



João Gonçalo S. E. S. Bento

UM MODELO COMPUTACIONAL SIMPLIFICADO PARA AVALIAÇÃO DA PRODUTIBILIDADE ENERGÉTICA DE UM NOVO CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS

A SIMPLIFIED COMPUTATIONAL
MODEL FOR ENERGY PRODUCTIVITY ASSESSMENT
OF A NEW WAVE ENERGY CONVERTER

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente,
orientada pelo Professor Doutor José Paulo Pereira de Gouveia Lopes de Almeida

Coimbra, 11 de Outubro de 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

João Gonçalo S. E. S. Bento

UM MODELO COMPUTACIONAL SIMPLIFICADO PARA AVALIAÇÃO DA PRODUTIBILIDADE ENERGÉTICA DE UM NOVO CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS

A SIMPLIFIED COMPUTATIONAL MODEL FOR ENERGY PRODUCTIVITY ASSESSMENT OF A NEW WAVE ENERGY CONVERTER

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente,
orientada pelo Professor Doutor José Paulo Pereira de Gouveia Lopes de Almeida

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, declina qualquer
responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões
que possam surgir

Coimbra, 11 de Outubro de 2017

AGRADECIMENTOS

À minha família, por todo o apoio e motivação que me deram durante o meu percurso académico.

Aos meus amigos, por todos os momentos de boa disposição criados.

À Rita, pela ajuda indispensável que me deu e por ter estado sempre ao meu lado.

Ao meu orientador, o Prof. Doutor José Lopes de Almeida, por todo o apoio e disponibilidade demonstrados desde o início deste trabalho, mas também por me passar o interesse nas áreas da Hidráulica e modelação computacional.

O meu agradecimento ao Eng. João Abrantes pela disponibilidade do acesso ao seu programa computacional.

Obrigado a todos por me ajudarem a completar um importante ciclo da minha vida.

RESUMO

O potencial energético das ondas é muito elevado, mas ainda não se conhece a melhor tecnologia para a sua captura. Este trabalho pretende mostrar uma tecnologia recente inventada na Universidade de Coimbra e desenvolver um modelo computacional simplificado que determine a energia capturada em diversos estados de mar, de modo a obter uma “power matrix” do dispositivo sem o uso de uma turbina. O modelo usa a Teoria de Stokes de segunda ordem para simular as ondas capturadas. A “power matrix” é comparada com uma preliminar obtida experimentalmente e com outra simulada com recurso à Teoria Linear. Os resultados obtidos com o modelo computacional são similares aos experimentais que usavam um modelo físico à escala 1,5:100, em determinadas situações, nomeadamente quando se considera que funcionam três nós de adução e restituição. Aproveitando as potencialidades da rotina computacional, ainda se testou a alteração da largura e comprimento do dispositivo e comparou-se o quociente entre a dimensão e a energia capturada. Para menores larguras e um comprimento com metade do tamanho, são obtidos os valores mais elevados deste quociente. Também é obtida a matriz para um método que tem uma turbina instalada para mostrar que o modelo computacional está preparado para simular tais casos. Conclui-se que o modelo estima valores de potência similares aos obtidos experimentalmente. Este possibilita ainda testar diferentes turbinas instaladas e configurações do dispositivo, para maximizar a energia capturada.

Palavras-chave: conversor de energia das ondas; modelo computacional simplificado; avaliação da produtibilidade energética; onda de Stokes de segunda ordem; power matrix.

ABSTRACT

Wave energy potencial is high, but the best technology to harvest it is not known yet. This dissertation's goal is to show a new technology invented in the University of Coimbra and develop a simplified computational model to estimate the captured energy in several sea states, in order to get the device's power matrix without a turbine. The computational model uses the second order Stoke's Theory to simulate the waves. The power matrix is then compared with a preliminary matrix obtained in an experimental work and also compared with another power matrix obtained using a computational model that uses the Linear Theory. The results using the computational model are very similar to the ones obtained in the experimental work that used a physical model with a scale 1,5:100, in specific conditions, such as the number of nodes that open in the adduction and restitution. Taking advantage of the model created, a variety of the device's width and length was tested. The power estimated was compared with the original power matrix using a coefficient of the dimension/estimated energy. This coefficient is higher when using smaller widths and half of the original length. A power matrix of a method that has a turbine installed is also obtained, this shows that the computational model is prepared to simulate such scenarios. In conclusion, the model estimates similar values to the ones obtained during experimental work. It also enables testing different turbine installations and device configurations, to maximize captured energy.

Keywords: wave energy converter; simplified computational model; wave energy assessment; second order Stoke's wave; power matrix.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABELAS	ix
ABREVIATURAS	xi
SIMBOLOGIA	xii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo da dissertação	1
1.2 Estrutura da dissertação	1
1.3 Enquadramento	2
2 ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Introdução	4
2.2 Teorias de propagação de ondas de gravidade.....	4
2.2.1 Introdução.....	4
2.2.2 Ondas de Stokes e outras teorias relevantes	6
2.2.3 Domínio de validade das teorias.....	7
2.3 Tecnologias atuais.....	8
2.3.1 Introdução.....	8
2.3.2 Principais WEC's existentes.....	10
3 DISPOSITIVO ANALISADO	12
3.1 Breve descrição do dispositivo analisado	12
3.2 Princípio de funcionamento	14
3.3 Modelo conceptual simplificado de funcionamento.....	15
3.3.1 Introdução.....	15

3.3.2	Simplificações e métodos usados para estimar a produtibilidade energética do dispositivo	16
3.3.3	Dados relativos à onda e dispositivo	18
3.3.4	Definição da malha	19
3.3.5	Onda de Stokes de Ordem 2	21
3.3.6	Perdas de carga, caudais, energia e potência	26
3.3.7	Enquadramento do intervalo de validade das teorias de propagação de ondas de gravidade	30
4	MODELO COMPUTACIONAL	33
4.1	Breve descrição	33
4.2	Ficheiros de dados e resultados, valores iniciais e intervalo de validade	33
4.3	Início do ciclo de cálculo, escrita dos resultados e novo passo de tempo	35
4.4	Fluxograma	36
5	APLICAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL	38
5.1	Descrição da metodologia	38
5.2	Simulações a efectuar	39
5.3	Diagrama com intervalo de validade das ondas simuladas	40
5.4	Obtenção da “power matrix” e comparação com os resultados experimentais preliminares	41
5.5	Campos de velocidade, pressão e carga hidráulica	43
5.6	Comparar onda de Stokes de ordem 2 com Teoria Linear	47
6	DISCUSSÃO, CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	49
6.1	Comparar simulação de ondas usando a onda de Stokes de segunda ordem com outras teorias	49
6.2	“Power matrix” e comparação com resultados experimentais	51
6.3	Conclusões finais	56
6.4	Trabalhos futuros	56
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
Anexo A	DADOS_GERAIS.dat	A-1
Anexo B	Pontos retirados do diagrama apresentado na Figura 2.3	B-1

Anexo C Matrizes obtidas para 18,3 m de profundidade e quociente entre resultados
experimentais e computacionais C-1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Potencial da energia das ondas em kW/m de frente de onda e direcção predominante anual (adaptado de Gunn e Stock-Williams (2012))	3
Figura 2.1: Representação de uma onda sinusoidal e respetivas características (adaptado de DNV (2010))	4
Figura 2.2: Superfície livre característica de diferentes teorias de propagação de ondas de gravidade (adaptado de Flow3d@ 2014).....	6
Figura 2.3: Domínio de validade das principais teorias de propagação de ondas de gravidade (Carmo, 2016).....	8
Figura 2.4: Exemplo de um atenuador, Pelamis (Fotografia: J.P.P.G. Lopes de Almeida)	10
Figura 2.5: Central CAO na ilha do Pico (Pico OWC@ 2006).....	10
Figura 2.6: Exemplo de um “point-absorber”, PowerBuoy (PowerBuoy@ 2017)	11
Figura 2.7: Exemplo de um dispositivo de corpo oscilante, WaveRoller (WaveRoller@ 2012)	11
Figura 3.1: Representação simplificada do posicionamento do REEFS (adaptado de Lopes de Almeida (2017))	12
Figura 3.2: Representação simplificada da secção transversal do dispositivo	13
Figura 3.3: Turbina de baixa queda (VLH turbine@ 2013)	14
Figura 3.4: Representação simplificada do funcionamento do REEFS.....	15
Figura 3.5: Ilustração simplificada do princípio de funcionamento dos Métodos 1 e 2 para um par de aberturas activo (adaptado de Lopes de Almeida (2017)).....	17
Figura 3.6: Representação simplificada da malha	21
Figura 3.7: Representação simplificada da entrada de volume lateral (vista de frente do dispositivo)	23
Figura 3.8: Representação das áreas entre o perfil da superfície livre e a altura média do mar das componentes da onda de Stokes de segunda ordem.....	24
Figura 3.9: Domínio de validade das principais teorias de propagação de ondas de gravidade consideradas.....	31
Figura 5.1: Imagem subaquática no interior do modelo à escala 1,5:100 mostrando a abertura de 3 nós em cada crista (Fotografia: J.P.P.G. Lopes de Almeida)	39
Figura 5.2: Representação das ondas simuladas e respetivo intervalo de validade.....	41
Figura 5.3: Médias e valores dos quocientes entre resultados computacionais e experimentais da potência caapturada para cada conjunto de nós em funcionamento usando o Método 1	42
Figura 5.4: Médias e valores dos quocientes entre resultados computacionais e experimentais da potência caapturada para cada conjunto de nós em funcionamento usando o Método 2	42
Figura 5.5: Campo de pressões de uma onda com $T=10$ s, $H=3,25$ m e $d=18,3$ m no instante t inicial	43

Figura 5.6: Campo de velocidades com $T=10$ s, $H=3,25$ m e $d=18,3$ m no instante t inicial ..	44
Figura 5.7: Campo com a carga hidráulica com $T=10$ s, $H=3,25$ m e $d=18,3$ m no instante t inicial	44
Figura 6.1: Superfície livre de uma onda ($T=10$ s, $d=18,3$ m, $H=0,2$ m) no domínio de validade da teoria Linear simulada com a onda de Stokes de segunda ordem	49
Figura 6.2: Superfície livre de uma onda ($T=10$ s, $d=18,3$ m, $H=1,5$ m) no domínio de validade da onda de Stokes de segunda ordem simulada com essa teoria	50
Figura 6.3: Superfície livre de uma onda ($T=10$ s, $d=18,3$ m, $H=6$ m) no domínio de validade da onda de Stokes de terceira ordem com a onda de Stokes de segunda ordem	50
Figura 6.4: Superfície livre de uma onda ($T=10$ s, $d=18,3$ m, $H=12$ m) no domínio de validade da onda cnoidal simulada com a onda de Stokes de segunda ordem	51
Figura 6.5: Representação da evolução da potência turbinada com o aumento da altura da onda para cada período de onda simulado usando o Método 1 com 3 nós em funcionamento	53
Figura 6.6: Curvas de potência obtidas experimentalmente num modelo à escala 1,5:100 (adaptado de Lopes de Almeida et al (2016)).....	54
Figura 6.7: Perfis de velocidade de diferentes ondas	54

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1: Equações, coeficientes de correlação das curvas e intervalo de x_1	31
Tabela 3.2: Intervalos de x usados para determinar o intervalo de validade.....	32
Tabela 5.1: “Power matrix” (potência capturada em kW) obtida experimentalmente a uma profundidade correspondente a 18,3 m num protótipo à escala 1,5:100. Altura (H) em metros e período (T) em segundos (Lopes de Almeida et al, 2016).....	41
Tabela 5.2: Média das relações de cada conjunto de nós para diferentes métodos.....	43
Tabela 5.3: Diferencial de pressões abaixo da cava e crista de uma onda com $T=10$ s, $H=3,25$ m e $d=18,3$ m no instante t inicial	44
Tabela 5.4: “Power matrix” obtida com uma largura do dispositivo igual a 10 m, 3 nós em funcionamento e uma profundidade de 18,3 m. Altura (H) em metros e período (T) em segundos	45
Tabela 5.5: “Power matrix” obtida com uma largura do dispositivo igual a 5 m, 3 nós em funcionamento e uma profundidade de 18,3 m. Altura (H) em metros e período (T) em segundos	45
Tabela 5.6: Dados relativos à variação da largura do dispositivo, potência média obtida e comparação com a largura original	46
Tabela 5.7: “Power matrix” obtida com um comprimento do dispositivo igual a 176 m, 3 nós em funcionamento e uma profundidade de 18,3 m. Altura (H) em metros e período (T) em segundos	46
Tabela 5.8: “Power matrix” obtida com um comprimento do dispositivo igual a 44 m, 3 nós em funcionamento e uma profundidade de 18,3 m. Altura (H) em metros e período (T) em segundos	46
Tabela 5.9: “Power matrix” obtida com um comprimento do dispositivo igual a 22 m, 3 nós em funcionamento e uma profundidade de 18,3 m. Altura (H) em metros e período (T) em segundos	47
Tabela 5.10: Dados relativos à variação do comprimento do dispositivo, potência média obtida e comparação com o comprimento original	47
Tabela 5.11: “Power matrix” obtida usando a Teoria Linear com 3 nós em funcionamento e uma profundidade de 18,3 m. Altura (H) em metros e período (T) em segundos.....	48
Tabela 5.12: “Relação entre as potências obtidas usando Teoria Linear e onda de Stokes de ordem 2 com 3 nós em funcionamento e uma profundidade de 18,3 m. Altura (H) em metros e período (T) em segundos	48
Tabela B.1: Pontos retirados do diagrama apresentado na Figura 2.3	B-1
Tabela C.1: Matriz obtida usando o Método 1 e 1 nó	C-1
Tabela C.2: Matriz obtida usando o Método 1 e 2 nós.....	C-1
Tabela C.3: Matriz obtida usando o Método 1 e 3 nós.....	C-1

Tabela C.4: Matriz obtida usando o Método 1 e 4 nós.....	C-1
Tabela C.5: Matriz obtida usando o Método 2 e 1 nó	C-1
Tabela C.6: Matriz obtida usando o Método 2 e 2 nós.....	C-1
Tabela C.7: Matriz obtida usando o Método 2 e 3 nós.....	C-1
Tabela C.8: Matriz obtida usando o Método 2 e 4 nós.....	C-1
Tabela C.9: Quociente usando o Método 1 e 1 nó.....	C-2
Tabela C.10: Quociente usando o Método 1 e 2 nós.....	C-2
Tabela C.11: Quociente usando o Método 1 e 3 nós.....	C-2
Tabela C.12: Quociente usando o Método 1 e 4 nós.....	C-2
Tabela C.13: Quociente usando o Método 2 e 1 nó	C-2
Tabela C.14: Quociente usando o Método 2 e 2 nós.....	C-2
Tabela C.15: Quociente usando o Método 1 e 3 nós.....	C-2
Tabela C.16: Quociente usando o Método 1 e 4 nós.....	C-2

ABREVIATURAS

CAO – Coluna de água oscilante

CFD - Computational Fluid Dynamics

DNV – DET NORSKE VERITAS

EMEC – European Marine Energy Center

IEA – International Energy Agency

REEFS – Renewable Electric Energy From Sea

WEC – Wave Energy Converter

SIMBOLOGIA

$A_{adu/res}$	Área da adução ou da restituição	H_i	Altura inicial da onda
A_c	Altura da crista da onda	$H_{loc.adu/res}$	Perda de carga localizada nos nós de adução ou restituição
$A_{mol.adu/res}$	Área molhada da adução ou da restituição	$H_{máx.}$	Queda máxima da turbina
$B_{adu/res}$	Largura da adução ou da restituição	$H_{mín.}$	Queda mínima da turbina
$B_{disp.}$	Largura do dispositivo	$H_{útil}$	Queda útil
c	Celeridade da onda	J	Perda de carga unitária
$C_{adu/res}$	Comprimento da adução ou da restituição	k	Número de onda
$C_{disp.}$	Comprimento do dispositivo	$k_{adu/res}$	Coefficiente de perda de carga localizada nos nós de adução ou restituição
c_g	Celeridade de grupo	$k_{hid.adu/res}$	Coefficiente de rugosidade do circuito hidráulico da adução ou da restituição
d	Profundidade do meio	$L_{hid.adu/res}$	Comprimento do circuito hidráulico da adução ou da restituição
$D_{hid.adu/res}$	Diâmetro hidráulico da adução ou da restituição	$N_{adu/res}$	Número de pontos usados para a adução ou para a restituição
$E_{adu/res}$	Carga hidráulica na adução ou na restituição	$N_{máx.adu/res}$	Número máximo de nós que abrem na adução ou na restituição
E_{onda}	Energia da onda	$Nó_{adu/res}$	Nós correspondentes à adução ou à restituição
$E_{turb.}$	Energia turbinada	$Nó_{func.adu/res}$	Nós de adução ou de restituição em funcionamento
g	Aceleração da gravidade	N_x	Número de pontos horizontais da malha
H	Altura da onda	N_z	Número de pontos verticais da malha
$H_{disp.}$	Altura do dispositivo	p	Pressão abaixo da superfície
$H_{hid.adu/res}$	Perda de carga localizada no circuito hidráulico de adução ou de restituição	P_{onda}	Potência da onda

$P_{\text{méd. turb.}}$	Potência média turbinada	$Z_{\text{adu/res}}$	Cota correspondente aos nós de adução ou de restituição
$P_{\text{mol.adu/res}}$	Perímetro molhado da adução ou da restituição	Z_j	Distância do nó vertical j à origem
P_{turbina}	Potência instalada da turbina	$Z_{\text{nó}}$	Ordenadas dos nós
$P_{\text{turb.t}}$	Potência turbinada até ao instante t	Z_{turbina}	Ordenada da turbina
$Q_{\text{adu/res}}$	Caudal da adução ou da restituição	$\alpha_{\text{adu/re}}$	Efeito de concentração das diretrizes da adução ou da restituição
$Q_{\text{hid.}}$	Caudal no circuito hidráulico	ΔH	Variação entre superfície livre e corrigida
t	Instante de tempo	Δt	Incremento de tempo
T	Período da onda	Δx	Distância entre pontos horizontais
$T_{\text{máx.}}$	Instante final de simulação	Δz	Distância entre pontos verticais
u	Componente horizontal da velocidade da onda	ρ	Massa volúmica da água
v	Módulo da velocidade da onda	γ	Peso volúmico da água
$V_{\text{hid.adu/res}}$	Velocidade no circuito de adução ou da restituição	λ	Comprimento de onda
V_{lateral}	Volume lateral	λ_i	Aproximação inicial do comprimento de onda
$V_{\text{méd}}$	Velocidade média nos nós em funcionamento	θ	Fase da onda
w	Componente vertical da velocidade da onda	η	Superfície livre
X_i	Distância do nó horizontal i à origem	η_l	Componente linear da superfície livre
$X_{\text{nó}}$	Abcissas dos nós	η_s	Componente de segunda ordem da superfície livre
X_{onda}	Abcissa do ponto no diagrama de validade	η_{turbina}	Rendimento da turbina
X_{turbina}	Abcissa da turbina	ω	Frequência angular da onda
y_{onda}	Coordenada y do ponto no diagrama de validade		

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo da dissertação

Esta dissertação teve como objetivo o desenvolvimento de um modelo computacional para avaliação da produtibilidade energética de um novo conversor de energia das ondas. A complexidade dos fenómenos hidráulicos envolvidos, a novidade associada ao processo de funcionamento do conversor de energia das ondas e a limitação do tempo disponível para o desenvolvimento do presente trabalho, desde logo aconselharam uma abordagem necessariamente simplificada. Para o efeito foi desenvolvido um modelo computacional simplificado recorrendo à associação da teoria de propagação de ondas de gravidade de Stokes de ordem 2 com um modelo hidráulico simplificado do funcionamento do conversor de energia das ondas, assumindo um comportamento segundo o modelo de Froude-Krylov (Chakrabarti, 1987). Pretende-se comparar o modelo computacional simplificado com resultados preliminares de testes experimentais de um modelo à escala reduzida 1:67 do novo conversor de energia das ondas. Deste modo será possível indagar da viabilidade do modelo computacional simplificado em reproduzir os fenómenos físicos envolvidos no processo de extração da energia das ondas.

1.2 Estrutura da dissertação

No primeiro capítulo são expostos o objetivo e estrutura desta dissertação e é feito um breve enquadramento no âmbito da energia das ondas.

No segundo capítulo são apresentadas algumas teorias de propagação de ondas de gravidade, os seus domínios de validade, bem como os principais conversores de energia das ondas atualmente em desenvolvimento.

No terceiro capítulo é apresentado o dispositivo REEFS e o seu princípio de funcionamento. Também é descrito um modelo conceptual de funcionamento do dispositivo com as devidas simplificações.

No quarto capítulo é apresentado o modelo computacional baseado no modelo conceptual anteriormente descrito.

No quinto capítulo é aplicado o modelo computacional considerando diferentes ondas características da costa oeste portuguesa sendo avaliada a capacidade de produção potencial através da correspondente “power matrix”.

No sexto capítulo são discutidos os resultados obtidos os quais são também comparados com resultados experimentais preliminares entretanto disponibilizados.

No sétimo capítulo são apresentadas as referências bibliográficas usadas neste trabalho.

No final da dissertação estão compilados os anexos que vão sendo referidos ao longo do texto.

1.3 Enquadramento

Com a tendência do aumento populacional mundial aliado ao incremento da qualidade de vida dos países em vias de desenvolvimento e com a exploração das reservas finitas de combustíveis fósseis, é necessário procurar energias alternativas que permitam uma satisfação dos consumos compatível com as necessidades mundiais. Em 2014 foram consumidos aproximadamente 9400 Mtep em todo o mundo e mais de 80% dessa energia ainda provinha de combustíveis fósseis apesar da tendência de diminuição na utilização destas fontes (IEA, 2016). Para além de serem uma fonte energética não-renovável, os combustíveis fósseis são ainda uma grande fonte de poluição atmosférica desde a sua obtenção à sua utilização. As energias limpas e renováveis não são uma novidade, as barragens, turbinas eólicas, painéis solares e fotovoltaicos já estão no mercado há alguns anos. No entanto, todas elas apresentam algumas desvantagens como o espaço útil necessário à instalação ou a alteração de habitats (no caso de aproveitamentos hidroelétricos que criem grandes albufeiras). É necessário, por isso, encontrar alternativas limpas e renováveis à escala humana que não tenham um grande impacto ambiental negativo, como por exemplo, a energia das ondas oceânicas. As ondas oceânicas são causadas por forças externas que provocam deformações na massa de água (Dean e Dalrymple, 1991), estas deformações propagam-se no meio e, em alguns casos, podem produzir efeitos de forma lenta (e.g.: erosão costeira) ou repentina (e.g.: inundações costeiras devido a tsunamis). São, por isso, uma fonte energética com um potencial elevado, apenas faltando encontrar um dispositivo para aproveitar de forma eficiente esta energia existente em estado bruto.

As melhores latitudes para uma boa obtenção deste recurso energético são entre 30° e 60° como se pode ver na Figura 1.1 (Portugal encontra-se numa latitude próxima de 40°N, é por isso um bom local) e em locais com grande intensidade de ventos (Santos Silva, 2008). Existem muitos conversores de energia das ondas (WEC na sigla inglesa) patenteados no Japão, América do Norte e Europa (Clément et al, 2002) em diversas fases de maturação, no entanto, ainda não existe uma tecnologia dominante.

Estima-se que a energia total das ondas incidente na costa mundial é de 2,1 TW e que, em Portugal é de 15 GW (Gunn e Stock-Williams, 2012). Devido à nossa ligação ao mar, à

extensa costa e infraestruturas disponíveis, temos na energia das ondas uma possível solução para a nossa dependência na importação de energia.

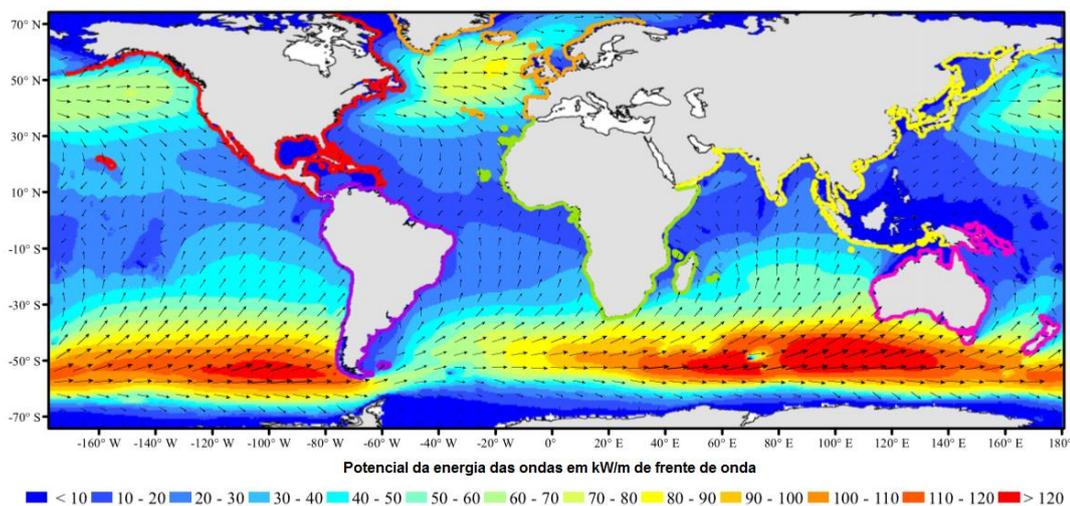


Figura 1.1: Potencial da energia das ondas em kW/m de frente de onda e direção predominante anual (adaptado de Gunn e Stock-Williams (2012))

O custo da eletricidade produzida pelos WEC ainda é considerado elevado, contudo ainda existem muitos parâmetros que podem ser otimizados de forma a reduzir os custos (López et al, 2013). Um dos parâmetros que é necessário quantificar é o desempenho na captura da energia das ondas e, para isso, são criados modelos dos dispositivos em escalas reduzidas bem como modelos computacionais que avaliam o desempenho dos WEC's.

2 ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Neste capítulo será feita uma breve análise à bibliografia mais relevante associada às teorias de propagação de ondas de gravidade, à validade dessas teorias e às tecnologias mais usadas.

Visto que o principal objetivo desta dissertação é a criação de um modelo computacional simplificado que quantifique a potência capturada por um determinado WEC, é necessário simular as ondas que transportarão essa energia capturável. Existem muitas teorias de propagação de ondas de gravidade que simulam a forma da superfície livre da onda e as distribuições da pressão e velocidade ao longo da onda. Estas teorias serão introduzidas na secção seguinte. As teorias apresentam domínios de validade como será mostrado adiante no texto. Também serão apresentadas algumas das tecnologias de conversão da energia das ondas mais usadas.

2.2 Teorias de propagação de ondas de gravidade

2.2.1 Introdução

Desde cedo se começou a procurar modelos matemáticos para representar uma onda com determinadas características. Alguns investigadores importantes na área foram F. J. Gerstner, George B. Airy, George G. Stokes, Sir Horace Lamb, entre muitos outros.

A Figura 2.1 representa as principais características de uma onda sinusoidal no instante t , entre elas, a celeridade da onda (c), a profundidade do meio (d), a altura da onda (H), o comprimento de onda (λ), o período da onda (T) e a superfície livre (η). A crista da onda é o ponto mais elevado da superfície livre e a cava da onda é o seu ponto mais baixo.

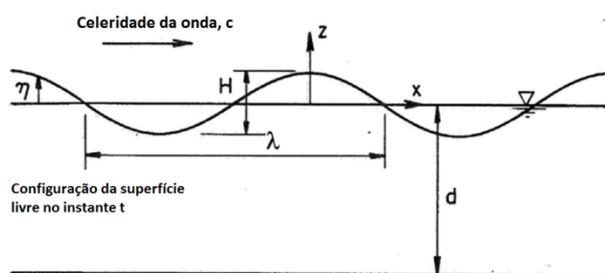


Figura 2.1: Representação de uma onda sinusoidal e respetivas características (adaptado de DNV (2010))

Segundo Le Méhauté (1976), do ponto de vista físico existem dois tipos de ondas: oscilatórias e de translação. A onda oscilatória pode ser progressiva se o observador viajar à mesma velocidade da onda e esta não se alterar ou estacionária se o movimento da onda for apenas vertical (sem uma direção aparente no plano horizontal). É útil referir que existem alguns fenómenos que alteram as características das ondas oscilatórias apesar de estes fenómenos não serem considerados neste trabalho devido às simplificações feitas no modelo. Estes fenómenos são a refração, difração, rebentação da onda, entre outros. A refração ocorre quando uma onda atravessa um meio com profundidades diferentes, a onda diminui de velocidade ao chegar a uma profundidade menor que a anterior. A difração ocorre após um obstáculo onde haja uma alteração da altura de onda ao longo da crista, a energia é transmitida no sentido onde a altura de onda é menor. A rebentação acontece quando as partículas da crista da onda se movimentam mais rápido que as partículas inferiores, isto pode ocorrer devido a ventos superficiais ou devido a baixas profundidades (a onda atinge o fundo e diminui a sua velocidade sem alterar a velocidade da crista).

A geração de ondas pode ter diferentes causas, as ondas geradas por ventos são as mais comuns e responsáveis pela grande fatia energética associada às ondas oceânicas, existem também ondas geradas por astros (Lua e Sol) que têm períodos de onda muito longos, estas ondas são conhecidas como marés. Existem ainda os tsunamis, ondas originadas por movimentos de placas tectónicas, deslizamento de taludes ou atividade vulcânica e, por fim, as ondas capilares associadas a ventos fracos. As ondas progressivas movimentam-se para longe dos locais onde são geradas e, inevitavelmente, acabam por atingir as zonas costeiras onde rebentam ou atingem obstáculos perdendo a sua energia (Carmo, 2016). A propagação de ondas depende das condições do meio, as quais estão constantemente a mudar pois dependem das condições meteorológicas e oceânicas tais como os ventos que alteram a superfície, as ondas transportadas desde os locais de formação e as correntes de superfície ou profundas (Chakrabarti, 2005). Segundo Airy (1845), o movimento de uma onda linear não implica a propagação da massa de água mas sim a propagação da sua forma (ou arranjo de partículas).

Dependendo das características iniciais da onda e do meio de propagação, esta pode assumir diferentes formas que são reproduzidas por diversas teorias de propagação de ondas de gravidade, cada uma aplicável a determinadas situações. Alguns parâmetros a ter em conta na definição dos seus domínios de validade são a inclinação relativa da onda $\left(\frac{H}{gT^2}\right)$ e a profundidade relativa da onda $\left(\frac{d}{gT^2}\right)$ (Chakrabarti, 1987). É possível ver que a definição do intervalo de validade das ondas depende essencialmente de três características: altura da onda (H), período da onda (T) e profundidade do meio (d).

Tal como estabelecido na norma DNV-RP-C205 (DNV, 2010), os modelos usados para a simulação do movimento de uma onda podem ser lineares (Teoria Linear) ou não-lineares (Onda de Stokes de segunda ordem ou de ordens superiores, Equações de Saint-Venant, Teoria Cnoidal, Onda Solitária, Função de corrente, entre outras). As várias teorias têm diferentes domínios de validade.

Existe ainda a modelação de ondas irregulares, ondas que representam melhor a situação real as quais podem ser representadas por modelos lineares (caso mais simples e pouco preciso) ou não-lineares (Método de Grue, Método de Wheeler ou o Modelo Cinemático de Segunda Ordem) (DNV, 2010). No entanto, para resolver estas teorias da onda é necessário recorrer a modelos computacionais muito complexos, tais como os CFD ou modelos não-lineares para ondas irregulares. Com o avanço tecnológico, o processamento de informação e armazenamento de dados foram melhorados, o que permitiu o uso de programas mais sofisticados sem a necessidade de tantas restrições (Carmo, 2016).

Para a realização do modelo computacional proposto nesta dissertação será usada a onda de Stokes de segunda ordem. Também serão referidas as teorias Linear, Cnoidal e de Stokes de ordem superior no âmbito dos domínios de validade destas teorias. A onda linear pode ser definida por uma função sinusoidal (ver Figura 2.2). A onda de Stokes de segunda ordem é semelhante à onda de primeira ordem (linear) com a particularidade de ter as cristas mais elevadas e as cavas mais achatadas (ver Figura 2.2) segundo um fator igual a $\left(1 + \frac{\pi H}{2\lambda}\right)$ (para a cava, o segundo termo é negativo).

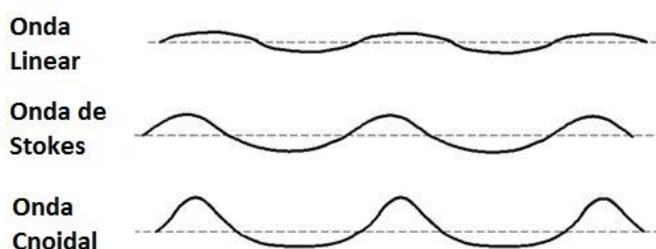


Figura 2.2: Superfície livre característica de diferentes teorias de propagação de ondas de gravidade (adaptado de Flow3d@ 2014)

2.2.2 Ondas de Stokes e outras teorias relevantes

No século XIX George B. Airy propôs uma teoria linear para representar os campos de pressão e velocidade assim como a superfície livre de uma onda de gravidade com forma sinusoidal. Para uma análise detalhada das formulações matemáticas consultar Airy (1845). Esta teoria também é conhecida como Teoria de Airy, Teoria Linear ou Onda de Stokes de

primeira ordem. Para condições no domínio da Teoria Linear, esta consegue representar de forma perfeita as ondas porque estas se assumem harmónicas e lineares, no entanto, fora do domínio desta teoria é necessário usar formulações diferentes (Holthuijsen, 2007).

George G. Stokes apresentou, uns anos mais tarde, aproximações de ordem superior para esta teoria (ordens 2 e 3) (Stokes, 1847). Stokes refere ainda que, para qualquer ordem de aproximação, as ondas apresentam simetria num plano vertical que atravesse a crista e num que atravesse a cava. É de notar que, ainda antes de Airy apresentar a Teoria Linear, já F. J. Gerstner tinha apresentado uma teoria não-linear que representava uma onda na forma de um troçoide (Gerstner, 1802). A onda de Stokes de segunda ordem tem uma forma aproximada à Onda de Gerstner, com cristas pontiagudas e cavas alongadas (Lamb, 1916).

Segundo Stokes, o uso de aproximações de ordens superiores traz a desvantagem de ter fórmulas muito complexas (cada ordem acrescenta um novo termo à fórmula da ordem anterior) o que torna as equações de difícil resolução. Com os recursos computacionais atuais este não é um problema tão relevante como o era na época de Stokes.

A onda de Stokes de segunda ordem é a teoria que irá ser usada porque os resultados dos testes preliminares disponíveis estão maioritariamente neste domínio de validade (Lopes de Almeida et al, 2016). Segundo Lamb (1916), para comprimentos de onda muito maiores que a profundidade do meio as aproximações de Stokes tornam-se inapropriadas. É o caso da Onda Solitária investigada por Scott Russel (1845) e mais tarde investigada por Boussinesq (1872). A Teoria Cnoidal cujo domínio de validade está próximo das Ondas de Stokes não será abordada neste texto. Informações sobre esta teoria poderão encontrar-se em Wiegel (1960) e Fenton (1998).

2.2.3 Domínio de validade das teorias

Existem vários intervalos de validade correspondentes às diferentes teorias como se pode ver na Figura 2.3. A rotina computacional desenvolvida apenas simula a onda de Stokes de segunda ordem. Se as condições estiverem fora do domínio de validade desta teoria, o utilizador fica avisado para a possibilidade de existir um desvio nos resultados devido à utilização da teoria indevida (este erro não será relevante se as condições estiverem próximas do intervalo de validade da teoria adotada que é o que se considera relativamente às situações que irão ser simuladas).

Uma forma de representar os diferentes domínios de validade é usando um diagrama tal como apresentado em Le Méhauté (1976), Chakrabarti (1987) e Carmo (2016). O eixo vertical mede a inclinação relativa e o horizontal mede a profundidade relativa.

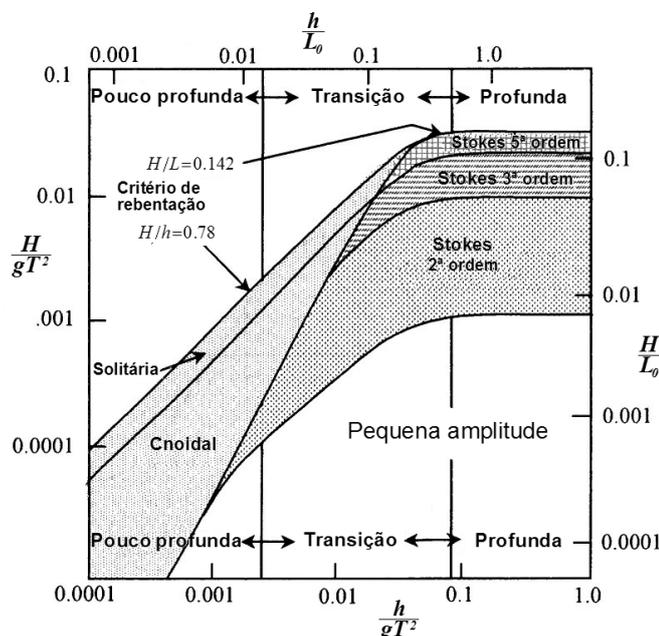


Figura 2.3: Domínio de validade das principais teorias de propagação de ondas de gravidade (Carmo, 2016)

2.3 Tecnologias atuais

2.3.1 Introdução

As tecnologias de aproveitamento das ondas oceânicas atualmente em desenvolvimento podem ser categorizadas, de um modo geral, segundo a sua localização, tipo de dispositivo e modo de operação, como de seguida se apresenta (Drew et al, 2009).

Segundo a localização do dispositivo face à costa, as tecnologias podem ser “onshore”, “nearshore” e “offshore”, i.e. na costa, junto à costa e ao largo, respetivamente.

São designadas “onshore” se estiverem instaladas diretamente na costa. Estas tecnologias apresentam vantagens como a facilidade de manutenção, acesso à rede elétrica e proteção de tempestades mas a sua instalação depende do recorte costeiro e da legislação. A baixa profundidade associada à zona costeira pode ainda ser um factor desfavorável visto que a menor profundidade leva a uma maior diminuição de energia. Os dispositivos “onshore” podem no entanto beneficiar da concentração da direção do fluxo de energia das ondas devido a processos de refração que tendem a paralelizar a crista da onda com a linha de costa.

Se os dispositivos estiverem próximos da costa e a baixa profundidade designam-se “nearshore”. A profundidade baixa é um parâmetro que não depende apenas da profundidade do meio, também depende do comprimento de onda. Também estes dispositivos são sujeitos a ondas que sofrem alguma dissipação de energia pelas baixas profundidades. No entanto, têm a

vantagem de poderem estar instalados em local acessível sem elevados custos (comparativamente a grandes profundidades).

Existem ainda as tecnologias “offshore” que estão presentes em águas profundas. A definição de águas profundas também depende do comprimento de onda. Os dispositivos nesta localização podem capturar mais energia mas têm de resistir aos efeitos destrutivos do mar aberto. A instalação em águas profundas é muito mais difícil e dispendiosa e acarreta maiores custos de manutenção.

Relativamente ao tipo de tecnologia de captura de energia, o dispositivo pode ser: atenuador; “point-absorber” e terminador.

Um dispositivo atenuador é instalado de forma paralela à direção predominante das ondas e aproveita o movimento destas para produzir energia.

Um sistema oscilante de simetria axial (“point-absorber”) é um dispositivo de menor dimensão que aproveita o movimento vertical das ondas para produzir energia. Como captura apenas a energia num ponto (onde está instalado), este dispositivo é mais versátil e pode atuar em locais onde as ondas têm direção variável.

Os dispositivos terminadores estão instalados perpendicularmente às ondas e intercetam-nas fisicamente (existe contacto direto entre a frente da onda e o dispositivo).

Atentando agora ao modo de operação destacam-se os dispositivos diferenciais, corpos oscilantes, coluna de água oscilante e dispositivos sujeitos a galgamento.

Os dispositivos diferenciais aproveitam a diferença de pressão entre a crista e a cava acima do dispositivo. Estes são estáticos e têm de estar presos ao fundo do mar.

Os corpos oscilantes são corpos móveis que aproveitam a componente horizontal da velocidade das ondas que tem sentido positivo abaixo da crista e negativo abaixo da cava. O corpo móvel movimenta-se no sentido de propagação da onda enquanto está sob influência da crista e no sentido contrário quando está sob influência da cava.

O dispositivo com a tecnologia de coluna de água oscilante (CAO) tem uma câmara aberta à água por baixo e aberta ao ar em cima. Este expulsa o ar do interior da câmara quando entra água e recebe ar do exterior quando sai água, o ar passa por uma turbina produzindo energia.

Um dispositivo sujeito a galgamento armazena água de ondas que o galgam e conduz o volume de água de volta para o mar após passar por turbinas.

Serão apresentados os principais WEC's existentes que operam segundo as tecnologias referidas.

É de notar que, apesar do grande número de patentes e diferentes tecnologias, ainda não se tem a certeza qual será a principal tecnologia de aproveitamento de energia das ondas. O futuro desta área tecnológica ainda está em aberto.

2.3.2 Principais WEC's existentes

Nesta secção serão identificados alguns dos dispositivos mais relevantes na captura da energia das ondas e a respetiva tecnologia utilizada.



Figura 2.4: Exemplo de um atenuador, Pelamis (Fotografia: J.P.P.G. Lopes de Almeida)



Figura 2.5: Central CAO na ilha do Pico (Pico OWC@ 2006)



Figura 2.6: Exemplo de um “point-absorber”, PowerBuoy (PowerBuoy@ 2017)

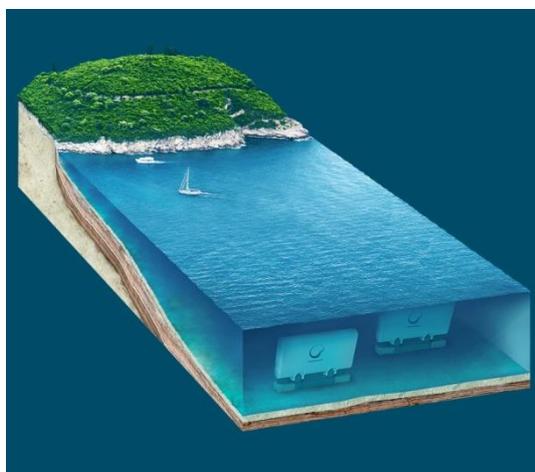


Figura 2.7: Exemplo de um dispositivo de corpo oscilante, WaveRoller (WaveRoller@ 2012)

3 DISPOSITIVO ANALISADO

3.1 Breve descrição do dispositivo analisado

O dispositivo que será analisado nesta dissertação é uma tecnologia de captura da energia das ondas já submetida a registo de patente internacional (Lopes de Almeida, 2015), cuja propriedade pertence à Universidade de Coimbra. Tal como apresentado em Lopes de Almeida (2017), o novo conversor de energia das ondas de ora em diante designado REEFS acrónimo que em língua inglesa significa Renewable Electric Energy From Sea, consiste numa estrutura submersa e fixa no fundo do mar, a baixa profundidade e próximo da costa. O dispositivo é composto por três partes: a estrutura, as membranas de entrada e saída de água e a turbina. Permite capturar energia cinética do campo de velocidades orbitais da onda e energia potencial associada à diferença de pressão entre a crista e a cava da onda. Uma externalidade do dispositivo é proporcionar a rebentação das ondas de altura mais elevada antes que estas cheguem à linha de costa, dado que se trata de um recife artificial. Pode assim eventualmente ter um efeito benéfico na mitigação da erosão costeira se se usarem múltiplos dispositivos.

A estrutura é composta por betão mas também pode ser constituída por outros materiais como o aço. Tem um comprimento semelhante ao comprimento das ondas características do local de instalação e a sua maior dimensão é paralela à direção de propagação das ondas. O dispositivo tem a forma de um paralelepípedo perfurado em volta do qual estão instaladas superfícies de porosidade variável. No seu interior existe uma turbina hidráulica de ultra baixa queda. No exterior do dispositivo estão instaladas diretrizes que permitem concentrar e direcionar o fluxo associado ao campo de velocidades orbitais para a face superior do dispositivo através da qual é efectuada a adução para a turbina. Nas faces laterais do dispositivo onde estão instaladas as restituições do circuito hidráulico, as diretrizes criam um efeito de aspiração que facilita a saída de água. O dispositivo REEFS está representado, de forma simplificada, na Figura 3.1.

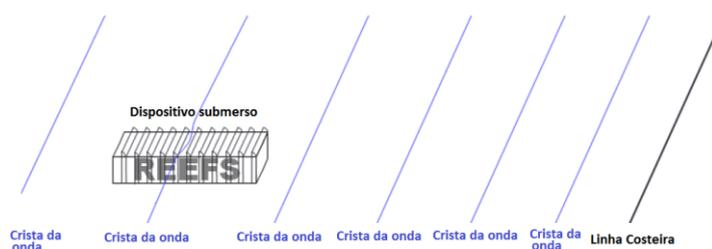


Figura 3.1: Representação simplificada do posicionamento do REEFS (adaptado de Lopes de Almeida (2017))

As membranas permitem a entrada e saída de água para as maiores e menores pressões, respetivamente. O diferencial de pressões criado entre a crista e a cava permite a captura da energia potencial da onda durante a sua propagação. Estas membranas são compostas por uma malha compósita feita de um tecido rede-membrana com elasticidade e resistência suficientes para abrir e fechar mediante o campo de pressões, sem romper e em pequenos instantes de tempo. Esta malha está disposta nas faces superior e laterais.

O interior do dispositivo contém três canais. Um canal triangular que liga as aberturas de adução (nós de adução localizados na face superior do dispositivo) à turbina que está localizada numa das extremidades do dispositivo (circuito hidráulico de adução). Os outros dois canais ligam a turbina às aberturas de restituição (nós de restituição localizados nas faces laterais do dispositivo) conduzindo a água no sentido oposto ao da propagação da onda (circuito hidráulico de restituição). A Figura 3.2 representa de forma simplificada um corte transversal do dispositivo de altura $H_{disp.}$ e largura $B_{disp.}$.

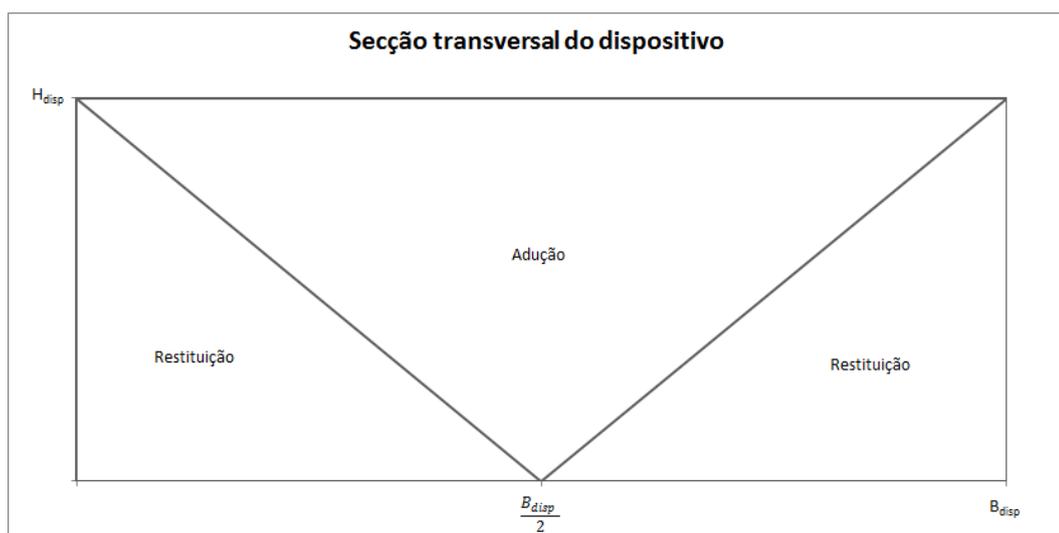


Figura 3.2: Representação simplificada da secção transversal do dispositivo

O grupo turbogerador é totalmente submersível com turbina axial, do tipo Kaplan de ultra baixa queda. Existem já soluções deste tipo no mercado. Estas turbinas apresentam a extraordinária vantagem de permitirem a sobrevivência da ictiofauna que eventualmente as atravesse. A Figura 3.3 apresenta um exemplo deste tipo de turbinas.



Figura 3.3: Turbina de baixa queda (VLH turbine@ 2013)

O facto do dispositivo estar próximo da costa, em baixas profundidades, permite que haja uma estabilização da direção das ondas devido à refração (lei de Snell, Dean e Dalrymple (1991)), a qual leva a que a orientação das cristas seja tendencialmente paralela à linha de costa. O mesmo não acontece em grandes profundidades, onde a direção será essencialmente condicionada pela direção dominante dos ventos na zona de “fetch”. As baixas profundidades também permitem a ocorrência do empolamento da onda (“shoaling”) que aumenta de altura devido à redução do comprimento da onda. Maiores alturas de onda significam um maior diferencial de pressões entre a crista e a cava o que permite uma maior potência turbinada, mas também pode significar, caso a altura seja excessiva, a rebentação prematura da onda. Menores comprimentos de onda beneficiam a estrutura que não precisa de ser tão comprida para aproveitar a energia de toda a onda incidente e, assim, permite a diminuição dos custos de construção e instalação.

3.2 Princípio de funcionamento

O objetivo do dispositivo é produzir energia aproveitando o campo de pressões e de velocidades orbitais da onda. O fluido entra pelas aberturas localizadas na face superior do dispositivo quando estas estão expostas a um diferencial de pressão suficiente para abrirem. Isto ocorre quando a crista está por cima das aberturas cujo sistema compósito rede-membrana abre para dentro (abaixo da crista as pressões são superiores) deixando entrar água no circuito hidráulico. A água é conduzida pelo circuito hidráulico de adução até à turbina ligada a um gerador onde pode produzir energia elétrica. Após passar na turbina, a água é conduzida pelo circuito hidráulico de restituição até às faces laterais onde sai pelas aberturas laterais. Se estiverem localizadas abaixo da cava da onda (onde a pressão é menor), o seu sistema compósito rede-membrana abre para fora deixando sair água para o meio envolvente.

Atentando à Figura 3.4, a água entra no nó de adução sujeito à maior pressão (a verde) localizado abaixo da crista da onda (a branco) e movimenta-se em direção à turbina (a roxo), após sair da turbina segue para o nó de restituição sujeito à menor pressão (a vermelho) onde sai para o meio recetor (considerado imperturbável) por ambas as faces laterais do dispositivo.

Assumimos que o dispositivo é um paralelepípedo de largura $B_{disp.}$, comprimento $C_{disp.}$ e altura $H_{disp.}$ a partir do fundo do mar. A profundidade do meio (d) corresponde à distância vertical entre o fundo oceânico e o nível médio do mar.

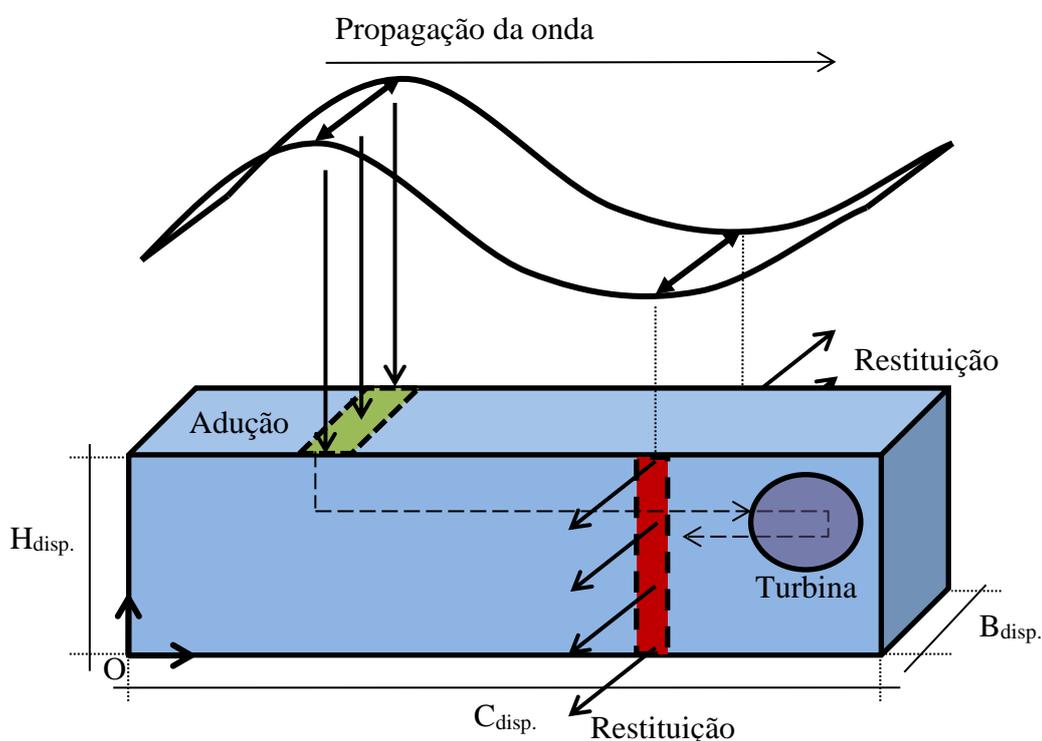


Figura 3.4: Representação simplificada do funcionamento do REEFS

3.3 Modelo conceptual simplificado de funcionamento

3.3.1 Introdução

Visto que o funcionamento do dispositivo de recuperação da energia sob ação da agitação marítima se revela um processo de elevada complexidade em termos dos fenómenos físicos envolvidos, é necessário recorrer a diversas simplificações para tornar possível a sua modelação computacional. O modelo conceptual de seguida apresentado, corresponde a uma evolução do inicialmente implementado pelo Eng. João Abrantes sob orientação do Prof. José Lopes de Almeida, no âmbito da disciplina de Seminários II do programa Doutoral em Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, durante o ano letivo de 2013/2014. Trata-se de

um modelo a duas dimensões no plano vertical. Apenas são consideradas ondas regulares cujas acções sobre o dispositivo são essencialmente assemelháveis às de Froude-Krylov (Chakrabarti, 1987) sobre o dispositivo, ou seja, assumindo que o campo de pressões criado pela onda incidente não é perturbado pela presença do dispositivo e que o dispositivo não é demasiado grande comparativamente ao comprimento de onda. O presente modelo foi desenvolvido atendendo à necessidade de simular o funcionamento do dispositivo a baixas profundidades. Esta necessidade obrigou à implementação da teoria de propagação de ondas de gravidade de Stokes de 2ª ordem, em substituição da Teoria Linear implementada no modelo inicial. Esta modificação tornou-se imperativa dada a necessidade de comparação com resultados experimentais obtidos a baixas profundidades e entretanto disponibilizados. Este e outros aspetos serão relevados nos parágrafos seguintes.

3.3.2 Simplificações e métodos usados para estimar a produtibilidade energética do dispositivo

Consideramos que todas as ondas serão simuladas com a teoria de Stokes de 2ª ordem, mesmo que ultrapassem um pouco o domínio de validade desta teoria. Também se considera que a turbina está concentrada num ponto da malha correspondente ao canto direito superior do dispositivo (ver Figura 3.4) e que cada adução e restituição é representada por um nó com as características geométricas correspondentes à fração do dispositivo que representam. Os nós de adução têm a mesma velocidade e pressão ao longo de todo o seu comprimento e largura. Os nós de restituição têm pressões e velocidades variáveis ao longo da sua altura. Para simplificar consideram-se as pressões e velocidades do ponto médio. Considera-se ainda, que as válvulas abrem ou fecham, não há estado intermédio. Na realidade isto não acontece, pois para algumas pressões as válvulas podem abrir apenas parcialmente ou não abrir mesmo que tivessem pressão suficiente para o fazer. Isto poderá acontecer em pressões de adução mais baixas que estão associadas a alturas de onda menores. Também se considera que as válvulas conseguem abrir e fechar num instante inferior a 0,1 s. Os nós de adução estão todos localizados à mesma cota que é igual à altura do dispositivo. O mesmo acontece com os de restituição, com uma cota igual a metade da altura do dispositivo.

Como foi já referido anteriormente, considera-se que a onda não é perturbada pela presença do dispositivo, pelo que as suas características serão determinadas considerando a profundidade média do meio envolvente do dispositivo. No entanto, o processo de modelação não ignora que o circuito hidráulico do dispositivo permitirá um fluxo de massa da crista para a cava da onda. Assim sendo, em cada passo de tempo será contabilizado o volume aduzido (veja-se a Figura 3.4) o qual será subtraído ao volume limitado superiormente pela crista da onda, de modo a corrigir a sua altura (esta correção é ainda complementada pela consideração de um fluxo de massa compensatório com origem na crista inalterada da onda do meio

envolvente para a crista localmente abatida sobre a adução, como será explicado adiante no texto).

O volume aduzido da crista será injetado na cava da onda. No entanto, dado que essa injeção é feita lateralmente e de forma bipartida (veja-se a Figura 3.4) considera-se que não é de molde a poder influenciar de forma expressiva as características da cava da onda pelo que, ao contrário do considerado para a crista, a cota da cava da onda não será alvo de correção.

A profundidade do meio não se altera ao longo do comprimento do dispositivo e não se consideram efeitos de modificação da onda tais como o empolamento, fenómenos de reflexão, refração, difração ou rebentação da onda.

Os dois métodos para caracterizar as velocidades e caudais que passam na turbina são:

Método 1: O caudal turbinado no circuito hidráulico depende do valor das velocidades no início das diretrizes dos nós de adução e no final das diretrizes dos nós de restituição. Estas velocidades assumem-se iguais às dos campos de velocidades orbitais gerado pela onda nos nós de adução e de restituição (ver Figura 3.5).

Método 2: O caudal turbinado no circuito hidráulico depende das características do grupo turbogenerador expressas pela sua curva característica $H_{\text{útil}}=H_{\text{útil}}(Q_{\text{hid.}})$ (ver Figura 3.5).

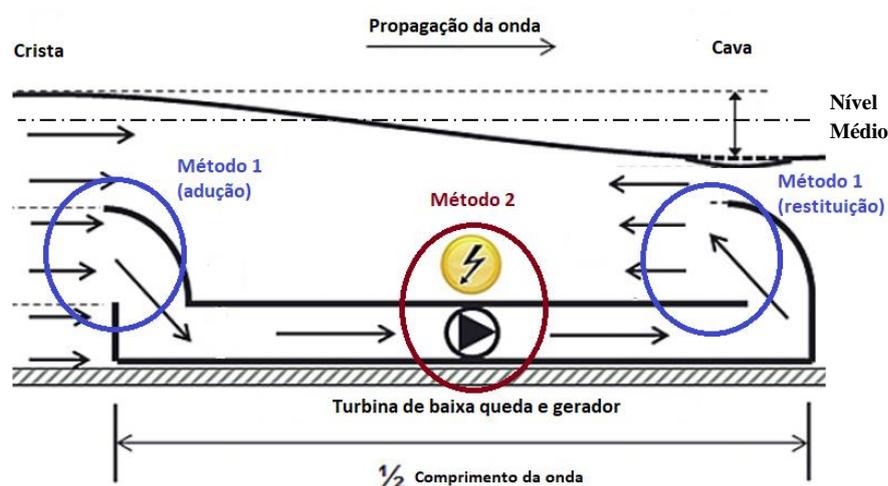


Figura 3.5: Ilustração simplificada do princípio de funcionamento dos Métodos 1 e 2 para um par de aberturas activo (adaptado de Lopes de Almeida (2017))

3.3.3 Dados relativos à onda e dispositivo

De seguida serão apresentados os dados requeridos pela rotina computacional assim como uma breve explicação, quando necessário.

As características físicas da onda são: período da onda (T) e altura inicial da onda (H_i). H_i é a altura da onda no instante inicial. H é a altura da onda em cada instante de tempo. A rotina computacional calcula a potência capturada desde o instante inicial (zero) até ao período de onda. A duração de cada instante será Δt que representa portanto o passo de discretização no tempo.

A relação de dispersão relaciona T e o comprimento de onda λ . Para ondas lineares em profundidades finitas:

$$T = \left[\frac{g}{2\pi\lambda} \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right) \right]^{-1/2} \quad (1)$$

Sendo que, g é a aceleração gravítica. Em termos de frequência angular ($\omega = \frac{2\pi}{T}$) e número de onda ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$), esta relação é dada por:

$$\omega = \sqrt{gk \tanh(kd)} \quad (2)$$

Para ondas lineares, a celeridade da onda, c , apenas depende de λ :

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)} \quad (3)$$

Visto que, $\lambda = cT$:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda_i}\right) \quad (4)$$

É possível ver que o cálculo do comprimento de onda é um processo iterativo. Precisamos por isso de um valor inicial, λ_i , que é obtido através de uma primeira aproximação onde $d > \frac{\lambda}{2}$ (DNV, 2010). Substituindo esta profundidade, obtemos a equação que nos permite obter o primeiro valor da iteração:

$$\lambda_i = \sqrt{gdT} \quad (5)$$

Em cada passo da iteração, λ_i será igual ao λ do passo anterior. Esta iteração pára quando a diferença entre λ e λ_i for muito próxima de zero.

São necessários alguns dados referentes ao circuito hidráulico de adução e restituição (ver Figura 3.2) nomeadamente: o perímetro molhado ($P_{mol.adu}$ e $P_{mol.res}$); a área molhada ($A_{mol.adu}$ e $A_{mol.res}$) e a rugosidade absoluta equivalente ($k_{hid. adu}$ e $k_{hid. res}$). Os valores relativos às áreas e perímetros molhados dependem da forma do dispositivo. Para este caso específico:

$$A_{mol.adu} = A_{mol.res} = \frac{B_{disp.} \times H_{disp.}}{2} \quad (6)$$

$$P_{mol.adu.} = B_{disp.} + 2 \times \sqrt{\frac{B_{disp.}^2}{4} + H_{disp.}^2} \quad (7)$$

$$P_{mol.res.} = 2 \times \left(H_{disp.} + \frac{B_{disp.}}{2} + \sqrt{\frac{B_{disp.}^2}{4} + H_{disp.}^2} \right) \quad (8)$$

De notar que a área molhada é igual para a adução e restituição devido ao formato do circuito hidráulico.

3.3.4 Definição da malha

A malha terá N_x pontos horizontais e N_z pontos verticais, ambos definidos inicialmente pelo utilizador.

Pretende-se que a malha tenha um comprimento igual ao dispositivo. A distância horizontal entre nós da malha é, por isso, definida por Δx :

$$\Delta x = \frac{C_{disp.}}{N_x - 1} \quad (9)$$

Sendo que $(N_x - 1)$ corresponde ao número de intervalos da malha.

A altura da malha será igual à profundidade do meio mais metade da altura de onda. A distância entre pontos verticais (Δz) é calculada através da fórmula seguinte:

$$\Delta z = \frac{\left(d + \frac{H_i}{2}\right)}{N_z - 1} \quad (10)$$

São definidos os valores x e z atribuídos a cada ponto (i,j) da malha. O seu cálculo resulta das seguintes fórmulas:

$$X_i = \Delta x(i - 1) \quad (11)$$

$$Z_j = -d + \Delta z(j - 1) \quad (12)$$

Definido Δz e sabendo que os nós de adução estão localizados à altura do dispositivo e que os nós de restituição estão localizados a metade da altura do dispositivo, podemos calcular as ordenadas dos nós ($Z_{adu.}$ e $Z_{res.}$) correspondentes a essas cotas, a fórmula para obter a cota de adução é a seguinte:

$$Z_{adu.} = \frac{H_{disp.}}{\Delta z} + 1 \quad (13)$$

Para obter a cota de restituição é usada a seguinte fórmula:

$$Z_{res.} = \frac{H_{disp.}}{2\Delta z} + 1 \quad (14)$$

Os valores obtidos não são inteiros e, porque os nós da malha são valores inteiros, é necessário calcular o nó mais próximo do valor obtido. Preferencialmente, será usada uma aproximação ao menor inteiro para que os nós estejam dentro dos valores definidos para o dispositivo (nomeadamente a altura e comprimento).

Assumimos que os nós de entrada (adução) têm uma largura igual à largura do dispositivo e que os nós de saída (restituição) têm uma largura igual à altura do dispositivo ($B_{adu./res.}$). Os comprimentos dos nós de adução e de restituição ($C_{adu./res.}$) são definidos no ficheiro de dados e não podem ser superiores a Δx . O programa redefine estes valores caso o sejam. Isto quer dizer que os nós de entrada e saída podem ter um comprimento máximo igual à distância entre dois pontos consecutivos da malha segundo a direção longitudinal do dispositivo.

Considera-se que a turbina está no final do dispositivo no nó cujas abcissa e ordenada correspondem ao comprimento (N_x) e à cota de adução ($Z_{adu.}$), respetivamente:

$$X_{turbina} = \Delta x(N_x - 1) \quad (15)$$

$$Z_{turbina} = -d + \Delta z(Z_{adu.} - 1) \quad (16)$$

Considera-se para origem do referencial o nó de montante sobre o fundo do mar, i.e. o ponto “O” da Figura 3.4. A cota da turbina é negativa porque, no modelo de cálculo, a altura é negativa quando abaixo do nível médio do mar.

3.3.4.1 Resumo da malha

A Figura 3.6 representa uma simplificação da malha obtida. A preto está representado o dispositivo (vista de perfil) com o número de nós horizontais e verticais apresentados no ficheiro de dados (N_x e N_z , respetivamente), é de notar que o dispositivo coincide exatamente com N_x mas o mesmo não acontece com Z_{adu} , porque este último varia em cada simulação devido a Δz depender da altura da onda inicial, desta forma, a malha tem sempre o mesmo número de pontos apesar de ter diferente altura. A malha começa no ponto 1 tanto em x como em z (não há ponto zero). N_x e N_z definem os limites da malha. As cotas de adução e restituição foram calculadas anteriormente. O grupo turbogerador está representado pelo círculo preto. Está ainda representada a superfície livre de uma parte da onda que passa por cima do dispositivo.

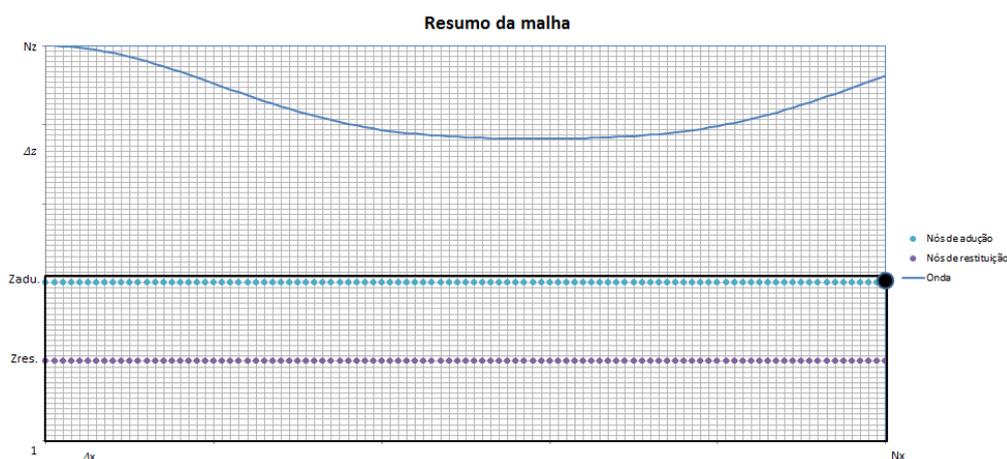


Figura 3.6: Representação simplificada da malha

3.3.5 Onda de Stokes de Ordem 2

Como foi referido, o programa simula no intervalo de validade da teoria de Stokes de segunda ordem. As fórmulas matemáticas da pressão abaixo da superfície (p) (já dividida pelo peso volumico da água (γ) para estar expresso em mca), das velocidades horizontal (u) e vertical (w) e da elevação da superfície livre (η) podem encontrar-se, por exemplo, na norma DNV-RP-C205 (2010). São calculados valores para todos os pontos da malha em cada instante de forma independente (os valores anteriores não afetam o cálculo dos valores seguintes). Notar que H é a altura da onda em cada instante, diferente de H_i . Inicialmente ($t=0$), a altura de onda (H) é igual a H_i , H é recalculado em cada passo de tempo tendo em conta o volume aduzido

(volume que sai) e o volume lateral que entra para compensar a diferença de altura entre a onda acima do dispositivo e a onda fora do dispositivo.

$$\begin{aligned}
 p(x, z, t) = & (-z) + \frac{1}{2}H \frac{\cosh(k(z+d))}{\cosh(kd)} \cos \theta \\
 & + \frac{3}{4}H \frac{\pi H}{\lambda \sinh(2kd)} \left\{ \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^2(kd)} - \frac{1}{3} \right\} \cos(2\theta) \\
 & - \frac{1}{4}H \frac{\pi H}{\lambda \sinh(2kd)} \{ \cosh(2k(z+d)) - 1 \}
 \end{aligned} \tag{17}$$

$$u(x, z, t) = \frac{\pi H \cosh(k(z+d))}{T \sinh(kd)} \cos \theta + \frac{3}{4} \frac{\pi H}{T} \frac{\pi H}{\lambda} \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \cos(2\theta) \tag{18}$$

$$w(x, z, t) = \frac{\pi H \sinh(k(z+d))}{T \sinh(kd)} \sin \theta + \frac{3}{4} \frac{\pi H}{T} \frac{\pi H}{\lambda} \frac{\sinh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \sin(2\theta) \tag{19}$$

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos \theta + \frac{\pi H^2}{8\lambda} \frac{\cosh(kd)}{\sinh^3(kd)} (2 + \cosh(2kd)) \cos(2\theta) \tag{20}$$

$$\theta = (kx - \omega t) \tag{21}$$

A velocidade resultante é calculada com as duas componentes da velocidade (horizontal e vertical):

$$v(x, z, t) = \sqrt{u(x, z, t)^2 + w(x, z, t)^2} \tag{22}$$

Sempre que um ponto tenha uma pressão inferior a zero (pontos acima da superfície livre) é-lhe atribuída uma velocidade e pressão igual a zero.

A altura da crista da onda para a onda de Stokes de segunda ordem é dada por:

$$A_c = \frac{H}{2} \left(1 + \frac{\pi H}{2\lambda} \right) \tag{23}$$

Devido à entrada de água no dispositivo e saída pelas laterais do mesmo, é de esperar uma redução da altura da crista da onda em cada novo instante de tempo (ver Figura 3.7). O volume acima do nível médio pode ser calculado através da fórmula da elevação da superfície livre da onda de Stokes de segunda ordem. A fórmula da elevação da superfície livre, η , tem duas componentes com diferentes contribuições para a altura da onda em cada ponto da

malha, a primeira é a componente linear (η_l) e a segunda é a componente de segunda ordem (η_s):

$$\eta = \eta_l + \eta_s \quad (24)$$

$$\eta_l = \frac{H}{2} \cos \theta \quad (25)$$

$$\eta_s = \beta \cos(2\theta) \quad (26)$$

$$\beta = \frac{\pi H^2 \cosh(kd)}{8\lambda \sinh^3(kd)} (2 + \cosh(2kd)) \quad (27)$$

Para obter o volume da crista acima da adução podemos começar por calcular a área entre o perfil da superfície livre e o nível médio do mar (através das equações 24, 25, 26 e 27) e depois multiplicá-la pela largura do dispositivo. O volume da crista vai sofrer alteração

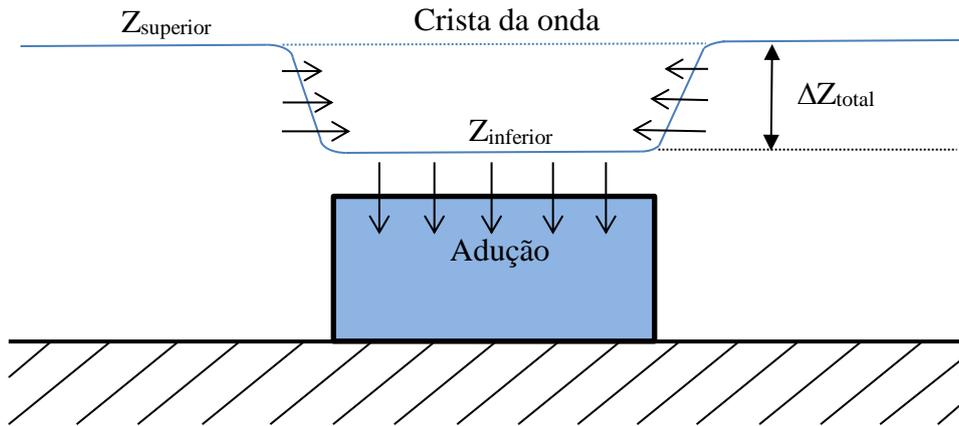


Figura 3.7: Representação simplificada da entrada de volume lateral (vista de frente do dispositivo)

devido à subtração do volume aduzido. O volume da cava não será corrigido dado que, como foi previamente referido, a restituição é feita diretamente para o meio recetor e de forma bilateral pelo que se considera não haver significativa interferência sobre a cava da onda do meio envolvente.

Para uma crista, as componentes linear e de segunda ordem cruzam o eixo das abcissas ($z=0$) em $\pm \frac{\pi}{2}$ e $\pm \frac{\pi}{4}$, respetivamente. No entanto, a intersecção da onda de Stokes de segunda ordem com este eixo varia com as características da onda. Para não adicionar demasiada complexidade ao modelo computacional, que se pretende que seja simplificado, é definido um valor entre as intersecções das componentes linear e de segunda ordem (igual a $\pm \frac{\pi}{3}$). Olhando

para a Figura 3.8 que representa os perfis da superfície livre da onda de Stokes de segunda ordem e respectivas componentes, é possível ver que existem áreas com contribuição positiva para o perfil da onda (as que estão acima do nível médio do mar) e áreas com contribuição negativa (as que estão abaixo). A soma de todas estas áreas resultará na área (aproximada) da crista.

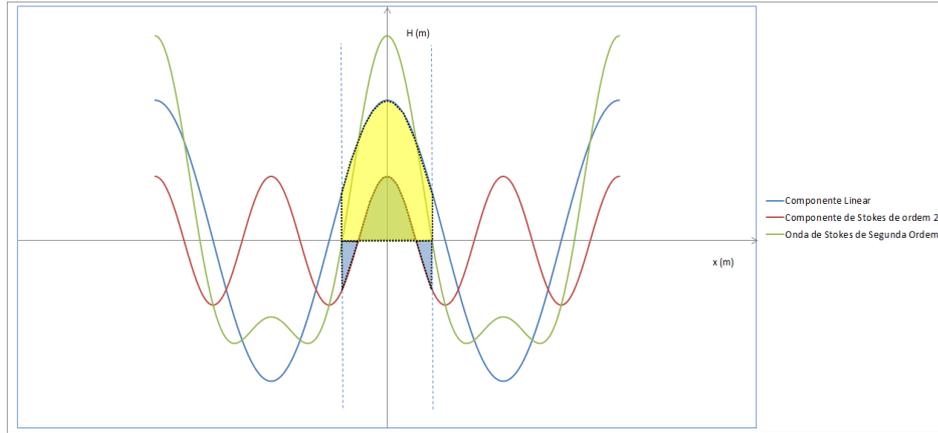


Figura 3.8: Representação das áreas entre o perfil da superfície livre e a altura média do mar das componentes da onda de Stokes de segunda ordem

A derivada de θ em ordem a x (ver equação 21) é:

$$\frac{d\theta}{dx} = k = \theta' \quad (28)$$

A área da componente linear é dada por:

$$\int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} \eta_l d\theta = \int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} \frac{H}{2} \cos \theta d\theta = \frac{H}{2\theta'} \int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} \theta' \cos \theta d\theta = \frac{H\lambda}{2\pi} \sin \frac{\pi}{3} \quad (29)$$

A área da componente de Stokes é dada pela equação 30 (contribuição positiva) e pela equação 31 (contribuição negativa que já inclui as duas áreas abaixo do nível médio do mar, veja-se a Figura 3.8):

$$\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}} \eta_s d\theta = \int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}} \beta \cos(2\theta) d\theta = \frac{\beta}{2\theta'} \int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}} 2\theta' \cos(2\theta) d\theta = \frac{\beta\lambda}{2\pi} \sin \frac{\pi}{4} \quad (30)$$

$$2 \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{4}} \eta_s d\theta = 2 \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{4}} \beta \cos(2\theta) d\theta = \frac{\beta}{\theta'} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{4}} 2\theta' \cos(2\theta) d\theta = \frac{\beta\lambda}{2\pi} \left(\sin \frac{\pi}{4} - \sin \frac{\pi}{3} \right) \quad (31)$$

Logo, o volume da crista é a soma das duas componentes multiplicada pela largura do dispositivo.

O volume aduzido em cada instante de cálculo é o caudal no circuito hidráulico multiplicado pelo passo de tempo. O novo volume da crista acima da adução será obtido por subtração do volume calculado anteriormente. Este volume corrigido é usado para calcular a altura da onda corrigida. Para o efeito, coloca-se em evidência a altura da onda e resolve-se a equação de segundo grau completa usando a fórmula resolvente. Com esta altura de onda corrigida é possível calcular a superfície livre corrigida.

A este volume interessa ainda adicionar o volume compensatório lateral que se supõe fluir para cima do dispositivo sempre que haja uma diferença (ΔH) positiva entre a superfície livre e a superfície livre corrigida (ver Figura 3.7). O cálculo do volume lateral compensatório que tende a escoar-se para a depressão criada pelo abatimento da crista é efetuado de forma simplificada.

Começa-se por considerar que a velocidade lateral, V , será proporcional ao desnível pontual que gera o escoamento, $\Delta Z = (Z_{\text{sup}} - Z)$, (veja-se a Figura 3.7), o que por aplicação do teorema de Bernoulli e desprezando perdas de carga conduz à conhecida fórmula de Torricelli (Quintela, 2000):

$$V = \sqrt{2 g \Delta Z} \quad (32)$$

Assemelhando as superfícies livres superior e inferior a planos horizontais, poderemos determinar o caudal, Q_L , de cada um dos dois escoamentos laterais compensatórios para o nó de adução (o passo de discretização longitudinal é Δx):

$$Q_L = \Delta x \int_{Z_{\text{inf}}}^{Z_{\text{sup}}} \sqrt{2 g (Z_{\text{sup}} - Z)} dz \quad (33)$$

A integração da equação anterior conduz a,

$$Q_L = \frac{2}{3} \Delta x \sqrt{2 g \Delta Z_{\text{total}}^{3/2}}, \text{ onde } \Delta Z_{\text{total}} = (Z_{\text{sup}} - Z_{\text{inf}}) \quad (34)$$

A expressão anterior é análoga à que se pode obter suprimindo o bordo superior da equação do descarregador em orifício retangular com dois bordos horizontais (Quintela, 2000) e considerando um coeficiente de vazão unitário.

O caudal compensatório total será dado por $Q = 2Q_L$.

Se ao volume corrigido se adicionar o volume compensatório total obtemos o volume final. Da mesma forma que obtivemos a altura corrigida podemos agora obter a nova altura de onda que será usada no passo de tempo seguinte.

3.3.6 Perdas de carga, caudais, energia e potência

No ficheiro de dados é escolhido o número de nós de adução e de restituição ($N_{\text{máx. adu./res.}}$) que abrem simultaneamente. Para saber que nós irão abrir em cada instante de tempo é necessário saber as maiores e menores pressões dos nós de adução e de restituição, respetivamente, calculadas anteriormente. Os nós imediatamente abaixo da crista da onda terão uma pressão superior à dos restantes nós situados na mesma cota e, por isso irão abrir para permitir a adução de volume para o dispositivo. Este volume aduzido, após passar pela turbina, irá sair nos nós de restituição. Estes nós estão imediatamente abaixo da cava da onda, onde as pressões são menores que nos pontos adjacentes.

Depois de identificados os nós de adução e restituição que abrem simultaneamente, é criada uma variável indexada binária que tem o valor nulo para os nós que não abrirem e é igual à unidade se abrirem. Esta variável irá ser usada em cálculos que apenas necessitem dos nós em funcionamento e é identificada como $Nó_{\text{func.adu}}$ e $Nó_{\text{func.res}}$ para a adução e restituição, respetivamente.

3.3.6.1 Carga hidráulica nos nós de adução e restituição

A carga hidráulica, E , é calculada segundo o teorema de Bernoulli (Quintela, 2000):

$$E = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \quad (35)$$

Como a pressão que obtivemos em 3.3.5 já vem dividida pelo peso volúmico, γ , as unidades são mca e podemos colocar essa pressão na fórmula. Como Z_j é negativo abaixo do nível médio do mar, é necessário adicionar a profundidade do meio. A velocidade, obtida usando a onda de Stokes de ordem 2, é afetada pelas diretrizes que se considera serem capazes de permitir que a velocidade de entrada seja igual à velocidade do campo de velocidades orbital (v_{orbital}) calculado para o respetivo nó (ver equação 22), logo a equação anterior vem:

$$E = (Z_j + d) + p + \frac{v^2}{2g}, \text{ com } v = \alpha v_{\text{orbital}} \quad (36)$$

Esta fórmula é usada para os nós de adução e restituição, a carga hidráulica será nula para os restantes nós. α corresponde ao efeito de concentração das diretrizes na adução e restituição, α_{adu} e α_{res} , respetivamente.

3.3.6.2 Caudal no circuito hidráulico, velocidades nos nós e perdas de carga localizada

O cálculo do caudal no circuito hidráulico é diferente para os dois métodos de simulação: no Método 1 todo o caudal é função da velocidade orbital do meio enquanto que no Método 2 o grupo turbogerador condiciona o caudal e quedas mínima e máxima turbinadas como já foi explicado anteriormente.

Para o Método 1, o escoamento orbital nos nós de adução e restituição em funcionamento é encaminhado pelas diretrizes. É feita a média das velocidades nesses nós. Os caudais para a adução, Q_{adu} , e restituição Q_{res} , dependem das áreas e velocidades de adução (A_{adu} e v_{adu}) e restituição (A_{res} e v_{res}), respetivamente, assim como do número de nós em funcionamento:

$$Q = vAN\alpha_{func} \quad (37)$$

O caudal no circuito hidráulico ($Q_{hid.}$) para o Método 1 será a média entre a adução e a restituição:

$$Q_{hid.} = \frac{Q_{adu.} + Q_{res.}}{2} \quad (38)$$

As perdas de carga localizada nos nós em funcionamento dependem da velocidade de entrada ou saída e do coeficiente de perda de carga localizada, $k_{adu/res}$.

$$H_{loc.adu/res} = k_{adu/res} \frac{v^2}{2g} \quad (39)$$

O cálculo do caudal no circuito hidráulico no Método 2 é baseado na curva característica do grupo turbogerador fornecida pelo utilizador já anteriormente apresentada, a qual depende da queda útil sobre a turbina:

$$Q_{hid.} = Q_{hid.}(H_{\acute{u}til}) \quad (40)$$

Falta saber o valor da queda útil ($H_{\acute{u}til}$) em cada passo de tempo porque esta depende das perdas de carga contínuas e das perdas de carga localizada nos nós. Como estes valores dependem do caudal no circuito hidráulico é necessário procurar a intersecção da curva da instalação com a curva característica da turbina para obter a queda útil.

3.3.6.3 Perdas de carga unitária e velocidades no circuito hidráulico

As perdas de carga unitária, J , são obtidas com recurso à fórmula de Colebrook-White (Quintela, 2000) usando o método iterativo simples:

$$J_{n+1} = \frac{v_{hid.}^2}{8gD_{hid.adu/res}} \left(\log \left[\frac{k_{hid.adu/res}}{3,7D_{hid.adu/res}} + \frac{2,51v}{D_{hid.}\sqrt{2gD_{hid.adu/res}J_n}} \right] \right)^{-2} \quad (41)$$

Sendo que, a fórmula para o cálculo do diâmetro hidráulico apresentada de seguida depende dos valores introduzidos no ficheiro de dados.

$$D_{hid.adu/res} = 4 \times \frac{A_{mol.adu/res}}{P_{mol.adu/res}} \quad (42)$$

A velocidade usada na equação anterior é a velocidade no circuito hidráulico ($v_{hid.}$) obtida dividindo o caudal no circuito hidráulico obtido em 3.3.6.2 pela área molhada definida no ficheiro de dados.

A perda de carga contínua total do circuito hidráulico, $H_{hid.}$, será a perda de carga unitária multiplicada pelo comprimento total do circuito hidráulico que é definido como sendo a distância geométrica (média, no caso de existirem vários nós que entrem em funcionamento) entre a adução e a turbina e a turbina e a restituição ($L_{hid.adu/res}$, respetivamente):

$$L_{hid.adu/res} = \sqrt{(X_{nó} - X_{turbina})^2 + (Z_{nó} - Z_{turbina})^2} \quad (43)$$

Este comprimento variará portanto de instante para instante, em função dos nós que abrem e fecham.

3.3.6.4 Queda útil, energia e potência turbinadas

Os dados relativos ao grupo turbogerador são: rendimento médio e parâmetros da sua curva característica $H_{útil}=H_{útil}(Q_{hid.})$. Com estes dados é possível calcular a energia elétrica que depende da queda útil, caudal turbinado e rendimento médio do grupo.

A potência turbinada em cada instante de tempo pode ser obtida usando o caudal no circuito hidráulico calculado anteriormente:

$$P_{turb.} = Q_{hid.}\eta_{turbina}\gamma H_{útil} \quad (44)$$

Sendo que, a queda útil ($H_{útil}$) é dada por:

$$H_{\text{útil}} = (E_{\text{adu.}} - E_{\text{res.}}) - (H_{\text{loc. adu.}} + H_{\text{loc. res.}} + H_{\text{hid. adu.}} + H_{\text{hid. res.}}) \quad (45)$$

No caso de se adotar o Método 2, a nova queda útil terá de estar no intervalo de quedas da turbina ($H_{\text{mín.}}$ e $H_{\text{máx.}}$ definidas no ficheiro de dados) para que se possa calcular a potência da turbina. Se não estiver, a potência turbinada e o caudal no circuito hidráulico serão nulos porque a turbina não consegue produzir energia com quedas fora do intervalo definido no ficheiro de dados.

O cálculo da energia turbinada ($E_{\text{turb.}}$) é obtido da seguinte forma:

$$E_{\text{turb.}} = \frac{P_{\text{turb.}t} + P_{\text{turb.}t+1}}{2} \Delta t \quad (46)$$

No instante inicial ($t=0$) a $E_{\text{turb.}}$ é nula. No ficheiro de resultados é expressa $E_{\text{turb.}}$ acumulada ao longo do tempo (energia turbinada num instante somada à energia turbinada até esse instante).

A potência média turbinada ($P_{\text{méd. turb.}}$) é dada por:

$$P_{\text{méd. turb.}} = \frac{E_{\text{turb.}}}{t} \quad (47)$$

3.3.6.5 Energia e potência da onda

Após calculada a potência turbinada é necessário compará-la com a potência da onda para assim obter a eficiência do dispositivo. Em (DNV, 2010) pode encontrar-se a definição da potência da onda (P_{onda}) a qual corresponde à energia (E_{onda}) multiplicada pela celeridade de grupo (c_g):

$$P_{\text{onda}} = E_{\text{onda}} c_g \quad (48)$$

$$E_{\text{onda}} = \frac{1}{8} \gamma \lambda H_i^2 B_{\text{disp.}} \quad (49)$$

$$c_g = \frac{c}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \quad (50)$$

Logo,

$$P_{\text{onda}} = \frac{1}{16} \gamma \lambda H_i^2 \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) B_{\text{disp.}} \quad (51)$$

3.3.7 Enquadramento do intervalo de validade das teorias de propagação de ondas de gravidade

Visto que o programa está preparado para simular apenas a teoria da onda de Stokes de segunda ordem, é necessário enquadrar as ondas simuladas face ao intervalo de validade dessa teoria. Para isso foi criada uma subrotina chamada “VALIDADE” que, com base nos valores da altura, período e profundidade nos indica o domínio de validade da teoria de onda que devemos utilizar. A teoria adequada é mostrada ao utilizador mas o programa continua a correr com a onda de Stokes de segunda ordem mesmo que esta não seja a teoria mais adequada. Desta forma o utilizador fica avisado para a possibilidade de existir um desvio nos resultados devido à utilização da teoria indevida. De seguida serão explicados os passos para obter um diagrama aproximado ao apresentado na Figura 2.3 com equações aproximadas para todas as curvas do mesmo e uma metodologia para obter o intervalo de validade de cada onda.

3.3.7.1 Obtenção de um diagrama de validade aproximado

Para obter as curvas é necessário digitalizar pontos do diagrama apresentado na Figura 2.3 (é de notar que este diagrama tem uma escala logarítmica) para assim criar curvas de tendência que se aproximem ao diagrama original. Algumas das curvas são na verdade retas, o que torna o processo mais simples (visto só ser necessário obter os pontos inicial e final da reta). O primeiro passo será dividir cada curva (curvas de Airy, de Stokes de segunda ordem, Cnoidal e o limite de rebentação) em três parcelas menores segundo intervalos de x_l (entre x_{i1} e x_{f1} , ver Tabela 3.1). Após a obtenção dos pontos (ver Anexo B) fazem-se curvas de tendência para cada parcela e obtém-se um diagrama aproximado (Figura 3.9), as equações das curvas e os respetivos coeficientes de correlação estão expressos na Tabela 3.1. Este diagrama parece estar similar ao da Figura 2.3 e irá ser usado para determinar o domínio de validade das teorias de ondas que irão ser referidas.

Tabela 3.1: Equações, coeficientes de correlação das curvas e intervalo de x_1

Curva	Equação	R ²	x_{i1}	x_{f1}
Airy	$y = 0,0094x^{0,7564}$	1	0,0013	0,013
	$y = 2,7666x^3 - 0,4967x^2 + 0,0303x + 4E-5$	0,994	0,013	0,075
	$y = 0,0007$	1	0,075	1
Stokes 2ª ordem	$y = 0,1297x^{0,851}$	1	0,007	0,025
	$y = 35,395x^3 - 7,0523x^2 + 0,4791x - 0,0025$	0,994	0,025	0,075
	$y = 0,0087$	1	0,075	1
Cnoidal	$y = 39,707x^{1,999}$	1	0,0005	0,007
	$y = 13,733x^{1,7851}$	1	0,007	0,017
	$y = 0,0177\ln(x) + 0,0818$	0,998	0,017	0,031
Rebentação	$y = 0,6274 x^{0,9608}$	1	0,0001	0,02
	$y = 96,878x^3 - 19,498x^2 + 1,322x - 0,0049$	0,998	0,02	0,075
	$y = 0,0255$	1	0,075	1

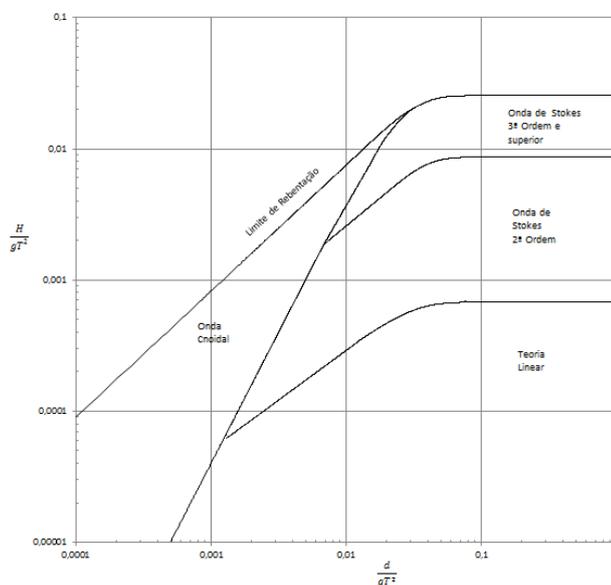


Figura 3.9: Domínio de validade considerado para as principais teorias de propagação de ondas de gravidade

3.3.7.2 Obtenção do intervalo de validade de uma onda

Através da Figura 3.9 é possível distinguir os intervalos de validade das diferentes teorias, no entanto, a rotina computacional ainda não o pode fazer. Para isso são definidos intervalos de x , representados na Tabela 3.2, que separam e intersectam as diferentes curvas da Tabela 3.1.

Usando estes intervalos e as equações das curvas já é possível saber em que domínio de validade se encontra a onda como será explicado de seguida.

Tabela 3.2: Intervalos de x usados para determinar o intervalo de validade

	x_{i2}	x_{f2}
Intervalo 1	0,0001	0,0005
Intervalo 2	0,0005	0,0013
Intervalo 3	0,0013	0,0070
Intervalo 4	0,0070	0,0130
Intervalo 5	0,0130	0,0170
Intervalo 6	0,0170	0,0200
Intervalo 7	0,2000	0,0250
Intervalo 8	0,0250	0,0310
Intervalo 9	0,0310	0,0750
Intervalo 10	0,0750	1,0000

Os dados necessários para a determinação do intervalo de validade são a profundidade (d), altura da onda (H_i) e o período de onda (T). Usando estes valores são calculados $x_{onda} = \frac{d}{gT^2}$ e $y_{onda} = \frac{H_i}{gT^2}$ para obter um ponto no diagrama. Com o valor de x_{onda} sabe-se em que intervalo da Tabela 3.2 se encontra a onda mas ainda falta saber entre quais curvas está o ponto, para isso usa-se x_{onda} para calcular o valor de y das equações da Tabela 3.1. Comparando o valor de y_{onda} com os valores de y calculados usando x_{onda} pode-se encontrar o intervalo onde se encontra o ponto (x_{onda}, y_{onda}) e saber qual a teoria que melhor representa essa onda.

4 MODELO COMPUTACIONAL

4.1 Breve descrição

O modelo computacional é composto por um programa principal, que será apresentado ao longo deste capítulo, e duas subrotinas (DADOS e VALIDADE). O modelo foi escrito na linguagem Fortran (o modelo computacional tem mais de 800 linhas de código e não será apresentado nos anexos devido à sua extensão) e pode ser corrido usando o ficheiro executável “ENERGIA_ONDAS.exe” (que tem um tamanho de 87 kB). Este ficheiro tem de ser acompanhado pelo ficheiro de dados “DADOS_GERAIS.dat” apresentado no Anexo A. Como foi referido no modelo conceptual, o programa principal irá simular uma onda de Stokes de segunda ordem, mesmo que a onda correspondente esteja um pouco fora do intervalo de validade desta teoria. O presente modelo computacional pode ser considerado um “upgrade” face ao modelo computacional anteriormente desenvolvido pelo Eng. João Abrantes. De facto, para além da modificação relativa ao tipo de onda de gravidade simulada, foram implementados igualmente inúmeros melhoramentos de que se destacam a determinação do domínio de validade de cada onda, a simulação automática de diversos valores de altura e período de onda (ao invés de apenas calcular um valor de altura e período), avisos e informação disponibilizados no ecrã do utilizador, cálculo das cotas de adução e restituição (devido à alteração do modelo que, anteriormente considerava a adução e restituição na mesma cota, correspondente ao fundo oceânico), a nova localização da turbina é agora no fim do REEFS e criação de um ficheiro de output com os campos da carga hidráulica em cada instante de tempo. Também foram alteradas algumas linhas de código para corresponder ao novo modelo e teoria de propagação da onda de gravidade, nomeadamente no bloco correspondente ao cálculo da nova altura de onda. O modelo anterior apenas calculava um comprimento de onda, o novo modelo calcula toda a onda que se encontra por cima do dispositivo, seja o comprimento desta maior ou menor que o comprimento de onda λ . Foi também desenvolvida a importante funcionalidade de expedita modificação das dimensões do dispositivo.

4.2 Ficheiros de dados e resultados, valores iniciais e intervalo de validade

O ficheiro de dados apresentado no Anexo A contém os dados necessários ao funcionamento da rotina computacional e pode ser alterado pelo utilizador antes de correr o ficheiro executável. Os dados têm de ser escritos nos campos do ficheiro de dados previamente reservados para o efeito, para que o programa principal os leia corretamente. Todas as linhas do ficheiro serão percorridas pelo programa principal mas apenas serão lidos valores nas linhas que contêm os dados pertinentes. Os valores presentes no anexo são meramente

ilustrativos. Os dados necessários estão relacionados com as características do dispositivo, características da onda, do grupo turbogrador, dos circuitos hidráulicos e nós de adução e restituição.

De seguida, são apresentadas algumas notas relativas ao ficheiro de dados:

- As características da turbina são particulares para cada instalação e têm de ser revistos caso se pretenda alterar a turbina instalada;
- Alterar a forma do dispositivo modifica as suas características assim como as áreas e perímetros molhados;
- Alterar a largura do dispositivo altera a largura da adução (são iguais no caso de estudo);
- Alterar a altura do dispositivo altera a altura da restituição;
- A alteração da largura do dispositivo deve ser acompanhada de uma redefinição das características do grupo turbogrador em termos da sua potência.

É dada a informação ao utilizador relativa à inserção de dados que alterem as características do dispositivo no ficheiro “DADOS_GERAIS.dat”. Estas alterações (nomeadamente os relativos às áreas e perímetros molhados e às larguras de adução) podem influenciar outros dados que dependam destas características. Como já foi explicado na secção dedicada ao modelo conceptual, existem dois métodos para calcular o caudal no circuito hidráulico. O programa só simula um dos Métodos (1 ou 2) de cada vez, por isso, o utilizador tem de escolher que método pretende simular. Através da subrotina “DADOS” é aberto o ficheiro “DADOS_GERAIS.dat”. Todas as linhas são lidas mas apenas algumas têm dados que vão ser atribuídos a variáveis pela ordem indicada no ficheiro de dados.

De seguida, são abertos os ficheiros onde serão escritos os valores obtidos no programa para cada passo de tempo: campos de pressão (Ficheiro 1); campos de velocidade (Ficheiro 2); campo com os valores da carga hidráulica (Ficheiro 3); nós em funcionamento e respetivo valor da pressão (Ficheiro 4); nós em funcionamento e respetivo valor da velocidade (Ficheiro 5), valores das potências turbinadas, energia acumulada e rendimento do conversor de energia das ondas (Ficheiro 6) e, caso sejam feitas várias simulações de uma só vez, é aberto o ficheiro 7 que apresenta os valores da potência capturada após a passagem de uma onda completa para cada onda simulada. A terminação no nome dos ficheiros depende do método escolhido pelo utilizador (“ficheiro”_1 ou “ficheiro”_2 para o Método 1 ou 2, respetivamente). Se os ficheiros já existirem, serão reescritos.

No cálculo de algumas variáveis em processos iterativos ou incrementais são necessários valores iniciais: tempo ($t=0$), este valor será incrementado em cada instante de cálculo; energia total produzida no grupo turbogerador (inicialmente $E_{\text{total turb.}}=0$) e queda útil ($H_{\text{útil}}=0$).

No ficheiro de dados é definido o número de nós de adução e restituição. Estes estarão a uma altura correspondente às cotas $Z_{\text{adu./res.}}$ caso sejam os nós de adução ou de restituição, respetivamente. Estão agora definidos na malha os nós de adução e de restituição ($N_{\text{adu./res.}}$).

A metodologia apresentada em 3.3.7 é recriada numa subrotina chamada “VALIDADE” que é incluída no modelo computacional e oferece ao utilizador informação relativa ao domínio de validade da teoria de onda em cada simulação. O objetivo desta metodologia é ter um conjunto de curvas semelhantes às do diagrama original, de modo a poder implementar um processo automático, embora necessariamente aproximado, de verificação do domínio de validade da teoria de onda adotada.

4.3 Início do ciclo de cálculo, escrita dos resultados e novo passo de tempo

O modelo irá simular cada instante de tempo separadamente. O ciclo recomeça neste tópico sempre que se dá um incremento de tempo (novo passo de tempo). Para o cálculo dos campos de velocidades orbitais, pressões e superfície livre é usada a teoria de Stokes de ordem 2.

A escrita dos resultados será feita em cada passo de tempo nos ficheiros abertos anteriormente (antes de recomeçar o novo instante de tempo).

Começa por se escrever o instante de tempo e os valores de X_i da esquerda para a direita (crescente) nos ficheiros 1, 2, 3, 4 e 5, depois escreve-se nos mesmo ficheiros os valores de cada cota começando no último ponto Z_j e decrescendo (para que a malha tenha a onda em cima do dispositivo e não o contrário). Nestes ficheiros são escritos os respetivos valores das variáveis.

No ficheiro 6 são impressos alguns dos valores do ficheiro de dados para que o utilizador possa comparar simulações sabendo que características usou em cada uma. Estes valores só serão escritos no primeiro passo de tempo ($t=0$). Para além destes ainda são escritas as variáveis descritas em 4.2.

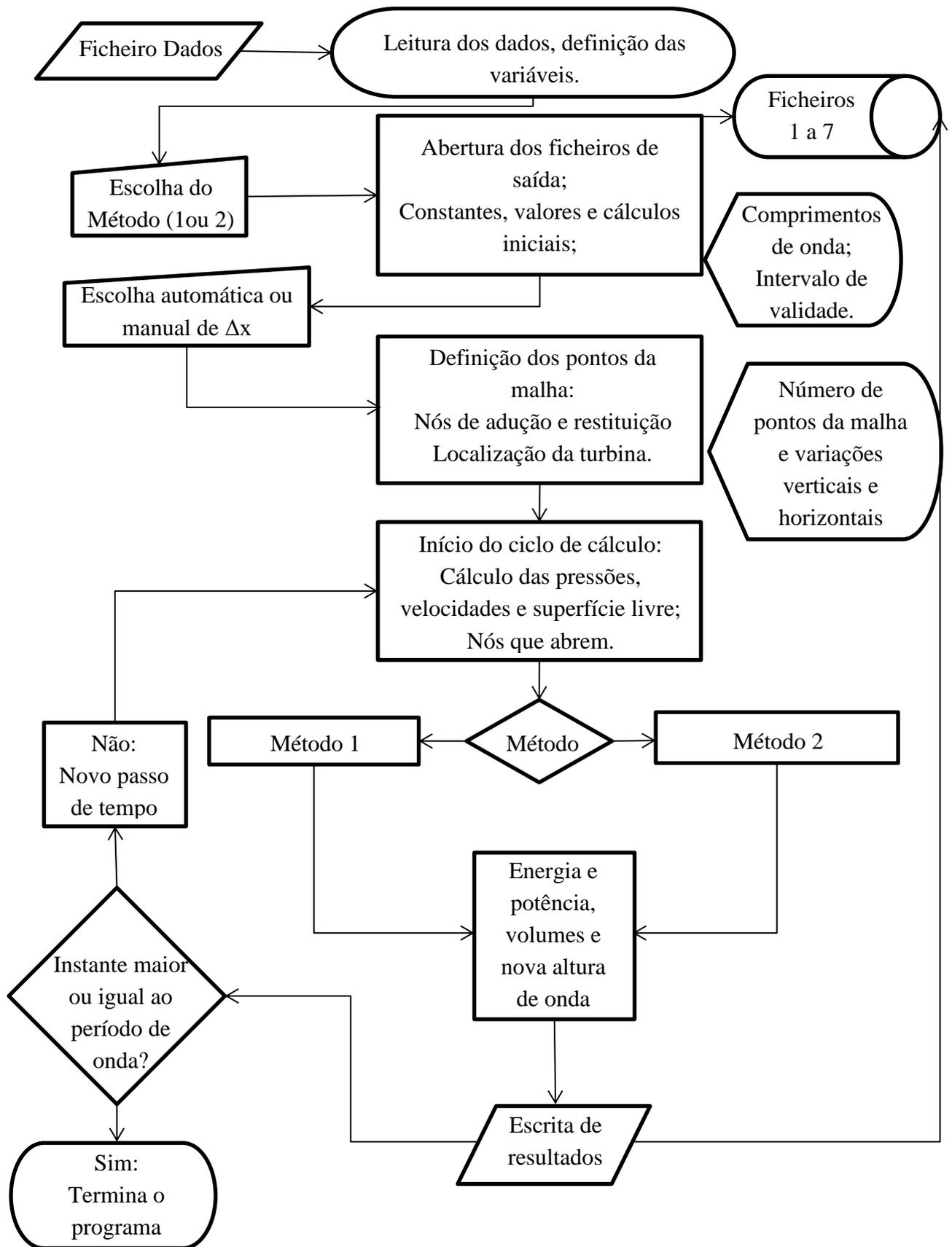
No ficheiro 7 são impressos valores necessários à construção da “power matrix”, nomeadamente, a energia produtível durante um período de onda.

O próximo passo de tempo será t (instante atual) $+\Delta t$ (incremento de tempo). O ciclo recomeça no tópico 4.3, como já tinha sido referido, com a nova altura de onda (H), potências

e energias acumuladas. O programa pára quando o instante for superior ao tempo final ($T_{\text{máx.}}$) que corresponde ao período da onda (T).

4.4 Fluxograma

Na página seguinte está representado um fluxograma representativo do modelo computacional.



5 APLICAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

5.1 Descrição da metodologia

Para estimar a produtibilidade do dispositivo é necessário construir uma matriz de potência “power matrix” que possa ser comparada com outros dispositivos (Pitt, 2009). Uma “power matrix” apresenta as potências capturadas por um dispositivo para diferentes estados de mar (altura e período de onda variáveis). Serão apresentados no tópico seguinte alguns dados gerais que têm de ser introduzidos no ficheiro de dados.

O programa descrito anteriormente está preparado para simular várias ondas com diferentes períodos e alturas. O utilizador terá de definir esses valores e deixar o programa correr. Como os dados fornecidos pelo programa são energias (em kWh) é necessário transformar os valores em potências para construir a “power matrix” (matriz de potências).

A “power matrix” irá exprimir as potências para diferentes períodos (passo de 1 s) e alturas de onda (passo de 0,5 m) características do meio onde será instalado o dispositivo. Após a determinação desta matriz é possível comparar com outros dispositivos que atuem em condições semelhantes. Nesta fase é importante sublinhar que o modelo simplificado aqui proposto apenas considera ondas regulares. Como tal não é possível determinar matrizes de potência de estados de agitação marítima as quais são usualmente expressas em termos de período de energia e altura significativa. São realizadas simulações considerando a possibilidade de abertura simultânea de 1, 2, 3 e 4 nós de adução e restituição, para poder comparar com a matriz experimental. Assume-se que abriam sempre o mesmo número de nós, embora não tenha sido possível registar exaustivamente em vídeo subaquático todos os ensaios.

As filmagens subaquáticas dos ensaios experimentais em modelo reduzido reportados em (Lopes de Almeida et al, 2016) permitiram determinar que são em número de 3 as válvulas do sistema composto rede-membrana que abrem em simultâneo conforme se mostra na Figura 5.1.

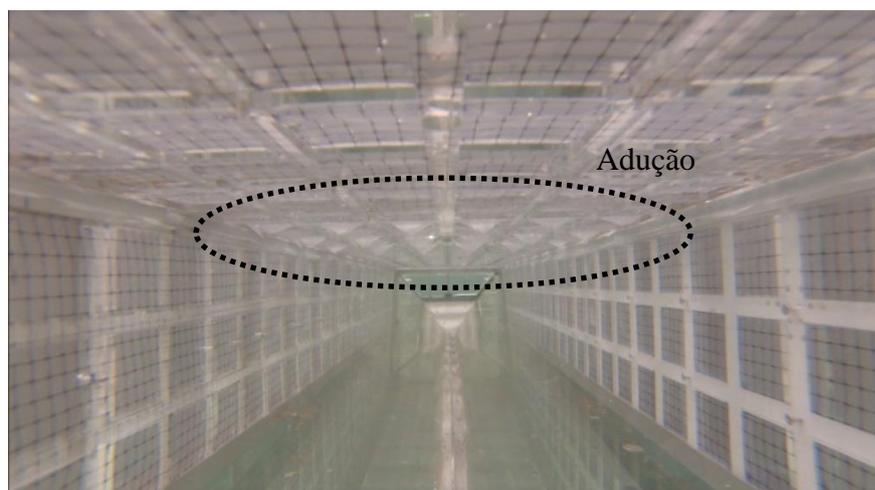


Figura 5.1: Imagem subaquática no interior do modelo à escala 1,5:100 mostrando a abertura de 3 nós em cada crista (Fotografia: J.P.P.G. Lopes de Almeida)

5.2 Simulações a efectuar

Para o estabelecimento das alturas e períodos das ondas a simular foram analisados valores na Figueira da Foz (Mollison e Pontes, 1992). Para a altura de onda os valores medidos mais frequentes estão no intervalo de 1 a 2 m e o período de onda no intervalo de 7 a 10 s, no entanto, para o mesmo, as maiores contribuições para a potência estão nos intervalos de 2 a 4 m e 11 a 13 s, para a altura e período de onda, respetivamente. Considerando estes valores e atendendo aos resultados experimentais disponibilizados em (Lopes de Almeida et al, 2016) escolhemos um intervalo de 0,75 a 5,25 m para a altura de onda e 6 a 12 s para o período. É de realçar que estes resultados experimentais permitirão indagar da verosimilhança do modelo computacional. É também de realçar que os resultados experimentais não foram obtidos com recurso a uma turbina. Pelo contrário, basearam-se na medição da potência hidráulica do escoamento gerado no interior do dispositivo. Como tal não fará sentido o recurso ao Método 2 de cálculo do caudal no circuito hidráulico.

O dispositivo tem um volume de $88 \times 20 \times 10 \text{ m}^3$ ($C_{\text{disp.}}$, $B_{\text{disp.}}$ e $H_{\text{disp.}}$, respetivamente) (Lopes de Almeida, 2017). Está instalado a uma profundidade (d) de 18,3 m.

Serão usados 100×75 pontos para formar a malha ($N_x \times N_z$, respetivamente) e uma discretização de tempo (Δt) igual a 0,1 s.

A área molhada de adução e de restituição correspondem a 100 m^2 . O perímetro de adução corresponde a 48,28 m e o de restituição é igual a 68,28 m. A rugosidade absoluta equivalente do circuito hidráulico é igual para a adução e restituição e tem o valor de 0,003 m correspondente a betão muito rugoso (Quintela, 2000)

O comprimento de adução é igual ao de restituição e corresponde a C_{disp}/N_x que é igual a 0,88 m. A largura de adução é igual a B_{disp} . e a de restituição é igual a H_{disp} . Considera-se que α dos nós é igual a 1, ou seja, a velocidade de entrada e saída é igual ao campo de velocidade nesses pontos. O coeficiente de perda de carga localizada é igual a 0,5 nos nós de adução e 1 nos de restituição, como é usual em entradas e saídas de condutas. Estes valores foram escolhidos no lado da segurança sendo possível que, devido à dimensão dos nós de entrada, estes valores sejam um pouco menores.

O Método 2 será adotado para demonstrar as potencialidades do programa, no entanto, este método não será comparado com os resultados experimentais pelas razões anteriormente referidas. A turbina instalada tem uma potência de 500 kW, rendimento de 80%, queda máxima de 5,25 m e queda mínima de 0,75 m. Estes valores não estão otimizados para aproveitar de forma eficiente a onda e são escolhidos tendo em consideração as alturas mínima e máxima das ondas. A potência instalada está de acordo com turbinas de baixa queda do mercado (VLH turbine@ 2013) mas não foi feita uma pesquisa para ver que turbinas seriam as mais apropriadas para este caso específico.

5.3 Diagrama com intervalo de validade das ondas simuladas

Na Figura 5.2 estão representadas as ondas que irão ser simuladas. Diferem umas das outras no período e altura de onda utilizados. Serão simulados períodos de 6 a 12 segundos e alturas de onda de 0,75 a 5,25 metros para formar a “power matrix”.

Da direita para a esquerda são os períodos de onda crescentes (6 a 12 s) e de baixo para cima é a altura de onda crescente (0,75 a 5,25 m). A maior parte dos pontos estão no intervalo de validade de Stokes de segunda ordem, alguns pontos estão no intervalo da onda de Stokes de ordem superior a dois mas próximos do limite entre a segunda e terceira ordem. Iremos considerar que a onda simulada está próxima da realidade nestes casos.

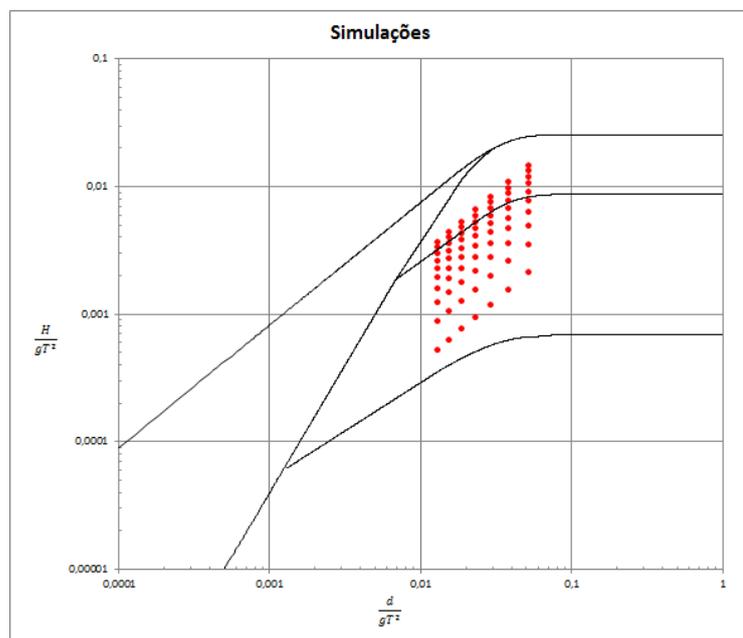


Figura 5.2: Representação das ondas simuladas e respetivo intervalo de validade

5.4 Obtenção da “power matrix” e comparação com os resultados experimentais preliminares

O Tabela 5.1 mostra a “power matrix” preliminar obtida experimentalmente (Lopes de Almeida et al, 2016). As células destacadas apresentaram sinais de rebentação no trabalho experimental.

Tabela 5.1: “Power matrix” (potência capturada em kW) obtida experimentalmente a uma profundidade correspondente a 18,3 m num protótipo à escala 1,5:100. Altura (H) em metros e período (T) em segundos (Lopes de Almeida et al, 2016)

H\T	6	7	8	9	10	11	12
5,25	388	728	926	1037	1145	1043	1033
4,75	336	624	802	949	1020	924	914
4,25	281	520	676	837	876	789	779
3,75	227	419	553	710	721	644	634
3,25	174	323	434	575	563	497	487
2,75	125	235	324	438	409	355	347
2,25	81	158	225	308	267	227	219
1,75	44	93	140	192	147	118	111
1,25	17	43	73	97	54	36	31
0,75	0	10	26	31	0	0	0

Os resultados das correspondentes simulações com o modelo computacional simplificado estão representados nas power matrix que estão no Anexo C assim como as relações entre os resultados simulados e os obtidos experimentalmente. Estas relações são uma forma de comparar as potências obtidas usando o modelo simplificado e os resultados experimentais.

Para melhor representar estas relações é apresentada a Figura 5.3 que contém todos os valores para cada simulação usando o Método 1. Na Figura 5.4 são apresentadas as relações obtidas usando o Método 2. Tal como tinha sido referido anteriormente, não faz sentido o recurso a este método para efeitos de comparação com os resultados experimentais em modelo reduzido. Para ambas as figuras também estão apresentadas as médias dos valores para mais facilmente serem comparados os diferentes casos. Por esse motivo, o exemplo apresentado é meramente ilustrativo não tendo sido exploradas outras possíveis situações de cálculo considerando diferentes potências instaladas bem como outros valores mínimos e máximos de caudais e quedas úteis turbináveis.

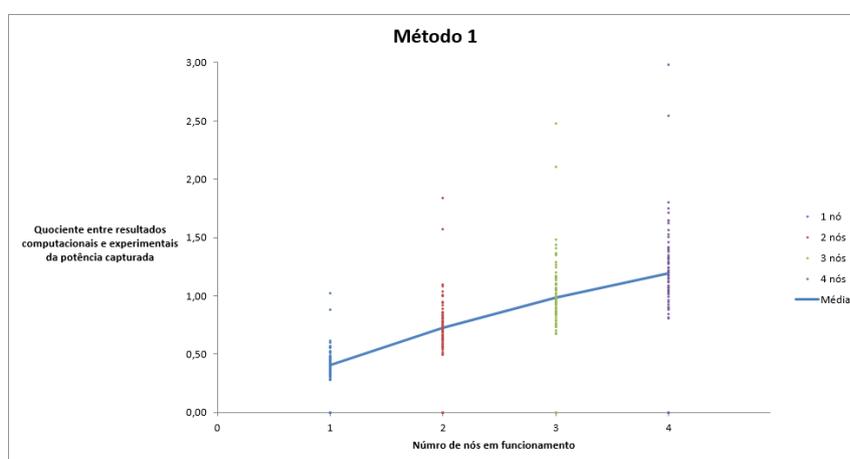


Figura 5.3: Médias e valores dos quocientes entre resultados computacionais e experimentais da potência caapturada para cada conjunto de nós em funcionamento usando o Método 1

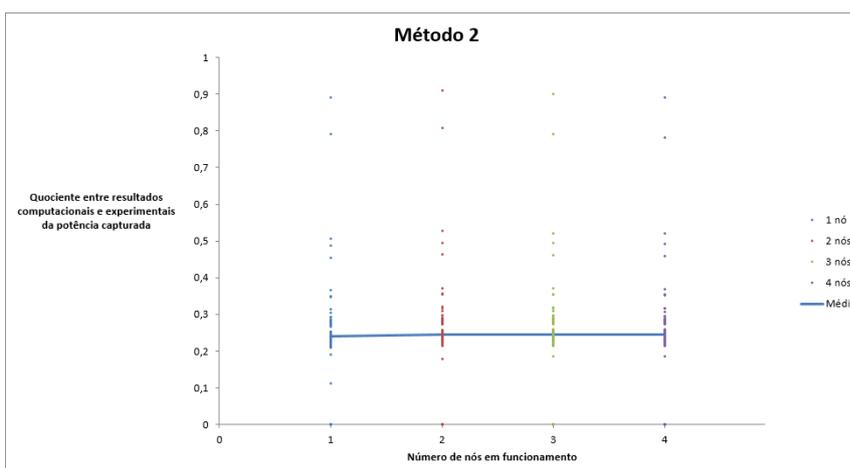


Figura 5.4: Médias e valores dos quocientes entre resultados computacionais e experimentais da potência caapturada para cada conjunto de nós em funcionamento usando o Método 2

Os valores das médias apresentadas nas figuras anteriores são apresentados na Tabela 5.2:

Tabela 5.2: Média das relações de cada conjunto de nós para diferentes métodos

Número de nós em funcionamento	Método 1	Método 2
1	0,40	0,24
2	0,73	0,25
3	0,99	0,25
4	1,20	0,24

Para comparar os resultados experimentais preliminares com os simulados também é importante saber quantos nós abrem durante os trabalhos experimentais, para isso recorreremos a imagens captadas durante a realização do trabalho experimental (Figura 5.1) (Lopes de Almeida et al, 2016).

5.5 Campos de velocidade, pressão e carga hidráulica

O programa fornece ainda os campos de pressão, velocidade e carga hidráulica em cada instante da onda simulada, como foi referido anteriormente. De seguida serão apresentados alguns destes campos para uma onda com período de 10 s e altura de 3,25 m (uma das ondas simuladas) no instante inicial e à profundidade de 18,3 m.

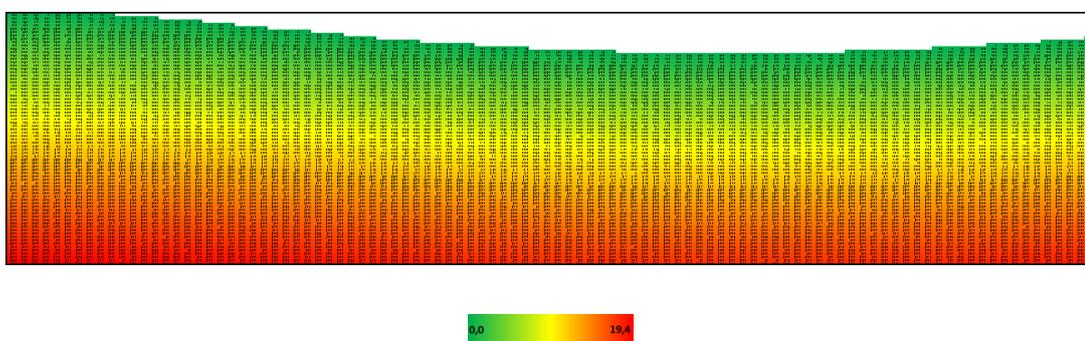


Figura 5.5: Campo de pressões de uma onda com $T=10$ s, $H=3,25$ m e $d=18,3$ m no instante t inicial

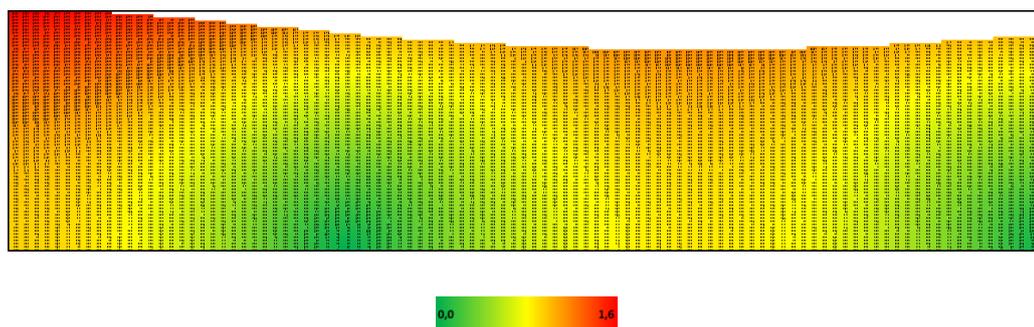


Figura 5.6: Campo de velocidades com $T=10$ s, $H=3,25$ m e $d=18,3$ m no instante t inicial

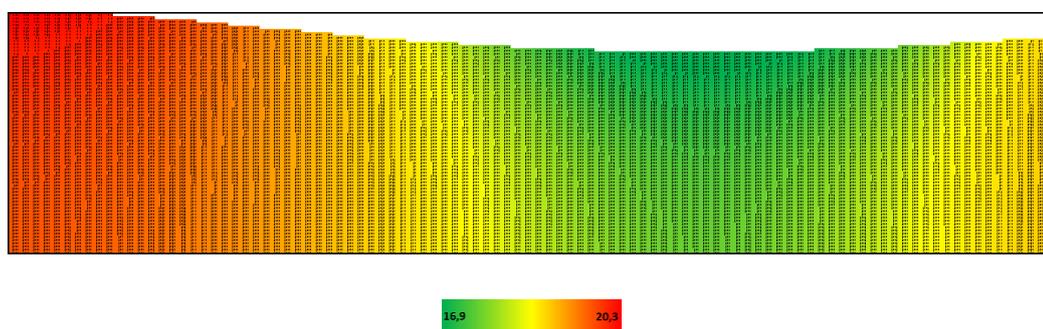


Figura 5.7: Campo com a carga hidráulica com $T=10$ s, $H=3,25$ m e $d=18,3$ m no instante t inicial

Também será interessante comparar o diferencial de pressões entre a crista e a cava da onda a diferentes cotas.

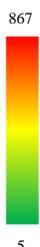
Tabela 5.3: Diferencial de pressões abaixo da cava e crista de uma onda com $T=10$ s, $H=3,25$ m e $d=18,3$ m no instante t inicial

Cota abaixo do nível médio do mar(m)	Pressão abaixo da crista da onda (mca)	Pressão abaixo da cava da onda (mca)	Diferencial de pressões
-1,61	3,21	0,16	3,05
-9,42	10,65	8,26	2,39
-18,03	19,13	16,99	2,14

Aproveitando as potencialidades do programa, variámos o comprimento e a largura do dispositivo para saber de que forma estes afetam a captura da energia das ondas. É necessário referir que apenas se faz variar uma das dimensões do dispositivo de cada vez, as outras permanecem constantes. Primeiro será apresentada a variação da largura do dispositivo e a

comparação com a largura original (20 m), apenas se consideraram larguras menores que a original (10 e 5 m, correspondentes a 50 e 25% da largura original, respetivamente). Em segundo lugar será apresentada a variação do comprimento do dispositivo e a comparação com o comprimento original (88 m), neste caso consideraram-se comprimentos inferiores (44 e 22 m, correspondentes a 50 e 25% do comprimento original, respetivamente) e um superior (176 m correspondente ao dobro do comprimento original). A matriz original corresponde à Tabela C.3: Matriz obtida usando o Método 1 e 3 nós.

Tabela 5.4: “Power matrix” obtida com uma largura do dispositivo igual a 10 m, 3 nós em funcionamento e uma profundidade de 18,3 m. Altura (H) em metros e período (T) em segundos



H\T	6	7	8	9	10	11	12
5,25	268	437	590	716	800	847	867
4,75	215	354	478	581	649	686	702
4,25	176	286	386	467	520	549	560
3,75	135	221	297	360	401	423	431
3,25	102	166	224	270	301	316	322
2,75	72	118	158	192	213	225	228
2,25	49	79	107	129	143	150	152
1,75	29	47	64	77	86	90	91
1,25	15	24	32	39	44	45	46
0,75	5	9	12	14	15	16	17

Tabela 5.5: “Power matrix” obtida com uma largura do dispositivo igual a 5 m, 3 nós em funcionamento e uma profundidade de 18,3 m. Altura (H) em metros e período (T) em segundos



H\T	6	7	8	9	10	11	12
5,25	181	291	383	460	512	541	554
4,75	145	235	310	372	415	439	448
4,25	118	189	249	298	332	350	357
3,75	90	145	192	230	256	270	275
3,25	68	109	144	172	191	201	205
2,75	47	77	101	122	135	143	145
2,25	32	51	68	82	90	95	97
1,75	19	30	41	49	54	57	58
1,25	10	15	21	25	27	29	29
0,75	4	6	7	9	10	10	10

Tabela 5.6: Dados relativos à variação da largura do dispositivo, potência média obtida e comparação com a largura original

Largura do dispositivo (m)	Alteração relativamente ao original (%)	Potência média (kW)	Relação com a Potência média original (%)	Rácio Relação/Alteração
20 (original)	-	428,2	-	-
10	50	256,2	60	1,20
5	25	164,7	38	1,54

Tabela 5.7: “Power matrix” obtida com um comprimento do dispositivo igual a 176 m, 3 nós em funcionamento e uma profundidade de 18,3 m. Altura (H) em metros e período (T) em segundos

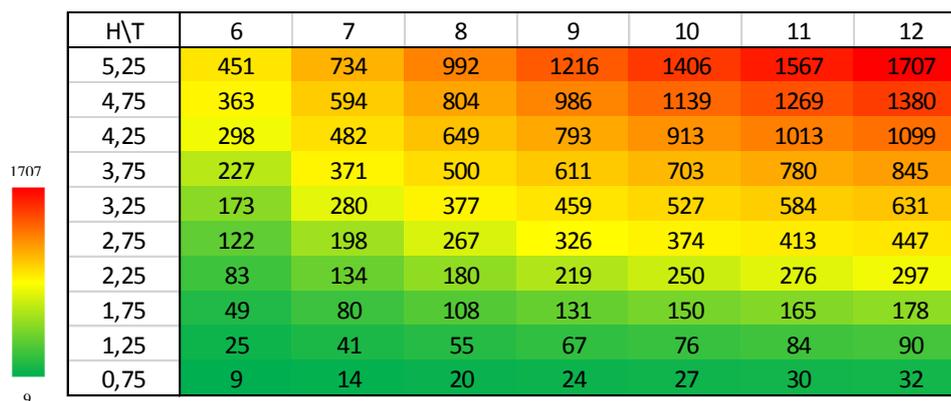


Tabela 5.8: “Power matrix” obtida com um comprimento do dispositivo igual a 44 m, 3 nós em funcionamento e uma profundidade de 18,3 m. Altura (H) em metros e período (T) em segundos

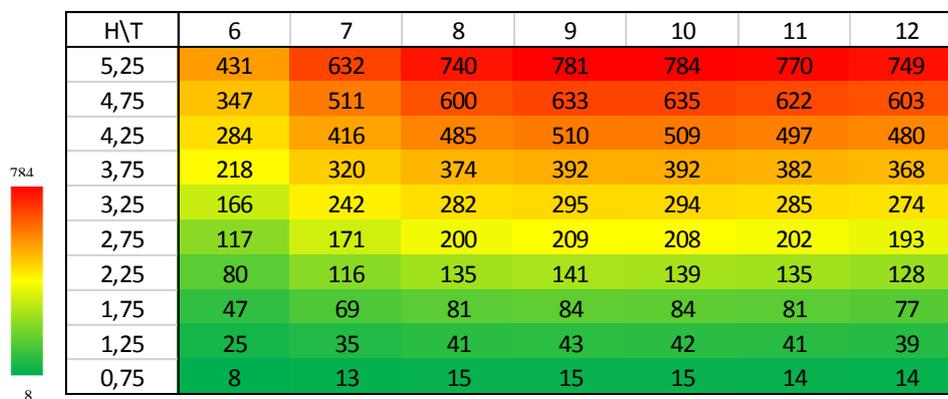


Tabela 5.9: “Power matrix” obtida com um comprimento do dispositivo igual a 22 m, 3 nós em funcionamento e uma profundidade de 18,3 m. Altura (H) em metros e período (T) em segundos



H\T	6	7	8	9	10	11	12
5,25	272	333	352	350	338	323	309
4,75	219	269	286	284	274	262	250
4,25	180	220	232	230	221	210	200
3,75	138	169	179	177	170	162	154
3,25	105	129	135	134	129	122	116
2,75	74	91	96	95	91	86	82
2,25	51	62	65	64	62	58	55
1,75	30	37	39	38	37	35	33
1,25	16	19	20	20	19	18	17
0,75	5	7	7	7	7	6	6

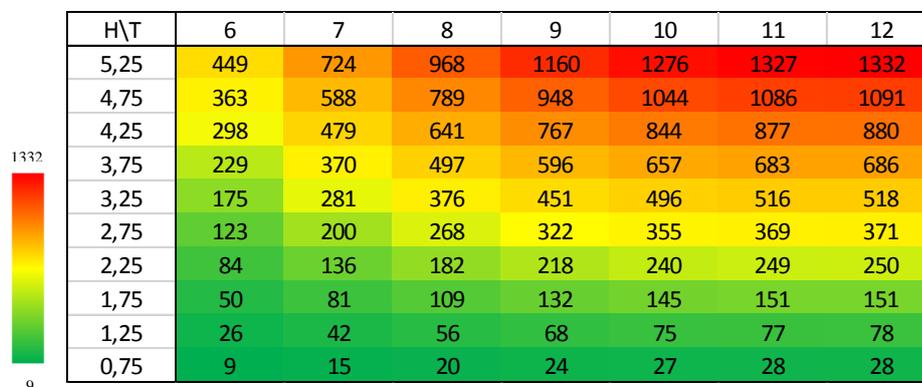
Tabela 5.10: Dados relativos à variação do comprimento do dispositivo, potência média obtida e comparação com o comprimento original

Comprimento do dispositivo (m)	Alteração relativamente ao original (%)	Potência média (kW)	Relação com a original (%)	Rácio Relação/Alteração
176	200	456,7	107	0,53
88 (original)	-	428,2	-	-
44	50	276,6	65	1,29
22	25	129,8	30	1,21

5.6 Comparar onda de Stokes de ordem 2 com Teoria Linear

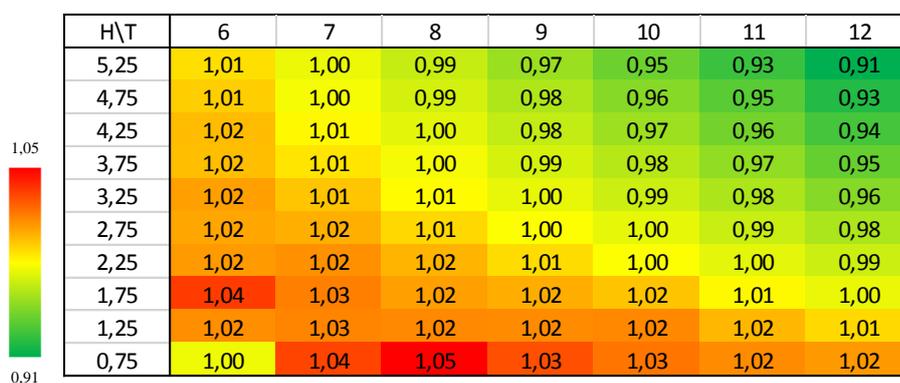
De seguida é comparada a “power matrix” obtida através de dois modelos simplificados diferentes, um que usa a onda de Stokes de segunda ordem e outro que usa a Teoria Linear. Inicialmente pretendíamos comparar com o modelo simplificado do Eng. João Abrantes, no entanto, devido ao facto de este ter um modelo conceptual diferente (o facto de não ser possível definir diferentes cotas para os nós de adução e restituição, por exemplo) foi necessário criar um programa com o modelo conceptual apresentado neste trabalho, mas com a Teoria Linear em vez da teoria de Stokes de ordem dois. A matriz obtida está apresentada na Tabela 5.11 e a relação desta com a apresentada na Tabela C.3, correspondente à teoria de Stoke de segunda ordem, está apresentada na Tabela 5.12. Ambas foram obtidas usando 3 nós em funcionamento e à profundidade de 18,3 m.

Tabela 5.11: “Power matrix” obtida usando a Teoria Linear com 3 nós em funcionamento e uma profundidade de 18,3 m. Altura (H) em metros e período (T) em segundos



H\T	6	7	8	9	10	11	12
5,25	449	724	968	1160	1276	1327	1332
4,75	363	588	789	948	1044	1086	1091
4,25	298	479	641	767	844	877	880
3,75	229	370	497	596	657	683	686
3,25	175	281	376	451	496	516	518
2,75	123	200	268	322	355	369	371
2,25	84	136	182	218	240	249	250
1,75	50	81	109	132	145	151	151
1,25	26	42	56	68	75	77	78
0,75	9	15	20	24	27	28	28

Tabela 5.12: “Relação entre as potências obtidas usando Teoria Linear e onda de Stokes de ordem 2 com 3 nós em funcionamento e uma profundidade de 18,3 m. Altura (H) em metros e período (T) em segundos



H\T	6	7	8	9	10	11	12
5,25	1,01	1,00	0,99	0,97	0,95	0,93	0,91
4,75	1,01	1,00	0,99	0,98	0,96	0,95	0,93
4,25	1,02	1,01	1,00	0,98	0,97	0,96	0,94
3,75	1,02	1,01	1,00	0,99	0,98	0,97	0,95
3,25	1,02	1,01	1,01	1,00	0,99	0,98	0,96
2,75	1,02	1,02	1,01	1,00	1,00	0,99	0,98
2,25	1,02	1,02	1,02	1,01	1,00	1,00	0,99
1,75	1,04	1,03	1,02	1,02	1,02	1,01	1,00
1,25	1,02	1,03	1,02	1,02	1,02	1,02	1,01
0,75	1,00	1,04	1,05	1,03	1,03	1,02	1,02

6 DISCUSSÃO, CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Comparar simulação de ondas usando a onda de Stokes de segunda ordem com outras teorias

A contribuição das componentes linear e de segunda ordem depende do domínio de validade de cada onda. De seguida são representados os perfis de quatro ondas representativas das diferentes teorias próximas da onda de Stokes de segunda ordem (linear, Stokes de terceira ordem e cnoidal) simuladas com recurso à teoria de Stokes de segunda ordem, desta forma será possível comparar com ondas simuladas com as respetivas teorias, representadas na Figura 2.2, e detectar possíveis diferenças. Estas ondas foram simuladas com o período igual a 10 s e profundidade igual a 18,3 metros, apenas a altura de onda variou sendo igual a 0,2, 1,5, 6 e 12 s, respetivamente para as Figuras 6.1 a 6.4. A altura e o comprimento das ondas não estão à escala 1:1 para que se possam identificar as componentes linear e de stokes mais facilmente. A superfície livre da onda é a soma das duas componentes.

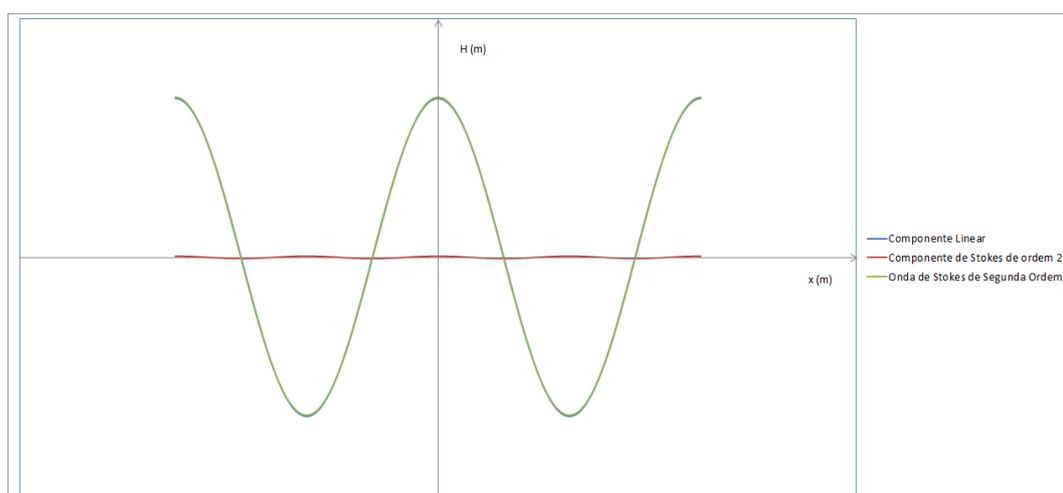


Figura 6.1: Superfície livre de uma onda ($T=10$ s, $d=18,3$ m, $H=0,2$ m) no domínio de validade da teoria Linear simulada com a onda de Stokes de segunda ordem

No caso da Figura 6.1 a componente de Stokes tem um peso muito reduzido, praticamente nulo, isto significa que apenas a componente linear está a ser contabilizada e que a onda de Stokes de segunda ordem parece representar bem ondas no intervalo de validade da teoria linear. A onda linear tem uma forma sinusoidal sendo a altura da crista igual à da cava.

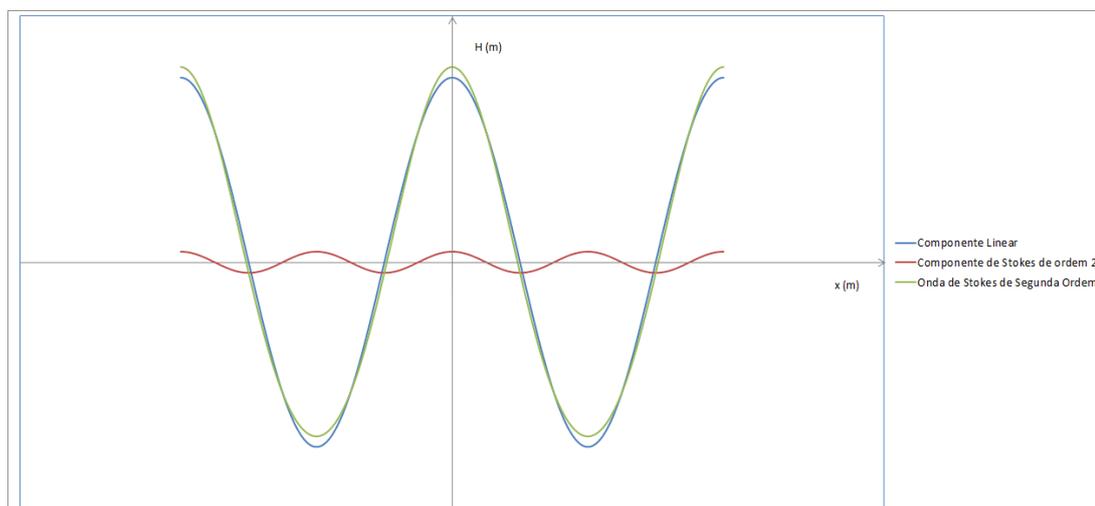


Figura 6.2: Superfície livre de uma onda ($T=10$ s, $d=18,3$ m, $H=1,5$ m) no domínio de validade da onda de Stokes de segunda ordem simulada com essa teoria

A Figura 6.2 apresenta a onda de Stokes de segunda ordem que tem a crista e a cava um pouco mais elevadas que a onda linear devido à componente de Stokes de ordem 2.

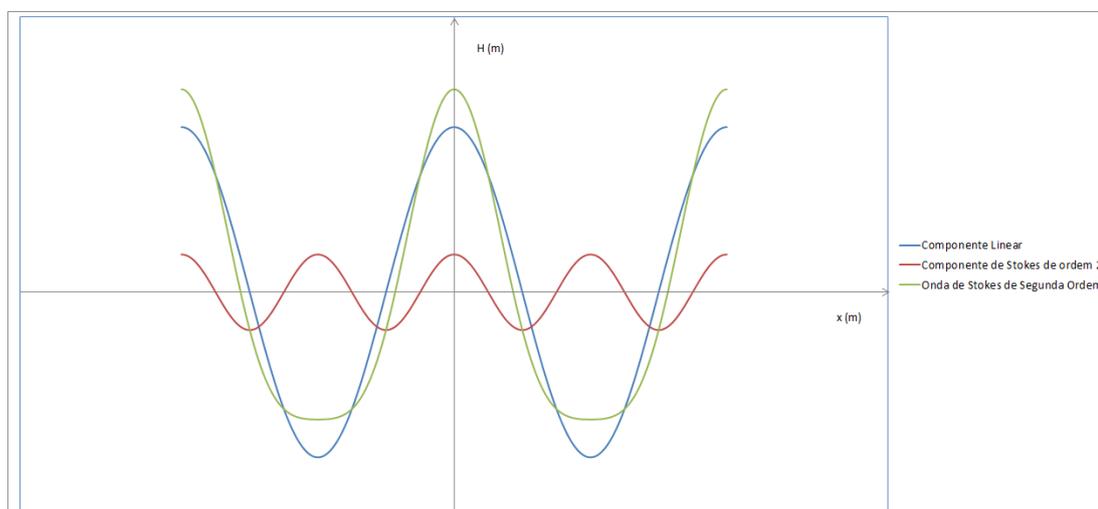


Figura 6.3: Superfície livre de uma onda ($T=10$ s, $d=18,3$ m, $H=6$ m) no domínio de validade da onda de Stokes de terceira ordem com a onda de Stokes de segunda ordem

A figura anterior apresenta cristas ainda mais elevadas que as ondas anteriores e cavas menos profundas e mais compridas, esta é aproximadamente a forma de uma onda de Stokes de terceira ordem. Pode-se considerar que estas ondas ainda são bem modeladas pela onda de Stokes de segunda ordem se estiverem próximas do limite que separa o domínio de validade destas duas teorias, como é o caso da onda anterior.

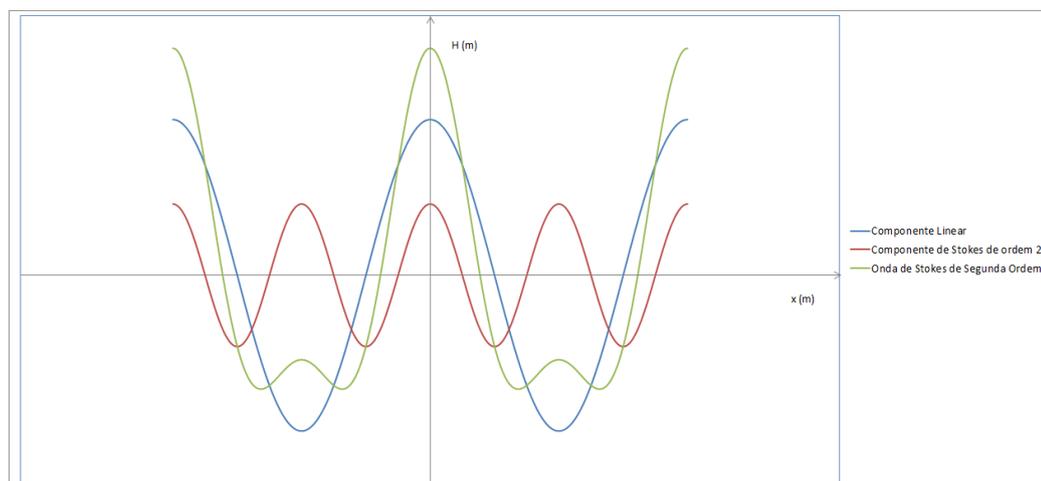


Figura 6.4: Superfície livre de uma onda ($T=10$ s, $d=18,3$ m, $H=12$ m) no domínio de validade da onda cnoidal simulada com a onda de Stokes de segunda ordem

A onda cnoidal aproximada pela onda de Stokes de segunda ordem em nada se assemelha à representada na Figura 2.2. A componente de Stokes tem uma contribuição tão grande que, na cava, cria uma pequena crista que não aparece representada na Figura 2.2. No caso das ondas entrarem neste domínio é necessário ser cauteloso nos resultados. Felizmente não temos ondas próximas deste intervalo como se pode ver na Figura 5.2.

Podemos concluir que, para as ondas no intervalo de validade de Stokes de primeira, segunda ordem e ordem igual a três (se próximo da fronteira que separa o domínio de validade destas duas últimas teorias), o programa parece modelar de forma correta a superfície livre das mesmas. No intervalo de validade da teoria cnoidal o mesmo não acontece.

6.2 “Power matrix” e comparação com resultados experimentais

Comparando as médias das relações apresentadas na Tabela 5.2, rapidamente se tiram duas conclusões: usando o Método 1 as potências aumentam com o aumento de nós em funcionamento e usando o Método 2 não há variação da potência produzida com a variação do número de nós que abrem simultaneamente. Estas conclusões podem ser explicadas se olharmos para as equações que calculam as potências turbinadas. Estas dependem do caudal no circuito hidráulico que é calculado de forma diferente para os dois métodos como foi explicado em 3.3.6.2, o primeiro método depende do número de nós que abrem simultaneamente enquanto que no segundo método depende das características da turbina que são constantes ao longo de todas as simulações.

O Método 2 não se aproxima dos resultados obtidos durante os trabalhos experimentais visto que, nestes trabalhos, não foi usada uma turbina. Eventualmente poderiam alterar-se as

características inerentes à turbina simulada computacionalmente até se obterem valores mais próximos dos experimentais sendo certo, no entanto, que se trata de dois processos diferentes. No entanto, este não é um dos objetivos desta dissertação e, por isso, o Método 2 não será analisado. Fica, no entanto, feita a rotina que torna possível esta abordagem quando surgirem resultados experimentais com uma turbina.

Outra conclusão se pode tirar da Tabela 5.2. A média das relações usando o Método 1 parece aumentar na proporção de, aproximadamente, um terço com a abertura de cada nó adicional sendo próxima da unidade para 3 nós abertos simultaneamente. Isto significa que, por cada nó aberto, se consegue obter, aproximadamente, um terço da energia estimada experimentalmente e que a matriz correspondente ao Método 1 com 3 nós abertos parece representar a melhor aproximação entre o trabalho experimental e o trabalho desenvolvido nesta dissertação. Convém lembrar que a Tabela 5.2 apresenta valores médios. Olhando para os quadros das relações presentes no Anexo C podemos ver que algumas das relações atingem valores superiores aos valores médios.

Cruzando o facto de a matriz com 3 nós abertos simuladamente ser a que tem valores de potências mais próximos dos obtidos experimentalmente com a Figura 5.1 que demonstra que, durante os trabalhos experimentais se abriam 3 nós em cada crista da onda, podemos concluir que a “power matrix” representada na Tabela C.3 parece ser a matriz mais próxima da realidade.

Olhando apenas para a “power matrix” identificada na Tabela C.3 podemos tentar retirar mais algumas conclusões. Para isso é apresentada a Figura 6.5 com as potências produzidas para cada período e altura de onda. Pode-se notar que a potência aumenta com o aumento da altura de onda assim como com o aumento do período. Para os dois maiores períodos a diferença das potências turbinadas é muito reduzida, fica a sensação que, para períodos maiores que 12 s, o aumento das potências turbinadas seria irrelevante devido a uma aparente desaceleração das potências turbinadas com o aumento do período.

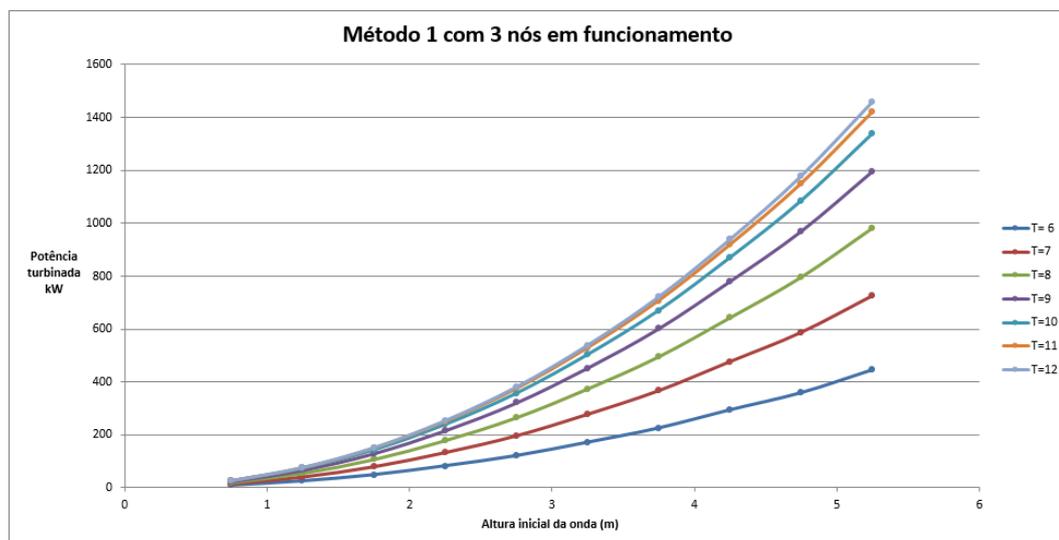


Figura 6.5: Representação da evolução da potência turbinada com o aumento da altura da onda para cada período de onda simulado usando o Método 1 com 3 nós em funcionamento

No trabalho experimental a maior potência ocorre na onda com um período correspondente a 10 s. No entanto, usando o modelo computacional, a maior potência ocorre aos 12 s. Este facto poderá ser explicado pela rebentação que ocorre no trabalho experimental e que esta rotina computacional não contabiliza. A rebentação pode ocorrer em alturas de ondas superiores sendo que, no trabalho experimental, ocorre nas ondas destacadas na Tabela 5.1. A rebentação implica uma perda de energia e uma diminuição da altura da onda que se reflecte na diminuição da potência turbinada experimentalmente. Se compararmos a Figura 6.5 e a Figura 6.6, podemos ver que, no trabalho experimental, as curvas têm um formato em “S” devido à rebentação, enquanto que, nos resultados obtidos usando a rotina computacional, o crescimento da potência é polinomial (de ordem 2). É normal que, a diferença da potência capturada entre curvas com diferentes períodos de onda seja maior para alturas de onda maiores comparativamente a alturas de onda menores. Esta diferença é máxima para uma onda com 5,25 m de altura.

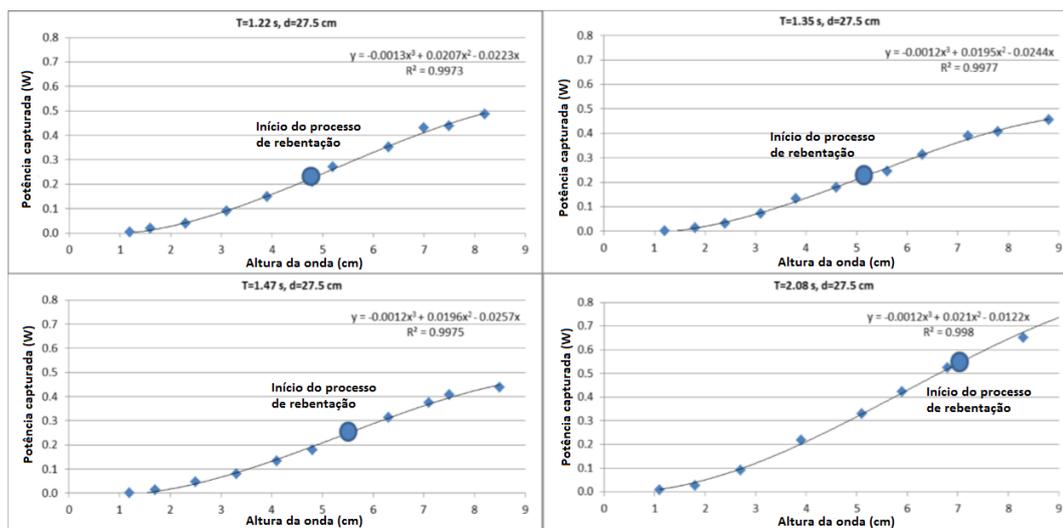


Figura 6.6: Curvas de potência obtidas experimentalmente num modelo à escala 1,5:100 (adaptado de Lopes de Almeida et al (2016))

A restituição é representada, de forma simplificada, por um nó cuja área molhada tem a altura do dispositivo, a este nó são atribuídos diversos valores como a cota de restituição ($Z_{res.}$), pressões e velocidades. No entanto, este ponto não representa bem a velocidade na restituição visto que o perfil de velocidades não é linear mas sim logarítmico como é demonstrado na Figura 6.7. Este erro torna-se mais evidente em alturas de onda maiores onde existe uma maior diferença entre as velocidades no topo do dispositivo e no fundo do mar.

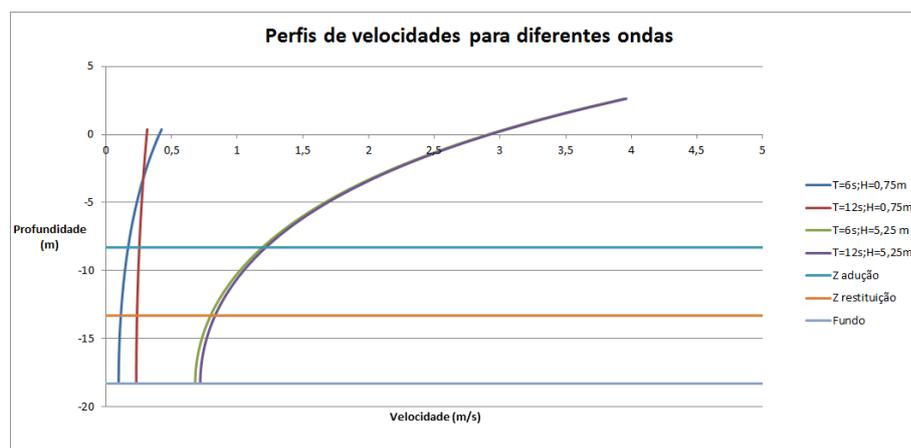


Figura 6.7: Perfis de velocidade de diferentes ondas

A velocidade altera o caudal na restituição que, por sua vez, altera o caudal no circuito hidráulico (no caso do Método 1), apesar de ser apenas um ligeiro desvio, este irá aumentar ligeiramente a potência calculada pelo modelo computacional em alturas de onda superiores. (ver Anexo C).

Na matriz de relações presente no Anexo C existem valores muito elevados em alturas de onda mais baixas (comuns a todas as simulações) que podem estar associadas a baixas pressões e velocidades nos nós de adução que não permitem vencer a rigidez do sistema compósito rede-membrana e promover a total abertura das válvulas de adução durante os trabalhos experimentais (Lopes de Almeida et al, 2016). O mesmo não acontece no modelo computacional que abre as válvulas com maiores pressões, independentemente do seu valor (poderiam não ter pressão suficiente para abrir os nós mas, segundo este modelo os nós abrem na mesma). Os valores nulos das relações devem-se a potências nulas capturadas experimentalmente devidas às válvulas não abrirem. Este é o caso extremo do referido anteriormente.

Analisando os campos obtidos pelo programa (Figuras 5.5 a 5.7) podemos tirar algumas conclusões:

- O campo de pressões mostra naturalmente a pressão a crescer com a profundidade devido ao aumento da massa de água acima do dispositivo;
- Para a mesma cota, existe uma ligeira diferença entre a pressão abaixo da crista e abaixo da cava (é maior abaixo da crista). Os nós em funcionamento dependem da altura de adução e restituição e dos valores das pressões nessas cotas;
- O campo de velocidades apresenta maiores valores abaixo da crista e da cava visto que estes valores são a resultante da velocidade (a soma das componentes vertical e horizontal), e estas, apesar de negativas abaixo da cava, continuam a ser elevadas em módulo. Apesar disso, são menores que as velocidades abaixo da crista;
- O campo representativo da carga hidráulica mostra os maiores valores abaixo da crista e os menores valores abaixo da cava;
- É possível diferenciar claramente as zonas de adução e restituição;
- Os valores da pressão, velocidade e carga hidráulica acima da superfície livre da onda são nulos.

Analisando a Tabela 5.3 é possível constatar que, com o aumento da profundidade existe uma diminuição do diferencial de pressões entre a cava e a crista da onda. Se, para grandes profundidades, esta tendência de decréscimo se mantiver, o diferencial será tão pequeno que não permitirá uma boa captura da energia das ondas. Por esta razão, parece ficar provado que o REEFS não terá um bom desempenho a grandes profundidades.

Olhemos agora para as tabelas relativas à variação das dimensões do dispositivo (Tabela 5.4 a Tabela 5.10). Como seria de esperar, aumentando o comprimento do dispositivo obtemos um aumento da potência capturada porque o dispositivo está em contacto com um maior comprimento da onda. Por outro lado, uma diminuição da largura e comprimento do dispositivo (separadamente) parece diminuir a captura da energia das ondas em termos absolutos. No entanto, o que nos interessa comparar não é a potência capturada, mas sim o rácio entre a alteração das dimensões do dispositivo (por exemplo, 50% do comprimento original) e a relação entre a potência obtida usando estas dimensões e as dimensões originais (por exemplo, potência obtida usando 44 m corresponde a 50% da potência obtida usando 88 m). Segundo a Tabela 5.6, a diminuição da largura permite um rácio superior a 1 (significa que é a alteração é favorável), sendo que, o maior rácio é obtido usando 5 m de largura. No caso do comprimento do dispositivo é possível ver que o aumento desta dimensão não traz grandes acréscimos de potência (Tabela 5.10), no entanto, a diminuição permite rácios superiores, sendo que, o maior rácio é obtido para 44 m de comprimento.

A Tabela 5.12 demonstra que o erro de se usar a Teoria Linear em vez de se usar a onda de Stokes de ordem 2 é, no máximo, de 10%. Um factor que pode ter influenciado os resultados obtidos (para além do factor óbvio de se terem usado duas teorias de ordem diferente) é a simplificação feita na escolha do ponto de intersecção da onda de Stokes de segunda ordem com o eixo das abcissas.

6.3 Conclusões finais

- 1) Foi possível desenvolver, implementar e aplicar um modelo computacional para avaliação da produtibilidade energética de um novo conversor de energia das ondas, baseado na teoria de propagação de ondas de gravidade de Stokes de 2ª ordem;
- 2) Este modelo computacional simplificado evidenciou um razoável acordo com os resultados experimentais preliminares obtidos em modelo reduzido, no caso em que se adota o Método 1 e um número de válvulas a abrir simultaneamente igual ao verificado experimentalmente o qual foi em número de 3;
- 3) O modelo computacional simplificado demonstrou flexibilidade do ponto de vista da capacidade em incorporar outras configurações geométricas do dispositivo, o que permite antever da sua utilidade como ferramenta exploratória no âmbito da otimização da sua configuração geométrica.

6.4 Trabalhos futuros

- 1) Comparar a produtibilidade energética usando o Método 2 com dados técnicos de diversas turbinas existentes no mercado;

- 2) Avaliar a produtibilidade energética incorporando no modelo computacional outros factores como a reflexão, a refração e a rebentação usando um modelo de águas pouco profundas;
- 3) Mudar a posição nos nós de adução e restituição e investigar outras hipotéticas configurações para o dispositivo incluindo novo posicionamento para o grupo turbogerador, por exemplo a meio do do dispositivo ou a $\frac{1}{4}$ do seu comprimento;
- 4) Analisar qual a profundidade mais adequada para maximizar a produção energética, tendo em consideração a rebentação da onda sobre o dispositivo;

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Airy, George B. (1845). "On Tides and Waves". Encyclopaedia Metropolitana. Vol. 5. Art. 192. pp. 241-396.
- Boussinesq, J. (1872). "Théorie des ondes et des remous qui se propagent le long d'un canal rectangulaire horizontal, en communiquant au liquide contenu dans ce canal des vitesses sensiblement pareilles de la surface au fond". Journal de Mathématiques Pures et Appliquées. pp.55-108.
- Carmo, J. (2016). "Processos Físicos e Modelos Computacionais em Engenharia Costeira". Imprensa da Universidade de Coimbra.
- Chakrabarti, S. K. (1987). Hydrodynamics of offshore structures. WIT Press.
- Chakrabarti, S. K. (2005). Handbook of Offshore Engineering. Vol. 1. pp. 1-662. Elsevier Ltd.
- Clément, Alain, McCullen, P., Falcão, A., Fiorentino, A., Gardner, F, Hammarlund, K., Lemonis, G., Lewis, T., Nielsen, K., Simona, P., Pontes, M., Schild, P., Sjostrom, B., Sorensen, H. C., Thorpe, T. (2002). «Wave energy in Europe: Current status and perspectives». Renewable and Sustainable Energy Reviews. Issue 6. pp. 405-431. doi:10.1016/S1364-0321(02)00009-6.
- Dean, Robert George e Robert A. Dalrymple (1991). "Advanced Series on Ocean Engineering - Volume 2: Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists". World Scientific.
- DNV RP-C205. (2010). "Environmental Conditions and Environmental Loads". DNV.
- Drew, B., A.R Plummer, M. N. Sahinkaya (2009). "A review of wave energy converter technology". Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part A- Journal of Power and Energy. 223 (8). pp. 887–902. doi:10.1243/09576509JPE782.
- Fenton, John D. (1998). "Developments in Offshore Engineering - Chapter 2: The Cnoidal Theory of Water Waves". pp. 55–100. Gulf Professional Publishing.
- Flow3d@ (2014). <https://www.flow3d.com/modeling-capabilities/waves/>. Acedido a 21 de Agosto 2017.
- Gerstner, F. J. (1802). "Theorie der Wellen". Abhand. Kön Bömischen Gesel. Wiss. Prague.
- Gunn, Kester, e Stock-Williams, Clym (2012). "Quantifying the global wave power resource". Renewable Energy. Issue 44. pp. 296-304. doi:10.1016/j.renene.2012.01.101.
- Holthuijsen, Leo H. (2007). "Waves in Oceanic and Coastal Waters". Cambridge University

Press.

International Energy Agency. (2016). "Key World Energy Statistics 2016".

Lamb, Horace. (1916). "Hydrodynamics". 4th Edition. Cambridge University Press.

Le Méhauté, Bernard (1976). "An Introduction to Hydrodynamics and Water waves". Springer-Verlag. doi:10.1007/978-3-642-85567-2.

Lopes de Almeida, J. P. P. G. (2015). Recife artificial de proteção costeira com unidade geradora de energia com ou sem contacto direto com a água do mar. WO2015072869 A1, submetido em 2015. Disponível online em: <http://www.google.com/patents/WO2015072869A1?cl=pt>.

Lopes de Almeida, J. P. P. G., B. Mujtaba, A. M. Oliveira Fernandes (2016). "Preliminary laboratorial determination of the REEFS novel wave energy converter power matrix". (Submetido).

Lopes de Almeida, J. P. P. G. (2017). "REEFS: An artificial reef for wave energy harnessing and shore protection – A new concept towards multipurpose sustainable solutions". Renewable Energy. 114. pp. 817-829. Disponível online em: authors.elsevier.com/a/1VSjP3QJ-dThwe. Acedido a 8 de Setembro de 2017

López, Iraide, Jon, Andreu, Salvador, Ceballos, Iñigo, Martínez De Alegría, e Iñigo, Kortabarria (2013). "Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment". Renewable and Sustainable Energy Reviews. 27. pp. 413-434. doi:10.1016/j.rser.2013.07.009.

Mollison, Denis, e Pontes, M. (1992). "Assessing the Portuguese wave energy resource". Energy. 17. pp. 255-268.

Pico OWC@ (2006). <http://www.pico-owc.net/gallery.php>. WaveEC Offshore Renewables. Acedido a 21 de Agosto de 2017.

Pitt, Edward (2009). "Assessment of Performance of Wave Energy Conversion Systems". Marine Renewable Energy Guides. Disponível online em: www.emec.org.uk/standards/assessment-of-performance-of-wave-energy-conversion-systems/. Acedido a 8 de Setembro de 2017

PowerBuoy@ (2017). <http://www.oceanpowertechnologies.com/powerbuoy-technology/>. Ocean Power Technologies. Acedido a 21 de Agosto de 2017.

Quintela, António C. (2000). "Hidráulica". Fundação Calouste Gulbenkian.

Russell, J.S. (1845). "Reports on Waves". 14th meeting of the British Association for the Advancement of Science. London

Santos Silva, Carlos A. (2008). "RoadMap para as Energias Renováveis Offshore em Portugal".

Stokes, George Gabriel. (1847). "On the Theory of Oscillatory Waves". Transactions of the Cambridge Philosophical Society. Vol. 3. pp. 197-235.

VLH turbine@ (2013). <http://www.vlh-turbine.com/turbine#>. VLH. Acedido a 21 de Agosto 2017.

WaveRoller@ (2012). <http://aw-energy.com/about-waveroller/waveroller-concept/>. AW Energy. Acedido a 21 de Agosto de 2017.

Wiegel, R. L. (1960). "A presentation of cnoidal wave theory for practical application". Journal of Fluid Mechanics. Vol. 7. Issue 2. pp. 273-286.

ANEXO A DADOS_GERAIS.DAT

```
-----Dados para ENERGIA_ONDAS.FOR-----
*****
                Características físicas da onda:
Período, T(s)          Profundidade, D(m)          Altura da onda, HI(m)
          9.                18.3                3.25
*****
                Parâmetros de discretização no espaço:
Número de pontos em X          Número de pontos em Z
          NX                NZ
          100                75
*****
                Parâmetros de discretização no tempo:
Discretização no tempo, DT(s)
          0.1
*****
                Localização e características da turbina:
Ponto I da turbina na matriz,  Ponto J da turbina na matriz,
          I_TURB(m)                J_TURB(m)
          75                1
Rendimento da turbina,          Potência instalada da turbina,
          REND_TURB                PI_TURB(kW)
          0.8                500.
Queda máxima na turbina,        Queda mínima na turbina
          H_MAX_TURB (m)                H_MIN_TURB (m)
          5.25                0.75
*****
                Características do circuito hidráulico na adução:
Perímetro molhado,          Área molhada,          Coeficiente de rugosidade,
          PERIM_MOL_ADU(m)                AREA_MOL_ADU(m2)                K_HID_ADU
          48.28                100.                0.003
*****
                Características do circuito hidráulico na restituição:
Perímetro molhado,          Área molhada,          Coeficiente de rugosidade,
          PERIM_MOL_RES(m)                AREA_MOL_RES(m2)                K_HID_RES
          68.28                100.                0.003
*****
```

Dados para os nós de adução:

Número de nós da adução, N_ADU 100	Número máximo de nós de adução que abrem simultaneamente, N_MAX_ADU 3
Comprimento da adução, (inferior a DX), C_ADU(m) 0.88	Largura de cada nó de adução, B_ADU(m) 20.
Coefficiente de perda de carga localizada na tomada de água da adução, K_ADU 0.5	Efeito de concentração na entrada com diretrizes, ALFA_ADU 1.

Dados para os nós de restituição:

Número de nós da restituição, N_RES 100	Número máximo de nós de restituição que abrem simultaneamente, N_MAX_RES 3
Comprimento da restituição, (inferior a DX), C_RES(m) 0.88	Largura de cada nó de restituição, B_RES(m) 10.
Coefficiente de perda de carga localizada na saída de água da restituição, K_RES 1.	Efeito de concentração na restituição com diretrizes, ALFA_RES 1.

Características do dispositivo:

Largura do dispositivo, B_DISP(m) 20.	Comprimento do dispositivo, C_DISP(m) 88.	Altura do dispositivo, H_DISP(m) 10.
---------------------------------------------	-------------------------------------------------	--------------------------------------------

ANEXO B PONTOS RETIRADOS DO DIAGRAMA APRESENTADO NA FIGURA 2.3

Tabela B.1: Pontos retirados do diagrama apresentado na Figura 2.3

	x $\left(\frac{d}{gT^2}\right)$	y $\left(\frac{H}{gT^2}\right)$		x $\left(\frac{H}{gT^2}\right)$	y $\left(\frac{H}{gT^2}\right)$	
Airy 1	0,0013	0,0001	Cnoidal 1	0,0005	0,0000	
	0,0124	0,0003		0,0068	0,0019	
Airy 2	0,0124	0,0003	Cnoidal 2	0,0068	0,0019	
	0,0130	0,0004		0,0155	0,0081	
	0,0134	0,0004	Cnoidal 3	0,0155	0,0081	
	0,0155	0,0005		0,0162	0,0090	
	0,0186	0,0005		0,0171	0,0096	
	0,0249	0,0006		0,0177	0,0103	
	0,0311	0,0006		0,0186	0,0112	
	0,0388	0,0006		0,0217	0,0137	
	0,0497	0,0007		0,0249	0,0165	
	0,0528	0,0007		0,0280	0,0183	
	0,0559	0,0007		0,0311	0,0205	
	0,0590	0,0007		Rebent. 1	0,0001	0,0001
	0,0621	0,0007			0,0186	0,0137
0,0684	0,0007	Rebent. 2	0,0186	0,0137		
0,0746	0,0007		0,0217	0,0155		
0,0777	0,0007		0,0280	0,0186		
Airy 3	0,0777		0,0007	0,0404	0,0233	
	1,0000		0,0007	0,0621	0,0249	
Stokes 2ª 1	0,0068	0,0019	0,0684	0,0255		
	0,0249	0,0056	0,0777	0,0255		
Stokes 2ª 2	0,0249	0,0056	Rebent. 3	0,0777	0,0255	
	0,0311	0,0065		1,0000	0,0255	
	0,0373	0,0075				
	0,0621	0,0084				
	0,0684	0,0087				
	0,0777	0,0087				
Stokes 2ª 3	0,0777	0,0087				
	1,0000	0,0087				

ANEXO C MATRIZES OBTIDAS PARA 18,3 M DE PROFUNDIDADE E QUOCIENTE ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E COMPUTACIONAIS

Tabela C.1: Matriz obtida usando o Método 1 e 1 nó

H/T	6	7	8	9	10	11	12
5,25	175	290	398	488	548	579	591
4,75	141	235	324	397	445	469	478
4,25	116	192	262	320	357	376	382
3,75	89	148	202	247	276	290	294
3,25	68	112	153	186	207	218	220
2,75	48	79	108	132	147	154	156
2,25	33	54	73	89	99	103	104
1,75	20	32	44	54	59	62	62
1,25	10	16	23	27	30	32	32
0,75	4	6	8	10	11	11	11

Tabela C.2: Matriz obtida usando o Método 1 e 2 nós

H/T	6	7	8	9	10	11	12
5,25	321	529	721	881	987	1045	1070
4,75	259	428	585	715	801	846	865
4,25	212	348	473	576	642	677	690
3,75	163	268	365	444	495	522	531
3,25	124	203	275	334	372	391	397
2,75	88	144	195	237	264	277	281
2,25	60	98	132	160	177	185	188
1,75	35	58	79	96	106	111	112
1,25	19	30	41	49	54	57	57
0,75	7	11	14	18	19	20	20

Tabela C.3: Matriz obtida usando o Método 1 e 3 nós

H/T	6	7	8	9	10	11	12
5,25	445	725	983	1196	1339	1419	1457
4,75	358	587	797	970	1085	1149	1177
4,25	293	476	644	780	870	918	938
3,75	225	367	496	602	670	707	721
3,25	171	277	374	452	503	529	538
2,75	121	196	265	321	356	375	380
2,25	82	133	179	216	239	250	254
1,75	49	79	107	129	143	150	152
1,25	25	41	55	66	73	76	77
0,75	9	14	19	24	26	27	27

Tabela C.4: Matriz obtida usando o Método 1 e 4 nós

H/T	6	7	8	9	10	11	12
5,25	548	886	1194	1448	1620	1719	1770
4,75	442	716	968	1174	1312	1391	1429
4,25	361	581	780	943	1050	1110	1137
3,75	277	446	601	727	809	855	873
3,25	210	337	453	546	607	639	651
2,75	148	239	321	387	430	452	460
2,25	101	161	216	260	287	301	306
1,75	59	96	129	155	172	180	183
1,25	31	49	66	79	87	92	92
0,75	11	17	23	28	31	32	33

Tabela C.5: Matriz obtida usando o Método 2 e 1 nó

H/T	6	7	8	9	10	11	12
5,25	95	155	210	254	283	298	302
4,75	81	132	179	217	241	254	257
4,25	70	113	152	184	204	214	217
3,75	57	92	124	150	167	175	177
3,25	46	75	100	121	134	140	142
2,75	35	57	77	93	103	108	109
2,25	9	43	57	68	76	79	80
1,75	0	26	38	46	51	54	54
1,25	0	0	0	18	27	28	28
0,75	0	0	0	0	0	0	0

Tabela C.6: Matriz obtida usando o Método 2 e 2 nós

H/T	6	7	8	9	10	11	12
5,25	98	158	215	260	289	303	308
4,75	83	135	183	221	246	258	261
4,25	71	115	155	187	208	217	220
3,75	58	94	127	154	170	178	180
3,25	47	76	103	124	136	143	144
2,75	36	59	79	95	105	110	111
2,25	14	43	58	70	77	81	81
1,75	0	29	39	47	52	55	55
1,25	0	0	0	22	28	29	28
0,75	0	0	0	0	0	0	0

Tabela C.7: Matriz obtida usando o Método 2 e 3 nós

H/T	6	7	8	9	10	11	12
5,25	98	159	215	260	289	302	307
4,75	83	135	183	222	246	258	261
4,25	71	116	156	188	208	217	219
3,75	58	95	127	154	170	178	180
3,25	47	76	103	124	136	143	144
2,75	36	59	79	95	105	110	111
2,25	15	44	59	70	77	81	81
1,75	0	29	39	47	52	54	55
1,25	0	0	0	22	28	28	28
0,75	0	0	0	0	0	0	0

Tabela C.8: Matriz obtida usando o Método 2 e 4 nós

H/T	6	7	8	9	10	11	12
5,25	98	159	215	260	288	301	305
4,75	83	135	183	222	245	256	259
4,25	71	115	156	188	207	216	218
3,75	58	95	127	154	170	177	179
3,25	47	76	103	124	136	142	143
2,75	36	59	79	95	105	109	110
2,25	15	44	59	70	77	80	81
1,75	0	29	39	47	52	54	55
1,25	0	0	0	22	28	28	28
0,75	0	0	0	0	0	0	0

Tabela C.9: Quociente usando o Método 1 e 1 nó

H/T	6	7	8	9	10	11	12
5,25	0,45	0,40	0,43	0,47	0,48	0,56	0,57
4,75	0,42	0,38	0,40	0,42	0,44	0,51	0,52
4,25	0,41	0,37	0,39	0,38	0,41	0,48	0,49
3,75	0,39	0,35	0,37	0,35	0,38	0,45	0,46
3,25	0,39	0,35	0,35	0,32	0,37	0,44	0,45
2,75	0,38	0,34	0,33	0,30	0,36	0,44	0,45
2,25	0,41	0,34	0,33	0,29	0,37	0,46	0,48
1,75	0,45	0,35	0,32	0,28	0,40	0,53	0,56
1,25	0,60	0,38	0,31	0,28	0,56	0,88	1,03
0,75	0,00	0,62	0,31	0,31	0,00	0,00	0,00

Tabela C.10: Quociente usando o Método 1 e 2 nós

H/T	6	7	8	9	10	11	12
5,25	0,83	0,73	0,78	0,85	0,86	1,00	1,04
4,75	0,77	0,69	0,73	0,75	0,78	0,92	0,95
4,25	0,76	0,67	0,70	0,69	0,73	0,86	0,89
3,75	0,72	0,64	0,66	0,63	0,69	0,81	0,84
3,25	0,71	0,63	0,63	0,58	0,66	0,79	0,81
2,75	0,70	0,61	0,60	0,54	0,65	0,78	0,81
2,25	0,74	0,62	0,59	0,52	0,66	0,82	0,86
1,75	0,80	0,62	0,57	0,50	0,72	0,94	1,01
1,25	1,09	0,69	0,55	0,50	1,00	1,57	1,84
0,75	0,00	1,08	0,55	0,57	0,00	0,00	0,00

Tabela C.11: Quociente usando o Método 1 e 3 nós

H/T	6	7	8	9	10	11	12
5,25	1,15	1,00	1,06	1,15	1,17	1,36	1,41
4,75	1,07	0,94	0,99	1,02	1,06	1,24	1,29
4,25	1,04	0,92	0,95	0,93	0,99	1,16	1,20
3,75	0,99	0,88	0,90	0,85	0,93	1,10	1,14
3,25	0,98	0,86	0,86	0,79	0,89	1,06	1,11
2,75	0,96	0,83	0,82	0,73	0,87	1,06	1,10
2,25	1,01	0,84	0,79	0,70	0,89	1,10	1,16
1,75	1,10	0,85	0,77	0,67	0,97	1,27	1,36
1,25	1,48	0,94	0,75	0,68	1,35	2,11	2,48
0,75	0,00	1,44	0,74	0,76	0,00	0,00	0,00

Tabela C.12: Quociente usando o Método 1 e 4 nós

H/T	6	7	8	9	10	11	12
5,25	1,41	1,22	1,29	1,40	1,41	1,65	1,71
4,75	1,31	1,15	1,21	1,24	1,29	1,51	1,56
4,25	1,29	1,12	1,15	1,13	1,20	1,41	1,46
3,75	1,22	1,07	1,09	1,02	1,12	1,33	1,38
3,25	1,21	1,04	1,04	0,95	1,08	1,29	1,34
2,75	1,18	1,02	0,99	0,88	1,05	1,27	1,33
2,25	1,24	1,02	0,96	0,84	1,08	1,33	1,40
1,75	1,35	1,03	0,92	0,81	1,17	1,53	1,65
1,25	1,80	1,15	0,90	0,82	1,62	2,55	2,98
0,75	0,00	1,75	0,90	0,90	0,00	0,00	0,00

Tabela C.13: Quociente usando o Método 2 e 1 nó

H/T	6	7	8	9	10	11	12
5,25	0,25	0,21	0,23	0,25	0,25	0,29	0,29
4,75	0,24	0,21	0,22	0,23	0,24	0,27	0,28
4,25	0,25	0,22	0,22	0,22	0,23	0,27	0,28
3,75	0,25	0,22	0,22	0,21	0,23	0,27	0,28
3,25	0,27	0,23	0,23	0,21	0,24	0,28	0,29
2,75	0,28	0,24	0,24	0,21	0,25	0,30	0,31
2,25	0,11	0,27	0,25	0,22	0,28	0,35	0,37
1,75	0,00	0,28	0,27	0,24	0,35	0,45	0,49
1,25	0,00	0,00	0,00	0,19	0,51	0,79	0,89
0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela C.14: Quociente usando o Método 2 e 2 nós

H/T	6	7	8	9	10	11	12
5,25	0,25	0,22	0,23	0,25	0,25	0,29	0,30
4,75	0,25	0,22	0,23	0,23	0,24	0,28	0,29
4,25	0,25	0,22	0,23	0,22	0,24	0,28	0,28
3,75	0,26	0,22	0,23	0,22	0,24	0,28	0,28
3,25	0,27	0,24	0,24	0,21	0,24	0,29	0,30
2,75	0,29	0,25	0,24	0,22	0,26	0,31	0,32
2,25	0,18	0,27	0,26	0,23	0,29	0,36	0,37
1,75	0,00	0,32	0,28	0,25	0,36	0,46	0,49
1,25	0,00	0,00	0,00	0,22	0,53	0,81	0,91
0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela C.15: Quociente usando o Método 1 e 3 nós

H/T	6	7	8	9	10	11	12
5,25	0,25	0,22	0,23	0,25	0,25	0,29	0,30
4,75	0,25	0,22	0,23	0,23	0,24	0,28	0,29
4,25	0,25	0,22	0,23	0,22	0,24	0,28	0,28
3,75	0,26	0,23	0,23	0,22	0,24	0,28	0,28
3,25	0,27	0,24	0,24	0,21	0,24	0,29	0,30
2,75	0,29	0,25	0,24	0,22	0,26	0,31	0,32
2,25	0,19	0,28	0,26	0,23	0,29	0,35	0,37
1,75	0,00	0,32	0,28	0,25	0,36	0,46	0,49
1,25	0,00	0,00	0,00	0,23	0,52	0,79	0,90
0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela C.16: Quociente usando o Método 1 e 4 nós

H/T	6	7	8	9	10	11	12
5,25	0,25	0,22	0,23	0,25	0,25	0,29	0,29
4,75	0,25	0,22	0,23	0,23	0,24	0,28	0,28
4,25	0,25	0,22	0,23	0,22	0,24	0,27	0,28
3,75	0,26	0,23	0,23	0,22	0,24	0,27	0,28
3,25	0,27	0,24	0,24	0,21	0,24	0,29	0,29
2,75	0,29	0,25	0,24	0,22	0,26	0,31	0,32
2,25	0,19	0,28	0,26	0,23	0,29	0,35	0,37
1,75	0,00	0,32	0,28	0,25	0,35	0,46	0,49
1,25	0,00	0,00	0,00	0,23	0,52	0,78	0,89
0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00