [Em linha]. 14:3. 899-918. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109002652>>. ISSN 1364-0321.
- FALCÃO, António F. O. [et al.] (2014) - Air turbine choice and optimization for floating oscillating-water-column wave energy converter. Ocean Engineering [Em linha]. 75: 148-156. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801813003892>>. ISSN 0029-8018.
- FALNES, Johannes (2002) - Ocean Waves and Oscillating Systems: Linear Interactions Including Wave-Energy Extraction. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 9780521782111.
- FREITAS, António José Carneiro de (2013) - A aquicultura marinha offshore: desafios e oportunidades para a inovação e sustentabilidade do negócio.
- GOMES, Diogo Nunes de Pinho Leal (2014) - Avaliação de geração de ondas por acção do vento e de embarcações em Albufeiras. Estudo de Caso. Universidade do Porto.
- GOMES, Fernando Veloso (2007) - Agitação Marítima - Geração e teoria linear
- HALL, C. Michael (2001) - Trends in ocean and coastal tourism: the end of the last frontier? Ocean & Coastal Management [Em linha]. 44:9. 601-618. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964569101000710>>. ISSN 0964-5691.
- HAO, Congcong [et al.] (2019) - Two-dimensional triboelectric-electromagnetic hybrid nanogenerator for wave energy harvesting. Nano Energy [Em linha]. 58: 147-157. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285519300424>>. ISSN 2211-2855.
- HENRIQUES, J. C. C. [et al.] (2016) - Design of oscillating-water-column wave energy converters with an application to self-powered sensor buoys. Energy [Em linha]. 112: 852-867. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216308283>>. ISSN 0360-5442.
- HONG, Sinpyo [et al.] (2015) - An experimental study of the effect of mooring systems on the dynamics of a SPAR buoy-type floating offshore wind turbine. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering [Em linha]. 7:3. 559-579. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2092678216300656>>. ISSN 2092-6782.
- HUANG, R. X. (2015) - OCEANOGRAPHIC TOPICS | Thermohaline Circulation. In Gerald R. NORTH, PYLE, John & ZHANG, Fuqing Encyclopedia of Atmospheric Sciences (Second Edition). Oxford: Academic Press. ISBN 978-0-12-382225-3. p. 315-328.
- ILYAS, Arqam [et al.] (2014) - Wave electrical energy systems: Implementation, challenges and environmental issues. Renewable and Sustainable Energy Reviews [Em linha]. 40: 260-268. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114005371>>. ISSN 1364-0321.

- IMO (2015) - Third IMO Greenhouse Gas Study 2014 London: Suffolk MICROPRESS PRINTERS, UK.
- IMOS (2019) - Your access to IMOS Wireless Sensor Network data discovery and exploration is through the Australian Ocean Data Network (AODN) Portal. [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <URL: <http://imos.org.au/facilities/wirelessensornetworks/wsn-data/>>].
- IOI (2010) - World Ocean Review. International Ocean Institute maribus.
- ISERN-FONTANET, Jordi [et al.] (2017) - Remote sensing of ocean surface currents: A review of what is being observed and what is being assimilated.
- ISTOCKPHOTO (2019) - Offshore Aquaculture Fish Farms Disponível em WWW: <<https://www.istockphoto.com/pt/v%C3%ADdeo/offshore-aquaculture-fish-farms-gm867519854-144240229>>.
- JANARDHANAN, Sheeja; KRISHNANKUTTY, P. (2007) - Motion Analysis Of A Discus Buoy In Free-Floating and Moored Conditions.
- JIANG, Tao [et al.] (2017) - Spring-assisted triboelectric nanogenerator for efficiently harvesting water wave energy. Nano Energy [Em linha]. 31: 560-567. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285516305699>>. ISSN 2211-2855.
- JOHNSON, David (2002) - Environmentally sustainable cruise tourism: a reality check. Marine Policy [Em linha]. 26:4. 261-270. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308597X02000088>>. ISSN 0308-597X.
- JOURNÉE, JMJ; MASSIE, WW (2001) - Offshore Hydromechanics. [Em linha].
- KENT, Elizabeth C.; TIDY, Raoul J.; TAYLOR, Peter K. (1993) - Correction of Marine Air Temperature Observations for Solar Radiation Effects. [Em linha]. 10:6. 900-906. Disponível em WWW: <URL: <https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0426%281993%29010%3C0900%3ACOMATO%3E2.0.CO%3B2>>.
- KUMAR, Radika [et al.] (2019) - The effectiveness of fisheries subsidies as a trade policy tool to achieving sustainable development goals at the WTO. Marine Policy [Em linha]. 100: 132-140. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308597X18304822>>. ISSN 0308-597X.
- KUMAR, Vinod; SHRIVASTAVA, R. L.; UNTAWALE, S. P. (2015) - Solar Energy: Review of Potential Green & Clean Energy for Coastal and Offshore Applications. Aquatic Procedia [Em linha]. 4: 473-480. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214241X15000632>>. ISSN 2214-241X.
- LETELIER, R. M. [et al.] (1996) - Seasonal and interannual variations in photosynthetic carbon assimilation at Station. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography [Em linha]. 43:2. 467-490. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0967064596000069>>. ISSN 0967-0645.
- LIGTERINGEN, H; MOES, J (2001) - Motions of moored ships in long waves. 2001.
- LIU, Wenbo [et al.] (2019) - Torus structured triboelectric nanogenerator array for water wave energy harvesting. Nano Energy [Em linha]. 58: 499-507. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285519300667>>. ISSN 2211-2855.
- LNEC (2017) - Estudos em modelo físico e numérico do prolongamento do quebra-mar exterior e das acessibilidades marítimas do porto de Leixões.
- MAGAGNA, Davide; UIHLEIN, Andreas (2015) - Ocean energy development in Europe: Current status and future perspectives. International Journal of Marine Energy [Em linha]. 11: 84-104. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214166915000181>>. ISSN 2214-1669.
- MAGAZINE, Offshore Wind (2013) - Hydrosphere Launches New Light and Buoy Rental Service Navingo Media Group. Disponível em WWW: <URL: https://www.offshorewind.biz/2013/01/29/hydrosphere-launches-new-light-and-buoy-rental-service-uk/hydrosphere-launches-new-light-and-buoy-rental-service_uk/>.
- MARINEYE (2017) - Investigadores portugueses criam sistema para monitorizar oceanos. [Em linha]. [Consult. 21-02-2019]. Disponível em WWW: <URL:

- <http://marineye.ciimar.up.pt/investigadores-portugueses-criam-sistema-para-monitorizar-oceanos/>>.
- MEINDL, A (1996) - Guide to Moored Buoys and Other Ocean Data Acquisition Systems. [Em linha].
- MOURA PAREDES, Guilherme (2008) - Estudo experimental de um sistema offshore para produção de energia das ondas.
- NILSSON, James W; RIEDEL, Susan (2010) - Electric circuits. Prentice Hall Press. ISBN 0136114997.
- NOAA (2010) - What's a Drifter. National Oceanic and Atmospheric Administration [Em linha]. 24-02-2019. Disponível em WWW: <URL: http://www.aoml.noaa.gov/phod/dac/gdp_drifter.php#transmission>.
- (2013) - 2013 State of the Climate: Humidity Disponível em WWW: <URL: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/2013-state-climate-humidity>>.
- NWS (2015) - Origin of Wind. National Weather Service. Disponível em WWW: <<https://www.weather.gov/jetstream/wind>>.
- O'HAGAN, A. M. [et al.] (2016) - Wave energy in Europe: Views on experiences and progress to date. International Journal of Marine Energy [Em linha]. 14: 180-197. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214166915000338>>. ISSN 2214-1669.
- OCEANOGRAPHY, University of Washington School of (2019) - Ocean 330 Marine Biogeochemical Cycles [Em linha]. [Consult. 14-03-2019]. Disponível em WWW: <URL: https://www.ocean.washington.edu/story/OCEAN_330_Marine_Biogeochemical_Cycles>.
- OCEANRESOURCE (2017) - Offshore Surveillance. Ocean Energy and Resource Ltd. Disponível em WWW: <<http://www.oceanresource.co.uk/offshore-surveillance.html>>.
- OOI (2018) - Moorings. Ocean Observatories Initiative. Disponível em WWW: <<https://oceanobservatories.org/marine-technologies/moorings/>>.
- PHYS (2019) - Offshore wind farms – measuring buoy reduces costs [Em linha]. [Consult. 10-03-2019]. Disponível em WWW: <URL: <https://phys.org/news/2015-12-offshore-farms-buoy.html>>.
- RATCLIFF, David (2015) - Corilla Marine's most sophisticated buoys yet [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <URL: <https://corillamarine.com/corilla-marines-sophisticated-buoys-yet/>>.
- RECUERO VIRTO, Laura (2018) - A preliminary assessment of the indicators for Sustainable Development Goal (SDG) 14 “Conserve and sustainably use the oceans, seas and marine resources for sustainable development”. Marine Policy [Em linha]. 98: 47-57. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308597X18301131>>. ISSN 0308-597X.
- RODRIGUES, Jean-Paul (2010) - Maritime transportation: drivers for the shipping and port industries. 2010.
- ROSA-SANTOS, Paulo Jorge (2010) - Análise da interacção de navios com dispositivos de acostagem e amarração.
- Estudo em modelo físico do posto “A” do terminal de petroleiros do porto de Leixões. Universidade do Porto.
- SCHMIDT, Wiebke [et al.] (2018) - Design and operation of a low-cost and compact autonomous buoy system for use in coastal aquaculture and water quality monitoring. Aquacultural Engineering [Em linha]. 80: 28-36. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144860917302133>>. ISSN 0144-8609.
- SEALITE (2019) - Construction Phase And Permanent Marking [Em linha]. [Consult. 10-03-2019]. Disponível em WWW: <URL: <https://www.sealite.com/offshore-windfarm/>>.
- SHRHA (2018) - Laboratório de Hidráulica - Descrição e funcionamento do equipamento [Em linha]. [Consult. 11 de junho 2018]. Disponível em WWW: <URL: https://paginas.fe.up.pt/~shrha/laboratorios/desc_func.html>.
- SOREIDE, N. N.; WOODY, C. E.; HOLT, S. M. (2001) - Overview of ocean based buoys and drifters: Present applications and future needs. Oceans Conference Record (IEEE) [Em linha]. 4: 2470-2472. Disponível em WWW: <URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->

[0035676484&doi=10.1109%2fOCEANS.2001.968388&partnerID=40&md5=9ec4cb16fd8e4e653c3da2a23646025c](https://doi.org/10.1109/OCEANS.2001.968388&partnerID=40&md5=9ec4cb16fd8e4e653c3da2a23646025c)

<https://ieeexplore.ieee.org/document/968388/>.

STOJANOVIC, T. A.; FARMER, C. J. Q. (2013) - The development of world oceans & coasts and concepts of sustainability. *Marine Policy* [Em linha]. 42: 157-165. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308597X13000481>>. ISSN 0308-597X.

STUDENT-ENERGY (2018) - *Offshore Oil* [Em linha]. [Consult. 12-03-2019]. Disponível em WWW: <URL: <https://www.studentenergy.org/topics/offshore-oil/>>.

TAKAO, Manabu; SETOGUCHI, Toshiaki (2012) - *Air Turbines for Wave Energy Conversion*.

TANG, Wenqing [et al.] (2014) - Validation of Aquarius sea surface salinity with in situ measurements from Argo floats and moored buoys. [Em linha]. 119:9. 6171-6189. Disponível em WWW: <URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2014JC010101>>.

TAVEIRA-PINTO, F. [et al.] (2007) - *O Novo Sistema de Geração e Aquisição de Agitação Marítima do Laboratório de Hidráulica da FEUP*.

TAVEIRA-PINTO, Francisco (2012) - *Modelação Física - Physical Modelling: Apontamentos de Trabalhos Marítimos 2*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

TECHNOLOGIES, AXYS (2019) - *Oil & Gas Environmental Monitoring* [Em linha]. [Consult. 15-03-2019]. Disponível em WWW: <URL: <http://axystechnologies.com/solutions/oil-gas-environmental-monitoring/>>.

TIDELAND (2017) - *Offshore Systems* [Em linha]. [Consult. 08-03-2019]. Disponível em WWW: <URL: <http://www.tidelandsignal.com/applications/offshore-systems>>.

--- (2019) - *Offshore Wind Farms* [Em linha]. [Consult. 10-03-2019]. Disponível em WWW: <URL: <http://www.tidelandsignal.com/applications/offshore-wind-farms>>.

TODALSHAUG, Jørgen (2017) - Hydrodynamics of WECs. In p. 139-158.

VARANDA, André Teodoro (2015) - *Estudo experimental de um dispositivo flutuante de energia das ondas de tipo coluna de água oscilante com quatro graus de liberdade*. Técnico Lisboa.

VISBECK, Martin [et al.] (2014) - Securing blue wealth: The need for a special sustainable development goal for the ocean and coasts. *Marine Policy* [Em linha]. 48: 184-191. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308597X14000773>>. ISSN 0308-597X.

WANG, Xiaonan [et al.] (2018) - Optimization and control of offshore wind systems with energy storage. *Energy Conversion and Management* [Em linha]. 173: 426-437. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418308148>>. ISSN 0196-8904.

WHOI (2004) - *Ocean-Bottom Seismograph* [Em linha]. [Consult. 26-02-2019]. Disponível em WWW: <URL: <http://www.whoi.edu/page.do?pid=9779&tid=7342&cid=10347>>.

--- (2018) - *Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)* [Em linha]. [Consult. 24-02-2019]. Disponível em WWW: <URL: <http://www.whoi.edu/page.do?pid=8415&tid=7342&cid=819>>.

--- (2019) - *How moored profilers work* [Em linha]. [Consult. 23-02-2019]. Disponível em WWW: <URL: <http://www.whoi.edu/page.do?pid=116816&cl=94394&tid=5762>>.

YSI (2018) - *Aquaculture* [Em linha]. [Consult. 09-03-2019]. Disponível em WWW: <URL: <https://www.ysi.com/applications/aquaculture>>.

--- (2019) - *Parameters*. Disponível em WWW: <<https://www.ysi.com/parameters>>.

ZACARIAS, Nuno (2011) - *Caracterização da agitação marítima no arco litoral Tróia-Sines e sua relação com o padrão morfodinâmico da praia emersa*.

ANEXO A

FICHAS TÉCNICAS: BÓIAS

Ficha Técnica – Bóia ATLANTIC-2600

Modelo: ATLANTIC-2600.

Fabricante: SEALITE (www.sealite.com).

Tipo de Equipamento: Bóia Amarrada.

Função: Dispositivo de Assinalamento.

Durabilidade: 20 anos.

Peso: 970 kg.

Características/Dimensões: A bóia é rotomoldada em polietileno virgem estabilizado por UV com um reforço interno em aço inoxidável. Tem uma altura de 4.12 m e diâmetro de 2.6 m. Pode ser equipada com marcas e luzes de acordo com qualquer recomendação da IALA. Lanterna LED e um radar reflector interno *Echomax* (10m²).

Comunicação/Telemetria: AIS, GSM.

Energia: Alimentada a energia solar, dois painéis solares.

Sensores: Nenhum.

Configuração:

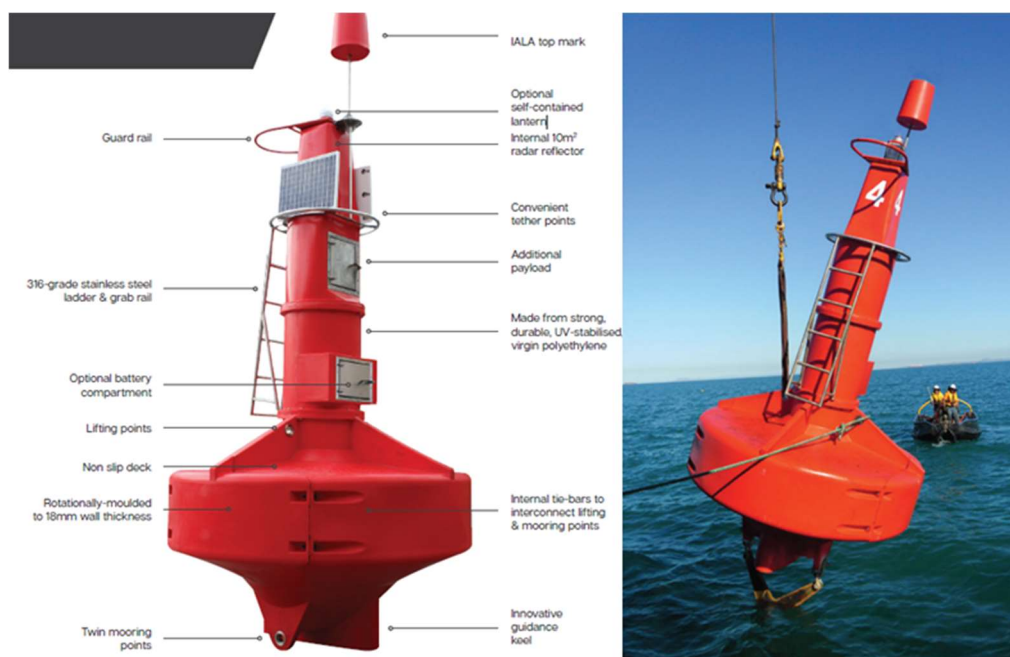


Fig. 1 – Configuração de uma bóia ATLANTIC-2600.

Ficha Técnica – Bóia ATLANTIC-3000

Modelo: ATLANTIC-3000.

Fabricante: SEALITE (www.sealite.com).

Tipo de Equipamento: Bóia Amarrada.

Função: Dispositivo de Assinalamento.

Durabilidade: 20 anos.

Peso: 1825 kg.

Características/Dimensões: A bóia é rotomoldada em polietileno virgem estabilizado por UV com um reforço interno em aço inoxidável. Tem uma altura de 6.10 m e diâmetro de 3.0 m. Pode ser equipada com marcas e luzes de acordo com qualquer recomendação da IALA. Lanterna LED e um radar refletor interno *Echomax* (10m²).

Comunicação/Telemetria: AIS, GSM.

Energia: Alimentada a energia solar, dois painéis solares.

Sensores: Nenhum.

Configuração:

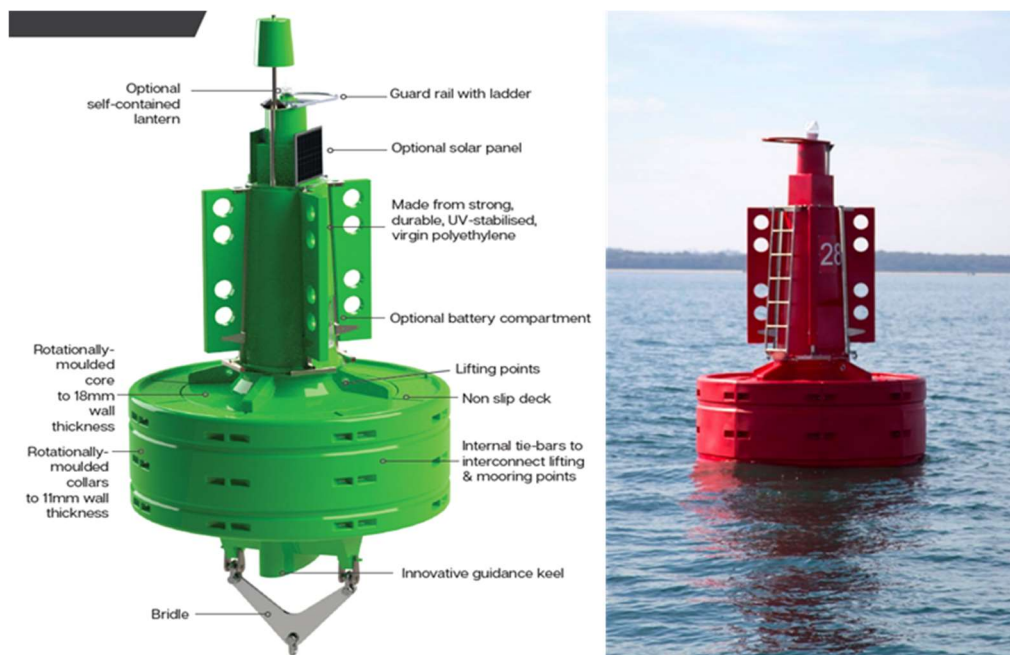


Fig. 2 – Configuração de uma bóia ATLANTIC-3000.

Ficha Técnica – Bóia NAUTILUS-2200

Modelo: NAUTILUS-2200.

Fabricante: SEALITE (www.sealite.com).

Tipo de Equipamento: Bóia Amarrada.

Função: Dispositivo de Assinalamento.

Durabilidade: 20 anos.

Peso: 830 kg.

Características/Dimensões: A bóia é rotomoldada em polietileno virgem estabilizado por UV com um reforço interno em aço inoxidável. Tem uma altura de 4.12 m e diâmetro de 2.2 m. Pode ser equipada com marcas e luzes de acordo com qualquer recomendação da IALA. Lanterna LED e um radar reflector interno *Echomax 230 Midi* (10m²).

Comunicação/Telemetria: Nenhum.

Energia: Alimentada a energia solar, dois painéis solares de 40W.

Sensores: Nenhum.

Configuração:

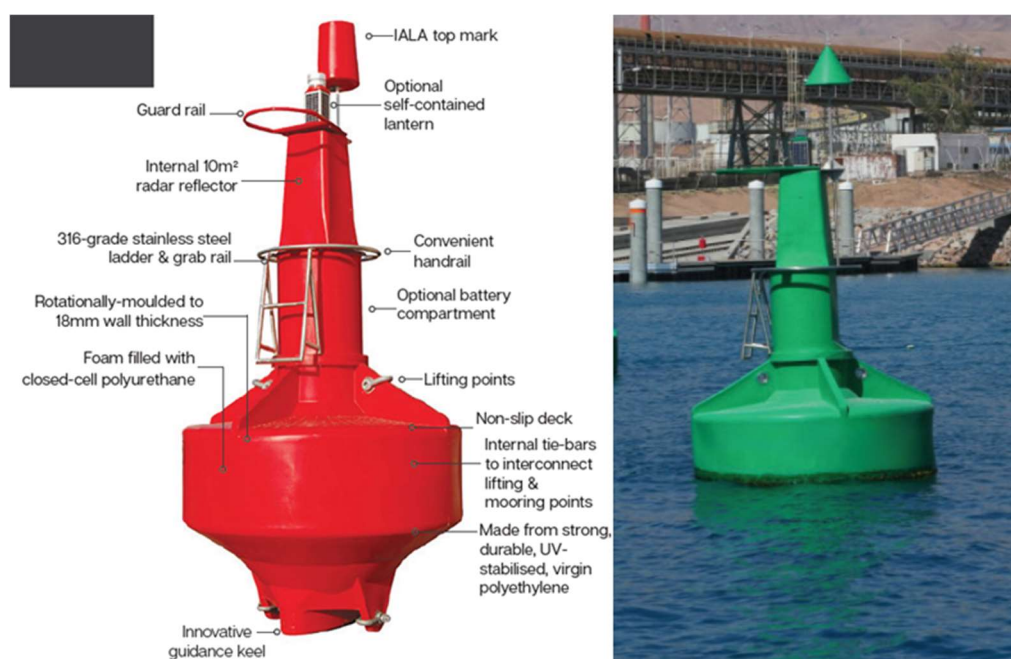


Fig. 3 – Configuração de uma bóia NAUTILUS-2200.

Ficha Técnica – Bóia SL-B1500

Modelo: SL-B1500.

Fabricante: SEALITE (www.sealite.com).

Tipo de Equipamento: Bóia Amarrada.

Função: Dispositivo de Assinalamento.

Durabilidade: 20 anos.

Peso: 220 kg.

Características/Dimensões: A bóia é rotomoldada em polietileno virgem estabilizado por UV com um reforço interno em aço inoxidável. Tem uma altura de 3.5 m e largura de 1.5 m. Pode ser equipada com marcas e luzes de acordo com qualquer recomendação da IALA. Lanterna LED e um radar refletor interno.

Comunicação/Telemetria: Nenhum.

Energia: Alimentada a energia solar, quatro painéis solares.

Sensores: Nenhum.

Configuração:

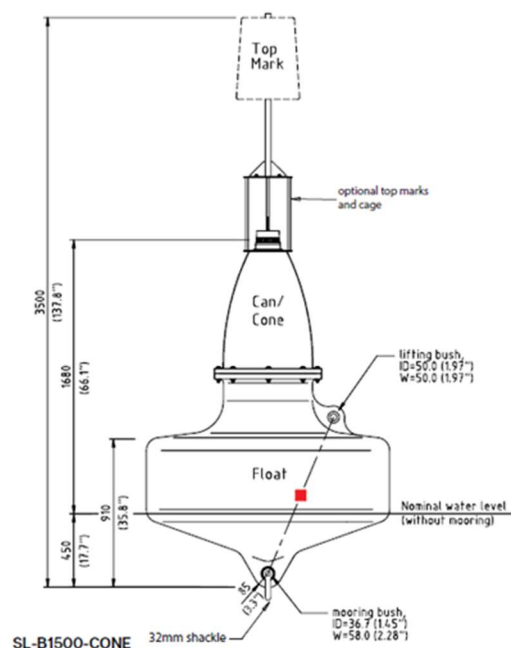


Fig. 4 – Configuração de uma boia SL-B1500.

Ficha Técnica – Bóia SB-2.2

Modelo: SB-2.2.

Fabricante: Tideland Signal. (www.tidelandsignal.com).

Tipo de Equipamento: Bóia Amarrada.

Função: Dispositivo de Assinalamento.

Durabilidade: 20 anos.

Peso: 1960 kg ou 1920 kg.

Características/Dimensões: Flutuador em polietileno com o casco em aço inoxidável com 2.2 m de diâmetro, opção de estrutura galvanizada simples com uma escada integrada classificado para mais de 200 kg com 3.023 m de altura ou torre de polietileno completa com 2.306 m de altura. Lanterna LED e um radar refletor interno de alto ganho passivo (10m², *X-band*) com alcance de 5 milhas náuticas.

Comunicação/Telemetria: UHF/VHF; GSM.

Energia: Alimentada a energia solar, quatro painéis solares de 90W e oito baterias AGM 12V.

Sensores: Nenhum.

Configuração:

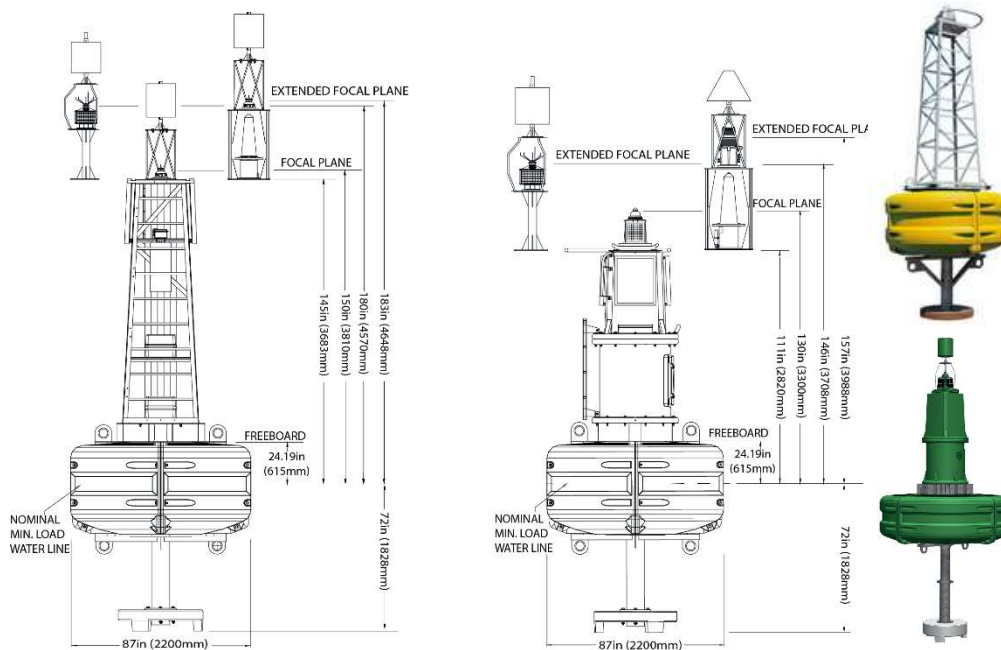


Fig. 5 – Configuração de uma boia SB-2.2.

Ficha Técnica – Bóia SB-3.0

Modelo: SB-3.0.

Fabricante: Tideland Signal. (www.tidelandsignal.com).

Tipo de Equipamento: Bóia Amarrada.

Função: Dispositivo de Assinalamento.

Durabilidade: 20 anos.

Peso: 3277 kg ou 3127 kg.

Características/Dimensões: Flutuador em polietileno com o casco em aço inoxidável com 3 m de diâmetro, opção de estrutura galvanizada simples com uma escada integrada classificado para mais de 200 kg com 4.094 m ou torre de polietileno completa com 4.060 m. Lanterna LED e um radar refletor interno de alto ganho passivo (10m², X-band) com alcance de 5 milhas náuticas

Comunicação/Telemetria: UHF/VHF; GSM.

Energia: Alimentada a energia solar, quatro painéis solares de 90W e oito baterias AGM 12V.

Sensores: Nenhum.

Configuração:

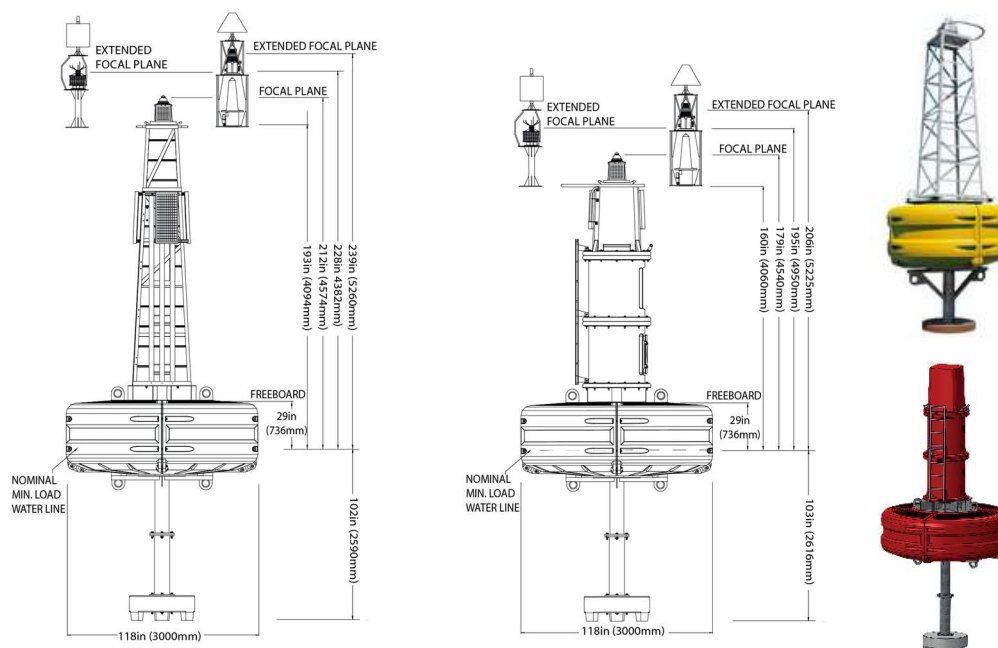


Fig. 6 – Configuração de uma boia SB-3.0.

Ficha Técnica – Bóia SB-285P Sentinel Buoy

Modelo: SB-285P.

Fabricante: Tideland Signal. (www.tidelandsignal.com).

Tipo de Equipamento: Bóia Amarrada.

Função: Dispositivo de Assinalamento.

Durabilidade: 20 anos.

Peso: 2400 kg.

Características/Dimensões: Flutuador em polietileno com o casco em aço inoxidável com 2.5 m de largura e 4.1 m de altura; Amarração Catenária inversa, corrente; Pedestal com Lanterna LED e um radar refletor interno de alto ganho passivo (10m²) com alcance de 5 milhas náuticas.

Comunicação/Telemetria: Nenhum.

Energia: Alimentada a energia solar, quatro painéis solares de 90W e oito baterias AGM 12V.

Sensores: Nenhum.

Configuração:

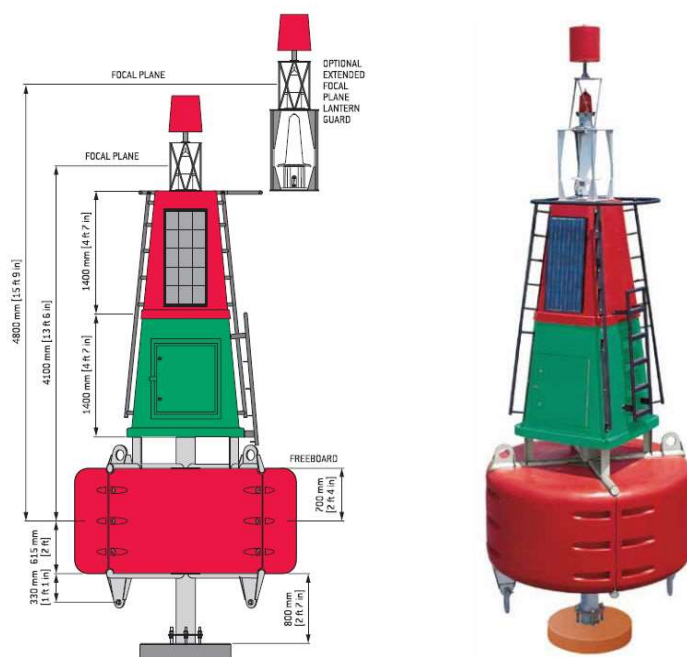


Fig. 7 – Configuração de uma boia SB-285P.

Ficha Técnica – Bóia SB-138P Sentinel Buoy

Modelo: SB-138P.

Fabricante: Tideland Signal. (www.tidelandsignal.com).

Tipo de Equipamento: Bóia Amarrada.

Função: Dispositivo de Assinalamento.

Durabilidade: 20 anos.

Peso: 636 kg.

Características/Dimensões: Flutuador em polietileno com o casco em aço inoxidável com 1.75 m de largura e 2.9 m de altura; Amarração Catenária inversa, corrente; Pedestal com Lanterna LED e um radar refletor interno de alto ganho passivo (10m²) com alcance de 4 milhas náuticas.

Comunicação/Telemetria: Nenhum.

Energia: Alimentado a energia solar, quatro painéis solares de 10-20W e baterias 12-24V.

Sensores: Nenhum.

Configuração:

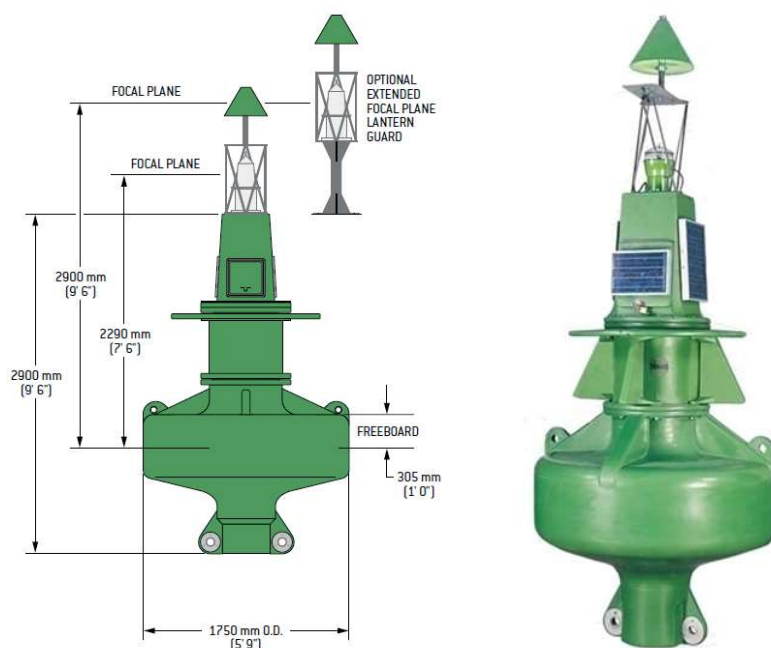


Fig. 8 – Configuração de uma boia SB-138P.

Ficha Técnica – Bóia NOMAD

Modelo: NOMAD Met Ocean Buoy.

Fabricante: *Axys Technologies Inc.* (www.axystechnologies.com).

Tipo de Equipamento: Bóia Amarrada.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 20 anos.

Peso: 5200 kg.

Características/Dimensões: Flutuador em alumínio soldado com 6 m comprimento 3.1 m de largura e 9 m de altura; Amarração Catenária inversa, corrente; Lastro em Betão (interno). Altura do anemómetro 3.3 m, Lanterna LED.

Comunicação/Telemetria: UHF/VHF; *INMARSAT IsatData Pro*; *Iridium*; GPRS/HSPA; CDMA/EVDO.

Energia: Alimentada a energia solar, dois painéis solares de 200W e baterias e energia eólica com 1000W.

Sensores: Temperatura do Ar; Ondógrafo (altura de onda, direção, período e velocidade); Sensor SST; Sensor SSS; Sensor Radiação solar; GPS; Sensor Humidade Relativa; Sensor Velocidade do Vento e Direção do Vento; Sensor Condutividade/Temperatura (CTD); Radar Reflector equivalente; Correntómetro; Radiómetro (cor da água); Fluorímetro; Bussola; Barómetro.

Configuração:



Fig. 9 – Configuração de uma boia NOMAD.

Ficha Técnica – Bóia WatchKeeper

Modelo: WatchKeeper.

Fabricante: Axys Technologies Inc. (www.axystechnologies.com).

Tipo de Equipamento: Bóia Amarrada.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 10 anos.

Peso: 540 kg.

Características/Dimensões: Flutuador em polietileno rotomoldado com 1.7 m de diâmetro; Amarração Catenária inversa, corrente; Lastro em Betão (interno). Altura do anemómetro 3.3 m, Lanterna LED.

Comunicação/Telemetria: UHF/VHF; *INMARSAT IsatData Pro*; *Iridium*; GPRS/HSPA; CDMA/EVDO.

Energia: Alimentado a energia solar. Quatro painéis solares de 35W; 200 a 400A de capacidade bateria.

Sensores: Temperatura do Ar; Ondógrafo; Sensor SST; Sensor SSS; Sensor Radiação solar; GPS; Sensor Humidade Relativa; Sensor Velocidade do Vento e Direção do Vento; Sensor Condutividade/Temperatura (sensor CTD); Radar reflector equivalente a 10 m² (*X-band*); Correntómetro; Radiómetro (cor da água); Fluorímetro; Bussola; Barómetro.

Configuração:

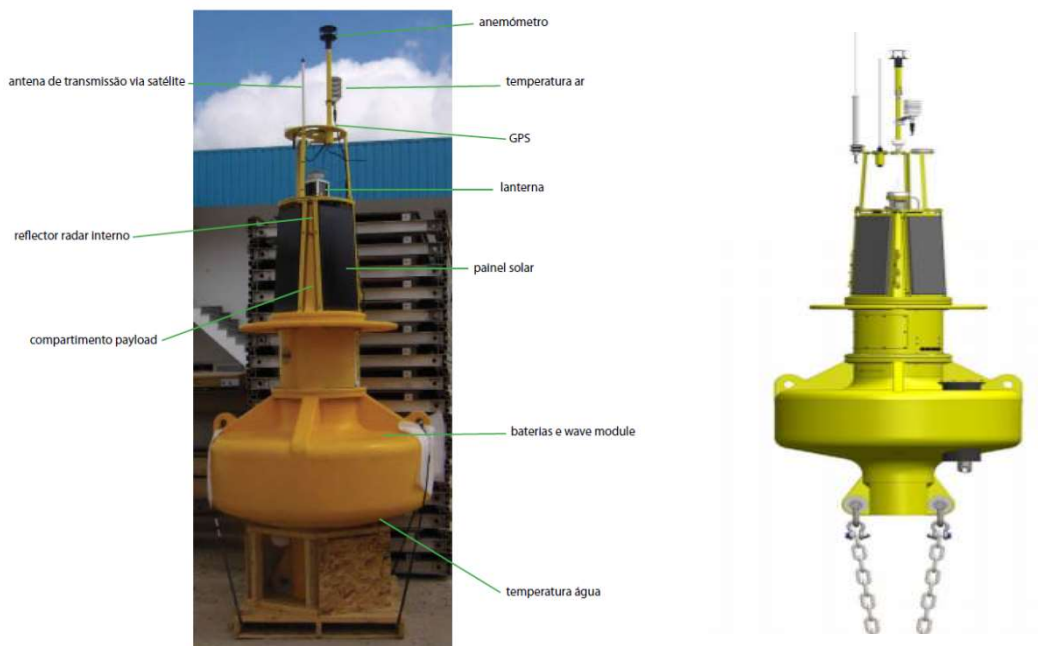


Fig. 10 – Configuração de uma bóia WatchKeeper.

Ficha Técnica – Bóia Ondógrafo Triaxys

Modelo: Triaxys Wave Buoy.

Fabricante: Axys Technologies Inc. (www.axystechnologies.com).

Tipo de Equipamento: Bóia Amarrada.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 8 a 10 anos.

Peso: 230 kg.

Características/Dimensões: Casco em aço inoxidável pintado com 1.10 m de diâmetro; Cúpula em policarbonato resistente a impactos. Lanterna LED amarela, sequências de flash programáveis e visibilidade de 3 milhas.

Comunicação/Telemetria: UHF/VHF; *INMARSAT IsatData Pro*; *Iridium*; GPRS/HSPA; CDMA/EVDO.

Energia: Alimentada a energia solar. Dez painéis solares de 6W; 4 Baterias lítio (12V/100A).

Sensores: Ondógrafo (direção, período e altura de onda); Sensor SST; GPS.

Configuração:

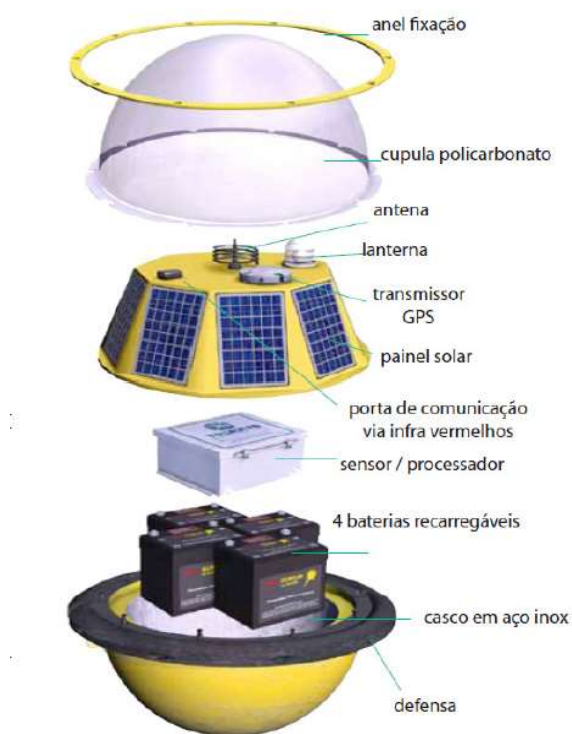


Fig. 11 – Configuração de uma bóia ondógrafo Triaxys

Ficha Técnica – Bóia Ondógrafo Triaxys Mini

Modelo: Triaxys Mini Wave Buoy.

Fabricante: Axys Technologies Inc. (www.axystechnologies.com).

Tipo de Equipamento: Bóia Amarrada.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 8 a 10 anos.

Peso: 70 kg.

Características/Dimensões: Casco em aço inoxidável pintado com 0.72 m de diâmetro; Lanterna LED amarela, visibilidade de 3 milhas.

Comunicação/Telemetria: UHF/VHF; *INMARSAT IsatData Pro*; *Iridium*; GPRS/HSPA; CDMA/EVDO.

Energia: Alimentada internamente com uma bateria alcalina (12V/100A).

Sensores: Ondógrafo (direção, período e altura de onda); Sensor SST; GPS.

Configuração:



Fig. 12 – Configuração de uma boia ondógrafo Triaxys Mini

Ficha Técnica – Bóia SEAWATCH Wavescan

Modelo: SEAWATCH Wavescan.

Fabricante: Fugro (www.fugro.com).

Tipo de Equipamento: Bóia Amarrada.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 10 anos.

Peso: 924 kg.

Características/Dimensões: Flutuador em polietileno com o casco em alumínio e aço inoxidável pintado com 2.8 m de diâmetro e 5.6 m de altura; Lanterna LED, visibilidade de 3 a 4 milhas náuticas.

Comunicação/Telemetria: INMARSAT-C; Iridium; UHF/VHF radio, Argos.

Energia: Alimentada a Energia Solar. Quatro painéis de solares de 45W, Bateria alcalina (12V/248-736A) e bateria de lítio (12V/272-2176A) de *backup*.

Sensores: Ondógrafo (direção, período e altura de onda); Sensor SST; GPS. Temperatura e Pressão do Ar; Sensor SSS; Sensor Radiação solar; GPS; Sensor Humidade Relativa; Sensor Velocidade do Vento e Direção do Vento; Sensor CTD (Condutividade/Temperatura); Correntómetro; Radiómetro (cor da água); Fluorímetro; Bussola; Barómetro.

Configuração:

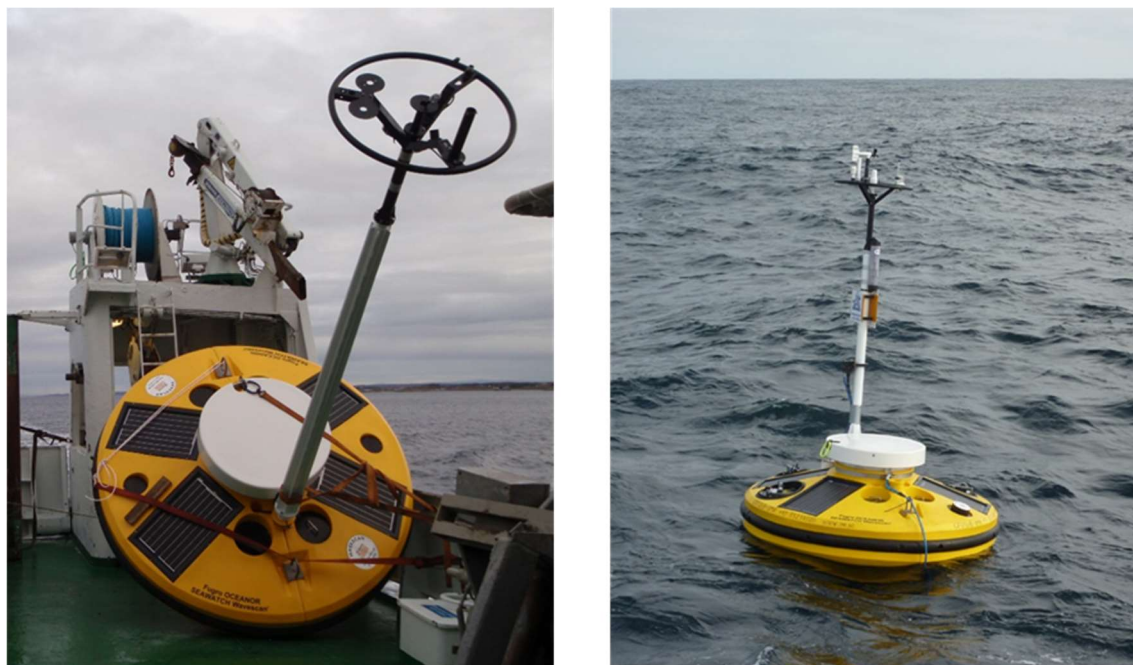


Fig. 13 – Configuração de uma boia SEAWATCH Wavescan

Ficha Técnica – Bóia SEAWATCH Midi 185 Buoy

Modelo: SEAWATCH Midi 185.

Fabricante: Fugro (www.fugro.com).

Tipo de Equipamento: Bóia Amarrada.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 10 anos.

Peso: 600 kg.

Características/Dimensões: Flutuador em polietileno com o casco em alumínio e aço inoxidável pintado com 1.85 m de diâmetro e 3.4 m de altura; Lanterna LED, visibilidade de 3 a 4 milhas náuticas.

Comunicação/Telemetria: INMARSAT-C; Iridium; UHF/VHF radio, Argos.

Energia: Alimentada a Energia Solar. Seis painéis de solares de 18W, Bateria alcalina (12V/248-312A) e bateria de lítio (12V/1088A) de *backup*.

Sensores: Ondógrafo (direção, período e altura de onda); Sensor SST; GPS. Temperatura e Pressão do Ar; Sensor SSS; Sensor Radiação solar; GPS; Sensor Humidade Relativa; Sensor Velocidade do Vento e Direção do Vento; Sensor CTD (Condutividade/Temperatura); Correntómetro; Radiómetro (cor da água); Fluorímetro; Bussola; Barómetro.

Configuração:

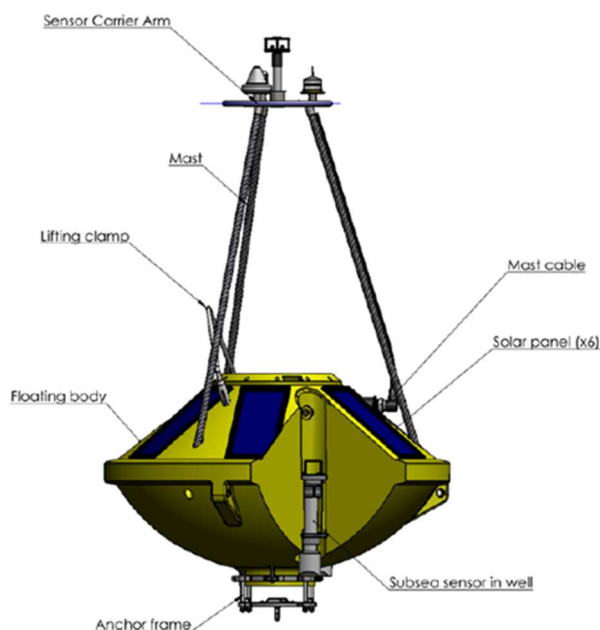


Fig. 14 – Configuração de uma bóia SEAWATCH Midi 185.

Ficha Técnica – Bóia SEAWATCH Wind LiDAR

Modelo: SEAWATCH Wind LiDAR Buoy.

Fabricante: Fugro (www.fugro.com).

Tipo de Equipamento: Bóia Amarrada.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 10 anos.

Peso: 1700 kg.

Características/Dimensões: Flutuador em polietileno com o casco em alumínio e aço inoxidável pintado com 2.8 m de diâmetro e 6.1 m de altura; lanterna LED, visibilidade de 3 a 4 milhas náuticas.

Comunicação/Telemetria: *INMARSAT-C; Iridium; UHF/VHF radio, Argos.*

Energia: Alimentada a Energia Solar. Quatro painéis de solares de 45W, Bateria alcalina (12V/248A) e bateria de lítio (12V/9792A) de *backup*. Célula de Combustível (25926A)

Sensores: Perfilador de ventos (zephir 300 CW LiDAR); ondógrafo (direcção, período e altura de onda); sensor SST; GPS; temperatura e pressão do ar; sensor SSS; sensor radiação solar; sensor humidade relativa; sensor velocidade do vento e direcção do vento; sensor CTD (condutividade/temperatura); correntómetro; radiómetro (cor da água); fluorímetro; bussola; barómetro.

Configuração:

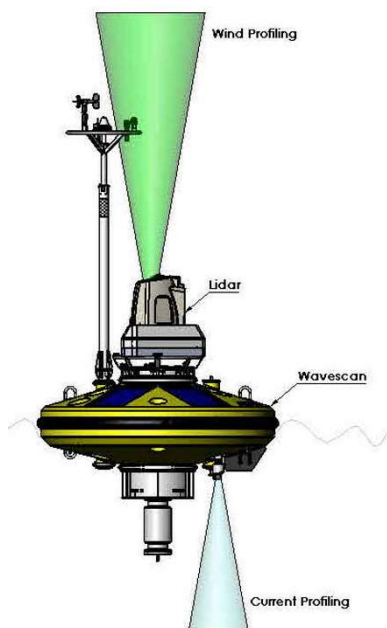


Fig. 15 – Configuração de uma bóia SEAWATCH Wind LiDAR.

Ficha Técnica – Bóia EMM2.0

Modelo: EMM2.0 Buoy.

Fabricante: YSI Integrated Systems & Services Inc. (ysi.com/systems).

Tipo de Equipamento: Bóia Amarrada.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 7 a 9 anos.

Peso: 770 kg.

Características/Dimensões: Flutuador com 1.8 m de diâmetro e 3.28 m de altura em Espuma de ionômero de célula fechada resistente a impactos. Torre em Alumínio.

Comunicação/Telemetria: Iridium SBD; GOES.

Energia: Alimentada a energia solar. Três painéis solares de 24W; bateria lítio (12V/70A).

Sensores: Temperatura do Ar; Ondógrafo (*Aanderaa MOTUS Wave Sensor*); Sensor SST; Sensor SSS; Sensor Radiação solar; GPS; Sensor Humidade Relativa; Sensor Velocidade do Vento e Direção do Vento; Sensor Condutividade/Temperatura (CTD); Correntómetro; Radiómetro (cor da água); Fluorímetro; Barómetro; Sensor de oxigénio dissolvido; Sensor Clorofila; Radiómetro (cor da água); Fluorímetro (Rodamina);

Configuração:



Fig. 16 – Configuração de uma bóia EMM2.0

Ficha Técnica – Bóia EMM68

Modelo: EMM68 Buoy.

Fabricante: YSI Integrated Systems & Services Inc. (ysi.com/systems).

Tipo de Equipamento: Bóia Amarrada.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 4 a 7 anos.

Peso: 48 kg.

Características/Dimensões: Flutuador em Espuma de ionômero de célula fechada resistente a impactos, Lanterna.

Comunicação/Telemetria: Rádio celular (CDMA/GSM/GPRS).

Energia: Alimentada a energia solar. Dois painéis solares de 10W; Bateria lítio (12V/24A).

Sensores: Sensor SST; pH; Sensor CTD (Salinidade); Sensor de oxigénio dissolvido; Sensor Clorofila; Radiómetro (cor da água); Fluorímetro (Rodamina).

Configuração:



Fig. 17 – Configuração de uma bóia EMM68

Ficha Técnica – Bóia EMM150

Modelo: EMM150 Buoy.

Fabricante: YSI Integrated Systems & Services Inc. (ysi.com/systems).

Tipo de Equipamento: Bóia Amarrada.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 4 a 7 anos.

Peso: 68 kg.

Características/Dimensões: Flutuador em Espuma de ionômero de célula fechada resistente a impactos, Lanterna LED.

Comunicação/Telemetria: Rádio celular (CDMA/GSM/GPRS) ou rádio de espectro alargado ponto-a-ponto.

Energia: Alimentada a energia solar. Quatro painéis solares de 4.2W; Bateria lítio (12V/18A).

Sensores: Sensor SST; pH; Sensor CTD (Salinidade); Sensor de oxigénio dissolvido; Sensor Clorofila; Radiómetro (cor da água); Fluorímetro (Rodamina).

Configuração:



Fig. 18 – Configuração de uma boia EMM150

Ficha Técnica – SVP Drifter

Modelo: SVP Drifter.

Fabricante: *Pacific Gyre* (www.pacificgyre.com).

Tipo de Equipamento: *Drifter*.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 1 a 2 anos com o pack de bateria standard.

Peso: 20.4 kg.

Características/Dimensões: Um *drifter* SVP possui uma boia em forma de esfera, de plástico, 35 cm de diâmetro e uma ancora flutuante *holey-sock* centrada a 15 m de profundidade para medir correntes de camadas mistas no oceano superior. A superfície externa da ancora flutuante é feita de tecido de nylon.

Comunicação/Telemetria: *Iridium* SBD w/ *Iridium* 9602 Modem; *Argos* 2 w/ *Kenwood* PMT; *Globalstar* Simplex w/ *Globalstar* STX-3.

Energia: Alimentada através de 4 a 5 pacotes de baterias, cada um com 7 a 9 baterias alcalinas (12V e 56A).

Sensores: Sensor de Voltagem da Bateria; GPS; Sensor de submersão; Sensor de tensão do cabo para verificar a presença da ancora flutuante; Sensor SST (*Pacific Gyre Probe*); Sensor de Pressão do Ar (*Air Pressure Honeywell IPT*); Sensor Velocidade do Vento (*Gill Windsonic*); Sensor Condutividade/Temperatura (*SBE MicroCAT*) (Administration, 2010).

Configuração:

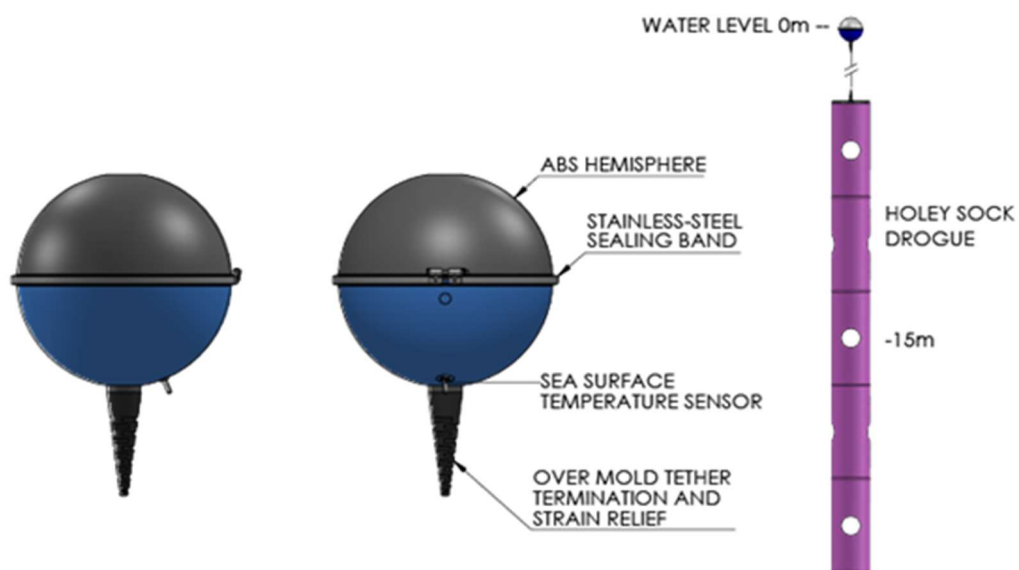


Fig. 19 – Configuração dum SVP *Drifter* (Centurioni, 2018).

Ficha Técnica – Bóia MOBILIS DB 2000

Modelo: MOBILIS DB 2000.

Fabricante: *hydrosphere*. (<http://hydrosphere.co.uk>).

Tipo de Equipamento: Bóia Amarrada.

Função: Dispositivo de Assinalamento e Monitorização.

Durabilidade: 15 anos.

Peso: 1015 kg.

Características/Dimensões: Estrutura em aço galvanizado com 3.85 m de altura, flutuador em polietileno com um casco com 1.9 m de diâmetro e Lanterna LED.

Comunicação/Telemetria: Nenhum.

Energia: Alimentada a energia solar. Três painéis solares de 55W; bateria lítio (12V).

Sensores: Nenhum.

Configuração:



Fig. 20 – Configuração de uma bóia MOBILIS DB 2000

Ficha Técnica – Bóia MOBILIS DB 8000

Modelo: MOBILIS DB 8000 UKMO-HX.

Fabricante: *hydrosphere*. (<http://hydrosphere.co.uk>).

Tipo de Equipamento: Bóia Amarrada.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 15 anos.

Peso: 2140 kg.

Características/Dimensões: Estrutura em aço galvanizado com 6.4 m de altura, com flutuadores em polietileno com um casco com 3.0 m de diâmetro e Lanterna LED.

Comunicação/Telemetria: *Iridium*.

Energia: Alimentada a energia solar. Painel solar de 400W; bateria lítio (12V).

Sensores: Sensor CTD, sensor SST, sensor de pressão do ar; sensor velocidade do vento, ondógrafo, sensor pressão barométrica.

Configuração:



Fig. 21 – Configuração de uma bóia MOBILIS DB 8000

Ficha Técnica – Bóia G2400T

Modelo: G2400T.

Fabricante: Lindley. (<https://www.lindley.pt>).

Tipo de Equipamento: Bóia Amarrada.

Função: Dispositivo de Assinalamento.

Durabilidade: 15 anos.

Peso: 1600 kg.

Características/Dimensões: Espuma de polietileno de célula fechada de 35-50 kg/m³ sobre tubo central de aço galvanizado. Camada exterior de elastómero de poliuretano pigmentado e com protecção máxima UV. Com o flutuador com um diâmetro de 2.4 m e uma altura de 1.1 m. Torre com 3 m. Lanterna LED (opcional). Radar reflector passivo multissegmentado (10m²).

Comunicação/Telemetria: Nenhum.

Energia: Alimentada a energia solar (opcional).

Sensores: Nenhum.

Configuração:



Fig. 22 – Configuração de uma bóia G2400T

Ficha Técnica – Bóia G3000T

Modelo: G3000T.

Fabricante: Lindley. (<https://www.lindley.pt>).

Tipo de Equipamento: Bóia Amarrada.

Função: Dispositivo de Assinalamento.

Durabilidade: 15 anos.

Peso: 2100 kg.

Características/Dimensões: Espuma de polietileno de célula fechada de 35-50 kg/m³ sobre tubo central de aço galvanizado. Camada exterior de elastómero de poliuretano pigmentado e com protecção máxima UV. Com o flutuador com um diâmetro de 3.0 m e uma altura de 1.1 m. Torre com 4 m. Lanterna LED (opcional). Radar reflector passivo multissegmentado (10m²).

Comunicação/Telemetria: Nenhum.

Energia: Alimentada a energia solar (opcional).

Sensores: Nenhum.

Configuração:



Fig. 23 – Configuração de uma bóia G3000T

Ficha Técnica – Bóia Wave Guardian R500SM

Modelo: *Wave Guardian* R500SM.

Fabricante: *Composite Solutions*. (<http://composite-solutions.pt/en/home/>).

Tipo de Equipamento: Bóia Amarrada.

Função: Dispositivo de Monitorização e Vigilância.

Durabilidade: 20 anos.

Peso: 26 kg.

Características/Dimensões: Bóia em resina de poliéster reforçada com *kevlar* e fibra de vidro. Com um diâmetro de 0.5 m e uma altura de 0.3 m.

Comunicação/Telemetria: Wi-Fi, VHF, *Iridium*, RF, GPRS, 3G & 4G.

Energia: Alimentada a energia solar com 4 a 5 painéis solares e baterias.

Sensores: Sensor de oxigénio dissolvido; GPS; Câmera de vigilância com sensor de movimento; Sensor CTD; Sensor de pressão; Sensor humidade relativa; Sensor velocidade e direcção do vento;

Configuração:



Fig. 24 – Configuração de uma bóia *Wave Guardian* R500SM

Ficha Técnica – Bóia Marker Guardian S4000SMN

Modelo: Marker Guardian S4000SMN.

Fabricante: Composite Solutions. (<http://composite-solutions.pt/en/home/>).

Tipo de Equipamento: Bóia Amarrada.

Função: Dispositivo de Assinalamento, Monitorização e Vigilância.

Durabilidade: 20 anos.

Peso: 2631 kg.

Características/Dimensões: Bóia em resina de poliéster reforçada com *kevlar* e fibra de vidro. Com um diâmetro de 4.0 m e uma altura de 6.054 m. Lanterna LED (opcional). Radar reflector passivo multissegmentado (10m²).

Comunicação/Telemetria: Wi-Fi, VHF, *Iridium*, RF, GPRS, 3G & 4G.

Energia: Alimentada a energia solar e baterias. Instalação de turbinas de vento opcional.

Sensores: Sensor de oxigénio dissolvido; GPS; Câmera de vigilância com sensor de movimento; Sensor CTD; Sensor de pressão; Sensor humidade relativa; Sensor velocidade e direcção do vento.

Configuração:

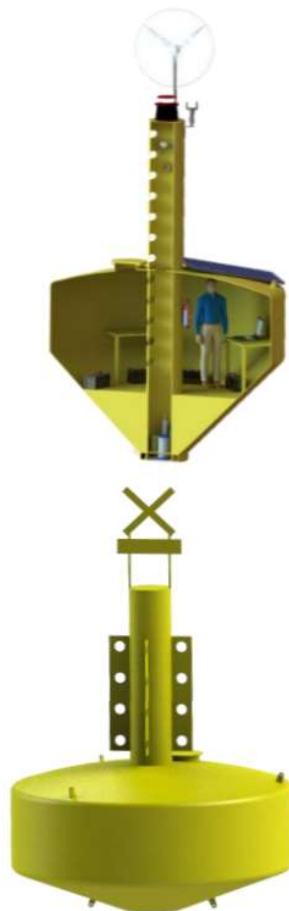


Fig. 25 – Configuração de uma bóia Marker Guardian S4000SMN

ANEXO B

FICHAS TÉCNICAS: SENSORES E OUTROS EQUIPAMENTOS *OFFSHORE*

Ficha Técnica – CO₂-Pro Sensor.

Modelo: CO₂ – Pro Sensor.

Fabricante: PRO OCEANUS (<http://pro-oceanus.com/co2-pro.php>).

Tipo de Equipamento: Sensor CO₂.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 4 anos.

Peso: 6.6 kg.

Características/Dimensões: Casco de acetato com 19 cm de diâmetro por 33 cm de comprimento.

Armazenamento de Dados: *Argos* e *Iridium Circuit Switch/RUDICS*;

Consumo: 12W durante o aquecimento, depois 4W.

Configuração:



Fig. 1 – Configuração dum sensor CO₂ – Pro Sensor.

Ficha Técnica – fastCTD profiler.

Modelo: fastCTD profiler.

Fabricante: Valeport (<https://www.valeport.co.uk/Products/CTD-and-Multiparameter>).

Tipo de Equipamento: Sensor CTD.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 4 anos.

Peso: 1.5 kg.

Características/Dimensões: Casco de acetal com 5.4 cm de diâmetro por 51 cm de comprimento.

Armazenamento de Dados: Memória interna Flash SSD não volátil.

Energia: Alimentado através de uma bateria Alcalina (1.5V) ou bateria de *Lithium* (3.6V).

Configuração:



Fig. 2 – Configuração dum sensor fastCTD profiler.

Ficha Técnica – rapidPro CTD.

Modelo: rapidPro CTD.

Fabricante: Valeport (<https://www.valeport.co.uk/Products/CTD-and-Multiparameter>).

Tipo de Equipamento: Sensor CTD.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 4 anos.

Peso: 4.5 kg.

Características/Dimensões: Casco de titânio com 6.2 cm de diâmetro por 61 cm de comprimento.

Armazenamento de Dados: Memória interna Flash SSD não volátil.

Energia: Alimentado através de uma bateria recarregável *Lithium*.

Configuração:



Fig. 3 – Configuração dum sensor rapidPro CTD.

Ficha Técnica – SBE 61 CTD.

Modelo: SBE 61 Deep Argo CTD.

Fabricante: SEA-BIRD *scientific* (<https://www.seabird.com>)

Tipo de Equipamento: Sensor CTD.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 4 anos.

Peso: 2.8 kg.

Características/Dimensões: Casco de titânio com 6.2 cm de diâmetro por 62 cm de comprimento.

Telemetria: RS-232.

Armazenamento de Dados: memória interna.

Consumo: 12V.

Configuração:



Fig. 4 – Configuração dum sensor SBE 61 CTD.

Ficha Técnica – ECO FL fluorómetro.

Modelo: ECO FL.

Fabricante: SEA-BIRD scientific (<https://www.seabird.com>)

Tipo de Equipamento: Fluorómetro.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 4 anos.

Peso: 0.4 kg.

Características/Dimensões: Casco de acetato com 6.3 cm de diâmetro por 12.7 cm de comprimento.

Armazenamento de Dados: memória interna até 108000 samples.

Consumo: 50 mA.

Configuração:



Fig. 5 – Configuração dum fluorómetro ECO FL.

Ficha Técnica – HyperOCR radiómetro.

Modelo: HyperOCR.

Fabricante: SEA-BIRD scientific (<https://www.seabird.com>)

Tipo de Equipamento: Radiómetro.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 4 anos.

Peso: 1.0 kg.

Características/Dimensões: Casco de acetal com 6.0 cm de diâmetro por 39.9 cm de comprimento.

Telemetria: RS-422 / RS-232.

Consumo: 50 mA.

Configuração:



Fig. 6 – Configuração dum radiómetro HyperOCR.

Ficha Técnica – OBS32.

Modelo: OBS32.

Fabricante: GEObit (<https://www.geobit-instruments.com>)

Tipo de Equipamento: Sismómetro de fundo do mar.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 2 anos.

Peso: 1.2 kg.

Características/Dimensões: Sensor sísmico com 10 cm por 4.0 cm por 6.8 cm e unidade de armazenamento de dados com 16.8 cm por 10.6 cm por 6.8 cm.

Telemetria: RS-232.

Armazenamento de Dados: Cartão de memória microSD.

Consumo: 9-18V, 0.5W.

Configuração:



Fig. 7 – Configuração dum sismómetro de fundo do mar OBS32.

Ficha Técnica – APEX Argo

Modelo: APEX Argo.

Fabricante: Teledyne Marine (www.teledynemarine.com).

Tipo de Equipamento: Flutuador.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 4 anos, 150 perfis.

Peso: 25 kg.

Características/Dimensões: Casco de Alumínio com 16.5 cm de diâmetro por 127 cm de comprimento e 12.7 cm para a antena *Iridium* ou 69 cm para antena *Argos*.

Comunicação/Telemetria: *Argos* e *Iridium Circuit Switch/RUDICS*;

Energia: Alimentação interna através de baterias alcalinas.

Sensores: Sensor CTD: Sea-Bird SBE-41 e RBR Argo;

Configuração:

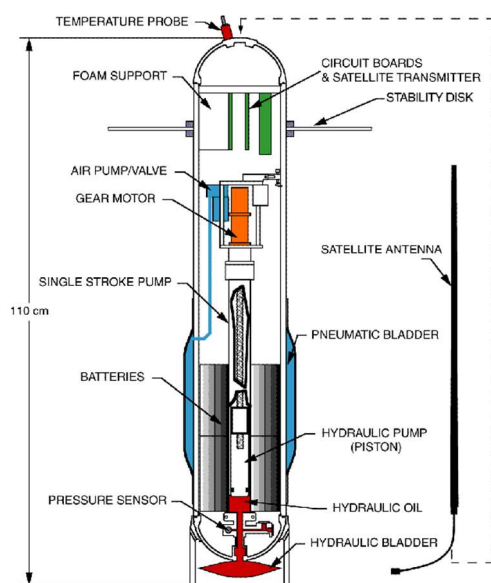


Fig. 8 – Configuração dum APEX Argo.

Ficha Técnica – APEX Advanced Multi-Sensor Float (AMS).

Modelo: APEX Advanced Multi-Sensor Float (AMS).

Fabricante: Teledyne Marine (www.teledynemarine.com).

Tipo de Equipamento: Flutuador.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 4 anos, 150 perfis.

Peso: 25 kg.

Características/Dimensões: Casco de fibra de carbono com 16.5 cm de diâmetro por 127 cm de comprimento e 12.7 cm para a antena *Iridium* ou 69 cm para antena *Argos*.

Comunicação/Telemetria: *Argos* e *Iridium Circuit Switch/RUDICS*;

Energia: Alimentação interna através de baterias de lítio.

Sensores: Sensor CTD (*Sea-Bird* SBE-41 e RBR *Argo*); Sensor de Oxigénio dissolvido (*Aanderaa* 4330, *RINKO ARO-FT*); Transmissômetro (*WET Labs C-Rover*); Radiômetro (*Satlantic* 504); Fluorímetro (*WET Labs FLbb*); pH (*SBE Float Deep SeaFETTM*); Sensor Nutrientes (*Satlantic SUNA*); Sensor Acústico (*RAFOS*).

Configuração:



Fig. 9 – Configuração dum APEX Advanced Multi-Sensor Float (AMS).

Ficha Técnica – DCPS 5400.

Modelo: DCPS 5400 *Doppler Current Profiler Sensor*.

Fabricante: Aanderaa (<https://www.aanderaa.com>)

Tipo de Equipamento: Perfilador hidroacústico de correntes *Doppler*.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 2 anos.

Peso: 5.1 kg.

Características/Dimensões: Sensor em titânio, aço inoxidável 316, e poliuretano com 16 cm de diâmetro e 16.7 cm de altura.

Telemetria: AiCaP *protocol*, RS-232.

Armazenamento de Dados: memória interna até 150 medições.

Consumo: 6-30V; 4.2 mA.

Configuração:



Fig. 10 – Configuração dum DCPS 5400.

Ficha Técnica – Conductivity Sensor 4319.

Modelo: *Conductivity Sensor 4319.*

Fabricante: Aanderaa (<https://www.aanderaa.com>)

Tipo de Equipamento: Sensor CTD.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 2 anos.

Peso: 0.240 kg.

Características/Dimensões: Sensor em epóxi e cobertura em titânio, com 3.9 cm de diâmetro e 8.6 cm de altura.

Telemetria: AiCaP *protocol*, RS-232.

Armazenamento de Dados: memória interna.

Consumo: 5-14V; 0.16 +48 mA/S (S=intervalo de amostragem em segundos).

Configuração:



Fig. 11 – Configuração dum sensor CTD 4319.

Ficha Técnica – Oxygen Sensor 3835.

Modelo: Oxygen Optode 3835.

Fabricante: Aanderaa (<https://www.aanderaa.com>)

Tipo de Equipamento: Sensor oxigénio dissolvido.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 2 anos.

Peso: 0.120 kg.

Características/Dimensões: Sensor em titânio, safira e polioximetileno com 3.6 cm de diâmetro e 8.6 cm de altura.

Telemetria: RS-232.

Armazenamento de Dados: memória interna.

Consumo: 5-14V.

Configuração:



Fig. 12 – Configuração dum sensor oxigénio dissolvido 3835.

Ficha Técnica – Oxygen Sensor 4531.

Modelo: Oxygen Optode 4531.

Fabricante: Aanderaa (<https://www.aanderaa.com>)

Tipo de Equipamento: Sensor oxigénio dissolvido.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 2 anos.

Peso: 0.160 kg.

Características/Dimensões: Sensor em poliamida com 3.82 cm de diâmetro e 27.3 cm de altura.

Telemetria: RS-232.

Armazenamento de Dados: memória interna.

Consumo: 5-30V; 0.16 +48 mA/S (S=intervalo de amostragem em segundos).

Configuração:



Fig. 13 – Configuração dum sensor oxigénio dissolvido 4531.

Ficha Técnica – Pressure Sensor 4117.

Modelo: Pressure Sensor 4117.

Fabricante: Aanderaa (<https://www.aanderaa.com>)

Tipo de Equipamento: Sensor Pressão e Temperatura.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 2 anos.

Peso: 0.160 kg.

Características/Dimensões: Sensor em epóxi e titânio, com 3.8 cm de diâmetro e 8.6 cm de altura.

Telemetria: AiCaP *CANbus*, RS-232.

Armazenamento de Dados: memória interna.

Consumo: 5-14V, 14 mA/S (S=intervalo de amostragem em segundos).

Configuração:



Fig. 14 – Configuração dum sensor de pressão e temperatura 4117.

Ficha Técnica – SeaGuardII DCP.

Modelo: SeaGuardII *Doppler Current Profiler Sensor*.

Fabricante: Aanderaa (<https://www.aanderaa.com>)

Tipo de Equipamento: Perfilador hidroacústico de correntes *Doppler*.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 2 anos.

Peso: 10.8 kg.

Características/Dimensões: Sensor em titânio, aço inoxidável 316, e poliuretano com 16 cm de diâmetro e 58.5 cm de altura.

Telemetria: RS-232, GPRS, GOES, *Iridium*.

Armazenamento de Dados: memória interna.

Energia: Alimentado internamente através de uma bateria alcalina (9V, 15Ah) e uma bateria de lítio (7V, 35 Ah). 4.2 mA.

Configuração:



Fig. 15 – Configuração dum SeaGuardII DCP.

Ficha Técnica – SeaGuard RCM.

Modelo: SeaGuard *Recording Current Meter*.

Fabricante: Aanderaa (<https://www.aanderaa.com>)

Tipo de Equipamento: Sensor correntes, oxigénio dissolvido e turbidez.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 2 anos.

Peso: 7.6 kg.

Características/Dimensões: Sensor em titânio, aço inoxidável 316, e poliuretano com 13.9 cm de diâmetro e 35.6 cm de altura.

Telemetria: Nenhum.

Armazenamento de Dados: memória interna cartão SD 2 GB.

Consumo: 6-14 V. Alimentado a baterias alcalinas (9V) ou lítio (7V).

Configuração:



Fig. 16 – Configuração dum SeaGuard RCM.

Ficha Técnica – Temperature Sensor 4060.

Modelo: Temperature Sensor 4060.

Fabricante: Aanderaa (<https://www.aanderaa.com>)

Tipo de Equipamento: Sensor temperatura.

Função: Dispositivo de Monitorização.

Durabilidade: 2 anos.

Peso: 0.120 kg.

Características/Dimensões: Sensor em titânio com cobertura em epóxi, com 3.6 cm de diâmetro e 7.6 cm de altura.

Telemetria: AiCaP CANbus, RS-232.

Armazenamento de Dados: memória interna.

Consumo: 6-14V; 14 mA/S (S=intervalo de amostragem em segundos).

Configuração:



Fig. 17 – Configuração dum sensor temperatura 4060.

ANEXO C

LISTAGEM DETALHADA DAS CONDIÇÕES DE TESTE ESTUDADAS

Tabela 1 – Ensaios com agitação regular.

Ensaio	H _{PRO} (m)	T _{PRO} (s)	H _{MOD} (m)	T _{MOD} (s)	F _{MOD} (Hz)	Tipo de Agitação	Nº de Iterações	Nº de ondas	Duração do ensaio (s)	Factor de ganho
1	0.75	2.37	0.038	0.53	1.887	REG	03	120	64	1.26
2	0.75	3.82	0.038	0.63	1.587	REG	03	120	76	1.26
3	0.75	3.26	0.038	0.73	1.370	REG	03	120	88	1.00
4	0.75	3.71	0.038	0.83	1.205	REG	03	120	100	1.22
5	0.75	4.16	0.038	0.93	1.075	REG	03	120	112	1.05
6	0.75	6	0.038	1.34	0.746	REG	03	120	161	1.16
7	0.75	8	0.038	1.79	0.559	REG	03	120	215	0.92
8	0.75	12	0.038	2.68	0.373	REG	03	120	322	0.87
9	0.75	14	0.038	3.13	0.319	REG	03	120	376	0.88
10	2	3.18	0.1	0.71	1.408	REG	04	120	85	1.06
11	2	3.26	0.1	0.73	1.370	REG	05	120	88	0.97
12	2	3.71	0.1	0.83	1.205	REG	03	120	100	1.36
13	2	4.16	0.1	0.93	1.075	REG	03	120	112	1.15
14	2	6	0.1	1.34	0.746	REG	03	120	161	1.15
15	2	8	0.1	1.79	0.559	REG	03	120	215	0.89
16	2	12	0.1	2.68	0.373	REG	03	120	322	0.84
17	2	14	0.1	3.13	0.319	REG	03	120	376	0.85

Tabela 2 – Ensaio com agitação irregular.

Ensaio	H _{PRO} (m)	T _{PRO} (s)	H _{MOD} (m)	T _{MOD} (s)	F _{MOD} (Hz)	Tipo de Agitação	Nº de Iterações	Nº de ondas	Duração do ensaio (s)	Factor de ganho
1	0.36	2.4	0.018	0.54	1.863	IRREG	02	512	275	1.34
2	0.75	3.18	0.038	0.71	1.406	IRREG	01	512	364	1.26
3	0.5	7.1	0.025	1.59	0.630	IRREG	02	512	813	1.16
4	1.5	7.1	0.075	1.59	0.630	IRREG	02	512	813	1.17
5	1.5	8.4	0.075	1.88	0.532	IRREG	01	512	962	1.08
6	1.5	9.7	0.075	2.17	0.461	IRREG	02	512	1111	1.05
7	1.5	11	0.075	2.46	0.407	IRREG	01	512	1259	1.00
8	2.5	8.4	0.125	1.88	0.532	IRREG	01	512	962	1.11
9	2.5	9.7	0.125	2.17	0.461	IRREG	01	512	1111	1.06
10	2.5	11	0.125	2.46	0.407	IRREG	01	512	1259	0.99