



**Francisco Miguel Ivo Henriques**

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

## **Simulação Numérica das Características Hidrodinâmicas de uma Central de Energia das Ondas**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Mecânica**

Orientador: Professor Doutor José Manuel Paixão Conde,  
Professor Auxiliar, DEMI FCT/UNL

Júri

Presidente: Prof. Doutor Luís Miguel Chagas Gil  
Arguente: Doutor Eric Lionel Didier  
Vogal: Prof. Doutor José Manuel Paixão Conde



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro, 2019**



## **Simulação Numérica das Características Hidrodinâmicas de uma Central de Energia das Ondas**

Copyright © Francisco Miguel Ivo Henriques, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, é necessário expressar toda a minha gratidão para com aqueles que da sua forma influenciaram a elaboração desta dissertação, pois sem estes, não teria sido possível alcançar os objetivos definidos. A todos, os meus *sinceros* agradecimentos.

Em especial, gostaria de agradecer a todos os professores do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologia, por todo o conhecimento e mestria disponibilizada ao longo de cinco anos.

De seguida, agradecer ao Professor Doutor José Paixão Conde, pela sua orientação, disponibilidade e exigência que foi inculcando ao longo desta dissertação.

À minha família, gostaria de agradecer pelas pessoas que são, e que tornaram possível toda a sorte obtida até ao momento. Aos meus pais por me guiarem quando algo não parece certo, ao meu avô pelas palavras de incentivo e ao meu irmão Rui e família por toda a sabedoria que me foram passando ao longo do tempo.

À minha segunda família, os *amigos*. A estes, agradeço por toda a paciência mostrada em certos momentos de aflição, desorientação ou até mesmo frustração. Um agradecimento especial ao Carlos, Manuel, Miguel e ao Tiago por terem sido o mais bonito que a faculdade me ofereceu. Ao André e Filipe, por terem caminhado lado a lado comigo no âmbito da Mecânica dos Fluidos Computacional e na realização desta dissertação.

Ao André, João, José, Pedro e Nuno, por terem amparado todas as minhas quedas, por terem estado lá, tanto no trabalho como na descontração, que permitiram toda a estabilidade necessária à elaboração desta dissertação. À *nossa*.

Por fim, um agradecimento, muito especial, a *ti*.



## RESUMO

---

Atualmente, a humanidade utiliza a energia produzida a nível mundial de uma forma desmedida, aumentando a pressão nos meios de produção de energia convencionais – combustíveis fósseis –, desafiando deste modo a engenharia a recorrer a novos meios de produção da mesma, com o intuito de diminuir a utilização dos combustíveis utilizados até ao momento. É nesta área que surge a necessidade/possibilidade de aproveitamento de energia proveniente das ondas do mar.

O objetivo desta dissertação é a simulação numérica das características hidrodinâmicas da central de energia das ondas de Mutriku, em Espanha, recorrendo ao *software* OpenFOAM. A primeira parte deste estudo é o conhecimento deste *software*, por forma a entender quais as formas mais eficientes de criar o pretendido. Parâmetros como a malha, o passo de tempo, até mesmo as características de onda, são bastante importantes para ser possível uma obtenção de resultados credíveis.

Posteriormente serão estudadas as ferramentas computacionais, das leis inerentes ao mesmo, da escolha do *solver* utilizado – *olaFlow* –, e da geração de modelos geométricos/numéricos, e após este, será feita a análise dos resultados obtidos nesta dissertação, comparando-os com artigos apresentados como literatura do tema em questão.

Estando os resultados analisados, para ser possível retirar conclusões acerca da eficiência da malha, e de outros fenómenos, onde se conclui que o parâmetro absorção funciona bem, e não há presença do fenómeno *Sloshing*.

**Palavras-chave:** CAO, Mutriku, OpenFOAM, *olaFlow*,  $k - \epsilon$ .

---





## ABSTRACT

---

Today, mankind uses the energy produced around the world in an excessive way, increasing the pressure on conventional energy sources - fossil fuels -, challenging engineering to resort to new ways of energy production in order to reduce the use of fuels used so far. It is in this area that the need / possibility of harnessing energy from the sea waves arises.

The main goal of this dissertation is to simulate the hydrodynamic characteristics of the Mutriku wave power plant, in Spain, using OpenFOAM *software*. The first part of this study is the learning of this *software*, in order to understand what the most efficient ways are to create the intended simulation. Parameters such as the mesh, the time step, even the wave characteristics, are very important in order to achieve credible results. In this study the  $k - \epsilon$  turbulence model is also used.

After studying the computational tools, the physical laws that impact them, the choice of the *solver* used - olaFlow -, and the generation of geometric / numerical models, the results obtained in this dissertation are then analyzed, being then compared with articles presented in the literature of the theme in question.

After the results have been analysed, in order to draw conclusions about the efficiency of the mesh, and other phenomena, namely the amplification factor, other analysis are made during this dissertation.

**Keywords:** OWC-WEC, Mutriku, OpenFOAM, olaFlow,  $k - \epsilon$ .

---



# ÍNDICE

<b>Índice de Figuras</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Tabelas</b>	<b>xvii</b>
<b>Nomenclaturas e Símbolos</b>	<b>xix</b>
<b>Abreviaturas e Acrónimos</b>	<b>xxi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	4
1.3 Estrutura da Dissertação . . . . .	5
<b>2 Dispositivo de aproveitamento de energia das ondas: Coluna de Água Oscilante</b>	<b>7</b>
2.1 Caracterização do Dispositivo . . . . .	7
2.2 Mecanismo de funcionamento . . . . .	10
2.2.1 Problemas de aplicabilidade e possíveis melhorias . . . . .	11
2.3 Central de Mutriku . . . . .	13
2.3.1 Batimetria . . . . .	15
<b>3 Caracterização da Agitação Marítima</b>	<b>19</b>
3.1 Agitação Marítima . . . . .	19
3.1.1 Tipos de ondas e mecanismos de formação . . . . .	19
3.2 Teoria das ondas . . . . .	20
3.2.1 Parâmetros que definem a onda . . . . .	21
3.2.2 Teoria Linear das Ondas . . . . .	22
3.2.3 Teoria das Ondas não Linear . . . . .	27
<b>4 Modelo Numérico</b>	<b>29</b>
4.1 Ferramentas e <i>Software</i> . . . . .	29
4.1.1 OpenFOAM . . . . .	30
4.2 Modelação matemática e numérica . . . . .	33
4.2.1 Equações RANS . . . . .	33

4.2.2	Modelos de Turbulência . . . . .	36
4.2.3	Método VOF . . . . .	38
4.2.4	Equações que descrevem o escoamento . . . . .	39
4.2.5	Algoritmos de Resolução . . . . .	40
4.2.6	Esquemas numéricos e de interpolação . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Caracterização numérica e discussão de resultados</b>	<b>47</b>
5.1	Modelação da Central de Mutriku . . . . .	47
5.1.1	Criação do Domínio Computacional . . . . .	48
5.1.2	Modelo Numérico . . . . .	54
5.1.3	Sondas . . . . .	59
5.2	Resultados e Discussão . . . . .	60
5.2.1	Geometria 1 . . . . .	60
5.2.2	Geometria 2 . . . . .	67
5.3	Outros Resultados . . . . .	71
<b>6</b>	<b>Conclusões e trabalhos futuros</b>	<b>79</b>
6.1	Trabalhos Futuros . . . . .	80
	<b>Bibliografia</b>	<b>81</b>
<b>I</b>	<b>Árvore de diretorias do caso de estudo do OpenFOAM</b>	<b>85</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Evolução do consumo mundial de energia, por ano, ao longo dos anos. Adaptado de IEA 2018. . . . .	2
1.2	Distribuição global do potencial anual em energia das ondas. Adaptado de Cornett 2008. . . . .	2
1.3	Dispositivos de conversão de energia. . . . .	3
2.1	Dispositivo do tipo CAO na Escócia. Adaptado de Falcão e Henriques 2016. .	8
2.2	Fotografia real do dispositivo LIMPET. Adaptado de Falcão e Henriques 2016.	9
2.3	Fotografia real da CAO, no Pico. Adaptado de Falcão e Henriques 2016. . . .	9
2.4	Representação esquemática de uma central CAO. . . . .	10
2.5	Representação do funcionamento da turbina Wells. . . . .	11
2.6	Tipos de configurações para o fundo do dispositivo CAO. Adaptado de Vyzikas et al. 2017. . . . .	12
2.7	Tipos de configurações para a parede frontal do dispositivo CAO. Adaptado de Bouali e Larbi 2013. . . . .	12
2.8	À esquerda, uma turbina Wells, à direita, uma turbina Axial. Adaptado de Falcão e Henriques 2016. . . . .	13
2.9	Esquema de construção do quebra-mar. Adaptado de Torre-Enciso et al. 2009.	14
2.10	Lado esquerdo: representação em corte da central. Lado direito: representação das 16 câmaras. Adaptado de Torre-Enciso et al. 2009. . . . .	14
2.11	Geometria do dispositivo CAO e posição das sondas. Adaptado de Fachadas 2012. . . . .	15
2.12	Representação do domínio (esquerda).Refinamento da malha em volta do dispositivo CAO (direita). Adaptado de Medina-Lopez et al. 2015. . . . .	15
2.13	Excerto de uma carta marítima da região de Mutriku. . . . .	16
2.14	Declive das diferentes retas traçadas na carta marítima. . . . .	17
3.1	Distribuição esquemática da energia da onda por frequência. Adaptado de Massel 1996. . . . .	20
3.2	Representação de uma onda simples progressiva. Adaptado de Demirbilek e Vincent 2008. . . . .	22
3.3	Condições de fronteira para ondas regulares. Adaptado de Dean e Dalrymple 1991. . . . .	24

3.4	Teoria de Ondas por Le Méhauté. Adaptado de Le Méhauté 1976. . . . .	27
4.1	Estrutura do OpenFOAM. . . . .	30
4.2	Medição pontual típica da velocidade num escoamento turbulento. Adaptado de Versteeg e Malalasekera 2007. . . . .	34
4.3	Fluxograma representativo do algoritmo PIMPLE, aplicado no interFoam ( <i>solver</i> do OpenFOAM em que o IHFOAM se baseia). Adaptado de Higuera et al. 2013. . . . .	41
5.1	Representação, não à escala, do modelo geométrico pretendido (geometria 2). . . . .	47
5.2	Primeira tentativa da modelação da Central. . . . .	48
5.3	Uma das diversas tentativas da modelação da Central. . . . .	48
5.4	Parâmetro <i>blocks</i> do ficheiro " <i>blockMeshDict</i> ". . . . .	49
5.5	Representação, não à escala, da geometria criada pelo <i>utility blockMesh</i> . . . . .	50
5.6	Figura à esquerda: <i>rampa.stl</i> . No meio: <i>parede.stl</i> . À direita: <i>turbina.stl</i> . . . . .	52
5.7	Representação, não à escala, da modelação do modelo geométrico, usando os dois <i>utilities</i> . . . . .	53
5.8	Representação em pormenor da malha gerada. . . . .	53
5.9	Representação em detalhe das anomalias presentes na malha. . . . .	54
5.10	Identificação da teoria das ondas: a) 0.6 metros; b) 1.2 metro; c) 2 metros. . . . .	56
5.11	Representação, não à escala, da localização das sondas no modelo geométrico. . . . .	59
5.12	Representação, não à escala, da geometria 1 - CAO aberta. . . . .	60
5.13	Parâmetro <i>blocks</i> do ficheiro " <i>blockMeshDict</i> ". . . . .	61
5.14	Representação, não à escala, da geometria criada pelo <i>utility blockMesh</i> . . . . .	61
5.15	Representação em pormenor da malha gerada. . . . .	62
5.16	Representação da ausência das anomalias dentro da malha. . . . .	63
5.17	Representação gráfica da evolução da elevação da superfície livre da água ao longo do tempo para as Sondas 1,2 e 4, respetivamente para a geometria 1. . . . .	64
5.18	Elevação da superfície livre da água registada pelas sondas 3, 4 e 5, para a geometria 1. . . . .	65
5.19	Elevação da superfície livre da água (média das sondas 3,4 e 5): $H=0.6\text{m}$ - vermelho; $H=1.2\text{m}$ - verde; $H=2\text{m}$ - azul. (- OpenFOAM; - - Fluent). . . . .	66
5.20	Elevação da superfície livre da água (média das sondas 3,4 e 5): $H=0.6\text{m}$ - vermelho; $H=1.2\text{m}$ - verde; $H=2\text{m}$ - azul. (- OpenFOAM; - - OpenFOAM(alterado)). . . . .	66
5.21	Fator de Amplificação para: $H=0.6\text{m}$ - vermelho; $H=1.2\text{m}$ - azul; $H=2\text{m}$ - verde. (- OpenFOAM; - - Fluent). . . . .	67
5.22	Fator de Amplificação para: $H=0.6\text{m}$ - vermelho; $H=1.2\text{m}$ - azul; $H=2\text{m}$ - verde. ((- OpenFOAM; - - OpenFOAM(alterado))). . . . .	67
5.23	Representação gráfica da evolução da elevação da superfície livre da água ao longo do tempo para as Sondas 1, 2 e 4, respetivamente para a geometria 2. . . . .	68

5.24	Elevação da superfície livre livre registada pelas sondas 3, 4 e 5, na a geometria 2. . . . .	69
5.25	Elevação da superfície livre (média das sondas 3, 4 e 5): $H=0.6\text{m}$ - vermelho; $H=1.2\text{m}$ - verde; $H=2\text{m}$ - azul. (- OpenFOAM; - - Fluent). . . . .	70
5.26	Elevação da superfície livre (média das sondas 3, 4 e 5): $H=0.6\text{m}$ - vermelho; $H=1.2\text{m}$ - verde; $H=2\text{m}$ - azul. (- OpenFOAM; - - OpenFOAM(alterado)). . . . .	70
5.27	Fator de Amplificação para: $H=0.6\text{m}$ - vermelho; $H=1.2\text{m}$ - azul; $H=2\text{m}$ - verde. (- OpenFOAM; - - Fluent). . . . .	71
5.28	Fator de Amplificação para: $H=0.6\text{m}$ - vermelho; $H=1.2\text{m}$ - azul; $H=2\text{m}$ - verde. ((- OpenFOAM; - - OpenFOAM(alterado))). . . . .	71
5.29	Representação em pormenor da malha gerada. . . . .	72
5.30	Representação gráfica da evolução da elevação da superfície livre ao longo do tempo. Resultados anteriores: azul; resultados deste caso de estudo: vermelho. . . . .	73
5.31	Representação gráfica da evolução da elevação da superfície ao longo do tempo. Resultados anteriores: azul; resultados deste caso de estudo: vermelho. . . . .	75
5.32	Elevação da superfície livre entre os resultados apresentados no primeiro caso de estudo e o presente. Resultados anteriores: azul; resultados deste caso de estudo: vermelho. . . . .	76
5.33	Representação dos fatores de amplificação em estudo. Resultados anteriores: azul; resultados deste caso de estudo: vermelho. . . . .	76
I.1	Diagrama de diretorias em árvore que representa o conjunto de ficheiros e pastas para realizar uma das simulações realizadas nesta dissertação. . . . .	86





## ÍNDICE DE TABELAS

1.1	Potencial teórico em energia das ondas a nível regional. Adaptado de World Energy Council 2016. . . . .	2
3.1	Parâmetros que descrevem uma onda simples. Adaptado de Cardoso 2017. . . . .	21
3.2	Características da onda. . . . .	22
3.3	Caracterização das ondas consoante a profundidade a que se propagam. Adaptada de Demirbilek e Vincent 2008. . . . .	26
4.1	Expressões intermédias para o modelo de turbulência $k - \epsilon$ . Adaptado de Higuera 2015 . . . . .	37
4.2	Coefficientes do modelo de turbulência $k - \epsilon$ . . . . .	37
4.3	Parâmetros de controlo do algoritmo PIMPLE. . . . .	42
4.4	Linear-solvers (escolhidos no olaFlow) utilizados pelo OpenFOAM ao longo da presente dissertação. . . . .	43
4.5	Esquemas numéricos e respetivos esquemas de interpolação utilizados no OpenFOAM. . . . .	44
5.1	Características da malha utilizada para criar a geometria. . . . .	51
5.2	Características das ondas a serem simuladas. . . . .	55
5.3	Localização das sondas ao longo do domínio do caso de estudo. . . . .	59
5.4	Localização das sondas ao longo do domínio da geometria 1. . . . .	60
5.5	Características da malha utilizada para criar a geometria 1. . . . .	62
5.6	Características da malha utilizada para criar a nova geometria 1. . . . .	72
5.7	Características da malha utilizada para criar a nova geometria 1, com a absortividade ativa. . . . .	74



## NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

$\theta$	Fase	[rad].
$\omega$	Frequência Angular	[rad · s <sup>-1</sup> ].
$\epsilon$	Cap3 - Declive da onda Cap4 - Dissipação de energia cinética	[m <sup>2</sup> · s <sup>-3</sup> ].
$\nu$	Viscosidade cinemática	[m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> ].
$\rho$	Massa volúmica	[Kg · m <sup>-3</sup> ].
$\Phi$	Potencial de velocidade	[m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> ].
$\Psi$	Função corrente	[m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> ].
$\eta$	Deslocamento da superfície livre	[m].
$\psi$	Ângulo de fase inicial	[rad].
$\delta$	Delta de Kronecker	[-].
$\mu$	Viscosidade dinâmica	[Kg · (m · s) <sup>-1</sup> ].
$\alpha$	Fração de volume de fluido	[-].
$\sigma$	Tensão superficial	[N · m <sup>-1</sup> ].
$\kappa$	Curvatura da interface	[-].
$\nu_{eff}$	Viscosidade cinemática efetiva	[m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> ].
$\mu_{eff}$	Viscosidade dinâmica efetiva	[Kg · (m · s) <sup>-1</sup> ].
$\beta_k, \beta_\epsilon$	Coefficientes de dissipação	[-].
$\nu_t$	Viscosidade cinemática turbulenta	[m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> ].
$\mu_t$	Viscosidade dinâmica turbulenta	[Kg · (m · s) <sup>-1</sup> ].
$\delta t$	Passo de tempo	[s].
$C$	Celeridade	[m · s <sup>-1</sup> ].
$Co$	Número de Courant	[-].
$D_k, D_\epsilon$	Coefficientes de difusão	[-].
$F_{amp}$	Fator de amplificação	[-].
$F_i$	Forças de fontes externas	[N].
$H$	Altura de onda	[m].
$H_i$	Altura de onda incidente	[m].
$H_m$	Altura de onda média	[m].

## NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

---

$K$	Número de onda	$[\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]$ .
$L$	Comprimento de onda	$[\text{m}]$ .
$Re$	Número de Reynolds	$[-]$ .
$S$	Tensor da taxa de deformações	$[\text{s}^{-1}]$ .
$T$	Período	$[\text{s}]$ .
$U$	Modulo da velocidade	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ .
$U_c$	Velocidade de compressão	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ .
$X$	Vetor posição	$[\text{m}]$ .
$a$	Amplitude	$[\text{m}]$ .
$c_i$	Dimensões dos elementos de malha	$[\text{m}]$ .
$d$	Profundidade	$[\text{m}]$ .
$g$	Aceleração da gravidade	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$ .
$k$	Energia cinética turbulenta	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}]$ .
$n$	Número de elementos ao longo de uma aresta de malha	$[-]$ .
$p$	Pressão	$[\text{Pa}]$ .
$p^*$	Pressão pseudo-dinâmica	$[\text{Pa}]$ .
$p_\eta$	Pressão na superfície livre	$[\text{Pa}]$ .
$t$	Tempo	$[\text{s}]$ .
$u, v, w$	Componentes da velocidade na direção longitudinal, transversal e vertical	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ .
$u'_i$	Flutuação da velocidade	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ .
$x, y, z$	Coordenadas longitudinal, transversal e vertical do referencial cartesiano	$[\text{m}]$ .

## ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

CAD	<i>Computer Aided Design.</i>
CAO	Coluna de Água Oscilante.
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics.</i>
CFL	Condição de Courant - Friedrich - Levy.
DES	<i>Detached Eddy Simulation.</i>
DFSBC	<i>Dynamic free surface boundary condition.</i>
DIC	<i>Diagonal Incomplete-Cholesky.</i>
DNS	<i>Direct Numerical Simulation.</i>
E	Este.
EDP	Equações Diferenciais às Derivadas Parciais.
EU	União Europeia.
GPL	<i>General Public License.</i>
KFSBC	<i>Kinematic free surface boundary condition.</i>
LES	<i>Large Eddy Simulation.</i>
MDF	Método das Diferenças Finitas.
MEF	Método dos Elementos Finitos.
MVF	Método dos Volumes Finitos.
N	Norte.
NE	Nordeste.
NO	Noroeste.
OJB	<i>Wavefront Object.</i>

## ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

---

OWC	<i>Oscilating Water Column.</i>
PCG	<i>Preconditioned Conjugate Gradient.</i>
PISO	<i>Pressure Implicit with Splitting of Operators.</i>
RAM	<i>Random Access Memory.</i>
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes.</i>
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations.</i>
STL	<i>Stereolithography.</i>
VARANS	<i>Volume Averaged Reynolds Averaged Navier-Stokes.</i>
VC	<i>Volume de Control.</i>
VOF	<i>Volume of Fluid.</i>
WEC	<i>Wave Energy Converter.</i>

## INTRODUÇÃO

Mundialmente os recursos energéticos mais utilizados para satisfazer as necessidades energéticas provêm de combustíveis fósseis. Uma vez que a renovação destes recursos não consegue sustentar a sua taxa de consumo, para além dos seus impactos ambientais, surgiu a necessidade de procurar novas maneiras de saciar estas necessidades, que por sua vez estão a aumentar com o passar do tempo. Assim, a engenharia tem procurado novas formas de conversão de energia que se distingam por ser menos poluentes e que sejam renováveis, ou seja, a sua regeneração seja superior à sua taxa de consumo. Deste modo, é notório o interesse da energia proveniente das ondas.

### 1.1 Motivação

Consultando a Agência Internacional de Energia, é possível observar, na figura 1.1 (IEA 2018), um aumento acentuado da produção de energia a nível mundial ao longo dos anos, e uma vez que este estudo é até 2016, acredita-se que a tendência tenha sido o crescimento da mesma.

Ainda consultando o mesmo gráfico, é de destacar que a energia produzida a partir de fontes renováveis ronda os 20%. Por forma a incentivar o desenvolvimento e implementação de mais e novos meios renováveis na produção de energia, a União Europeia (EU), em 2005, colocou como meta que até 2030 o mínimo de energia produzida proveniente de fontes renováveis tenha de ser 27%.

Os oceanos cobrem a maior parte da superfície terrestre, sendo este o recurso natural com maior potencial energético. De acordo com o *World Energy Council*, estima-se que o potencial energético proveniente das ondas chegasse aos 29500 TWh. Na figura 1.2 é possível observar a distribuição deste potencial energético a nível mundial, e na tabela 1.1 é possível analisar o mesmo, mas a nível regional.

### Electricity generation by fuel

World 1990 - 2016

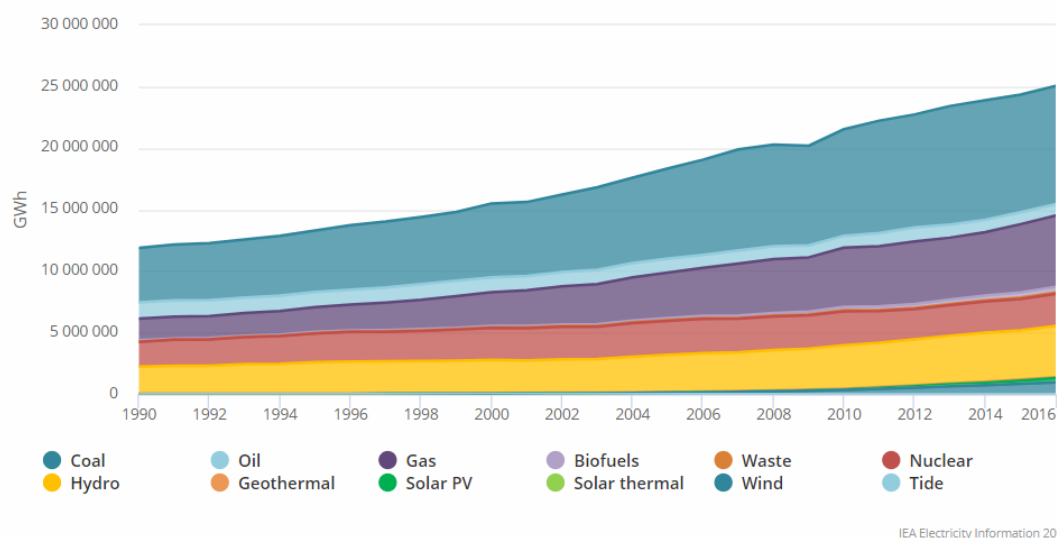


Figura 1.1: Evolução do consumo mundial de energia, por ano, ao longo dos anos. Adaptado de IEA 2018.

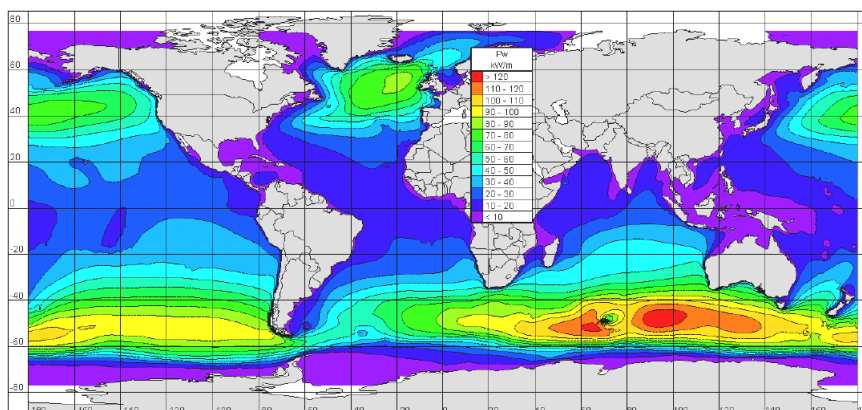


Figura 1.2: Distribuição global do potencial anual em energia das ondas. Adaptado de Cornett 2008.

Tabela 1.1: Potencial teórico em energia das ondas a nível regional. Adaptado de World Energy Council 2016.

Região	Energia das ondas TWh/ano
Europa ocidental e do norte	2.800
Mar Mediterrâneo e arquipélagos atlânticos	1.300
América do Norte e Gronelândia	4.000
América Central	1.500
América do Sul	4.600
Africa	3.500
Asia	6.200
Australia, Nova Zelândia e ilhas do Pacífico	5.600
<b>TOTAL</b>	<b>29.500</b>



Contida nos oceanos, a energia pode manifestar-se de duas formas: marés ou ondas. Assim, deve entender-se a diferença entre energia proveniente das ondas e energia proveniente das marés, uma vez que as ondas são formadas pela atuação do vento na superfície da água e as marés são o resultado da interação entre o campo gravítico da Lua com a Terra. De notar que o modo de aproveitamento de cada energia também é diferente, uma vez que a energia de marés necessita de reunir as condições costeiras favoráveis para se poder extrair tal energia, sendo necessário garantir, através de um canal, o fenómeno de ressonância, não esquecendo o períodos das marés – 12h25m –, mostrando assim algumas limitações, visto que há um período de intermitência no aproveitamento deste modo de energia. No caso da energia das ondas, não havendo o inconveniente associado aos períodos de intermitência, estão disponíveis cerca de 50KW (analisar a figura 1.2) por metro de frente de onda para serem convertidos, tendo já em conta o fenómeno de atenuação provocado pela diminuição da profundidade à medida que a onda se aproxima da costa (Cruz e Sarmiento 2004).

Em 1973, com a crise petrolífera, nasceu o interesse na energia das ondas como fonte de energia alternativa. Com isto, os países com grandes orlas costeiras começaram a financiar a sua investigação e desenvolvimento, por forma a aproveitar o recurso de forma mais expedita.

O aproveitamento de energia das ondas, como foi explicado anteriormente, apresenta uma maior facilidade de aplicabilidade, comparativamente ao aproveitamento de energia das marés. No presente capítulo será dado mais ênfase à conversão de energia a partir das ondas.

Os dispositivos de conversão de energia (WEC) a partir das ondas podem ser classificados quanto ao seu funcionamento e à sua posição, como se pode observar no esquema seguinte (figura 1.3):

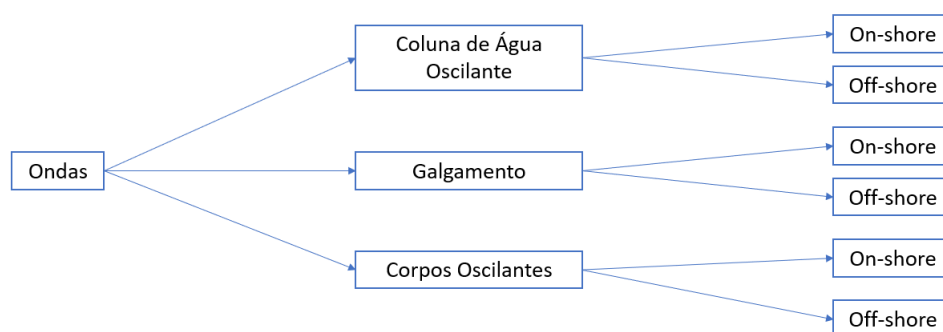


Figura 1.3: Dispositivos de conversão de energia.

Porém, tanto os estudos como as tentativas de implementação de dispositivos de aproveitamento de energia das ondas não se mostram ser suficientemente robustos e eficientes perante as adversidades que enfrentam, tal como o meio erosivo onde se encontram. Na presente dissertação é dado ênfase ao dispositivo Coluna de Água Oscilante (CAO), uma vez que já existem vários protótipos à escala real implementados à volta do globo, e

atualmente um destes já se encontra em exploração comercial (Falcão e Henriques 2016).

Publicado em Maio de 2018, um estudo de mercado da União Europeia (European Commission) apresentou conclusões bastante interessantes acerca da viabilidade dos oceanos para produção de energia. Este estudo mostra que a Europa é líder em projetos e investimentos realizados nesta área, sendo que a nível mundial já foram investidos cerca de 6 biliões de euros. A análise dos projetos já implementados mostrou o esperado: os custos de implementação desta tecnologia – conversão de energia dos oceanos – são superiores aos custos de implementação de energias fósseis. Contudo, quando se estuda os custos de manutenção, estes são consideravelmente inferiores face à manutenção das energias fósseis. Desta forma, é facilmente amortizado o investimento inicial, vendendo a energia produzida, não esquecendo os baixos custos de manutenção.

No entanto, existe um grande impedimento: o preço a que é vendida a energia, pois esta apresenta um preço muito superior ao de outras energias renováveis que já se encontram implementadas e bem consolidadas no mercado. Por forma a solucionar este problema, foi sugerida a partilha de infraestruturas, como quebra-mares, de modo a reduzir o investimento inicial na instalação, e a criação de incentivos por parte do estado ou então por parte de entidades internacionais, tal como foi feito para outras fontes de energias renováveis, para a compra de energia proveniente destes dispositivos de conversão de energia. Assim, a energia seria comprada através do auxílio de incentivos, dando aso para o setor poder crescer, dando hipótese para que num futuro próximo se possa produzir energia a preços mais competitivos no mercado (Commission 2018).

Quanto ao futuro deste sector, conclui-se ainda que até 2021 está planeado a implementação de mais 111 MW distribuídos por 16 projetos em território europeu (Commission 2018).

Em suma, pode-se concluir que a energia das ondas tem muito potencial por explorar, tanto a nível de melhorias tecnológicas, como a nível de implementação de dispositivos que permitam a produção de energia de forma competitiva, não sendo necessário ser só dispositivos CAO. Com esta dissertação, o estudo das características de uma central de energia das ondas permitirá tirar ilações sobre o seu funcionamento, por forma a que a mesma possa ser melhorada, sendo mais eficiente, e adaptar tal melhoramento a novas centrais. Com um aumento de eficiência, as centrais de produção de energia a partir das ondas do mar serão mais atrativas, dando motivos para que o investimento inicial seja dado, e, desta forma, apresentar esta energia como alternativa aos combustíveis fósseis.

## 1.2 Objetivos

O intuito desta dissertação é a simulação numérica das características da central de energia das ondas que está localizada na região de Mutriku, em Espanha, utilizando o *software* OpenFOAM. Para tal é necessário conhecer o programa, nomeadamente que *solver* usar, os parâmetros que sejam relevantes para a simulação, entre os quais de destacar a malha, o tipo de onda gerada e os controlos temporais. O entendimento do programa tem como

objetivo assegurar que a onda gerada na condição de entrada se propaga de forma correta ao longo do domínio estipulado.

Após o estudo dos tutoriais disponibilizados pelo OpenFOAM, será criado o modelo numérico da simulação pretendida para este caso de estudo, com o objetivo de poder analisar os resultados e compará-los com o artigo de Conde e Condeço 2019. Para tal, serão recriadas as geometrias usadas no mesmo para modelar a central de Mutriku.

Uma vez concluídas as simulações, serão analisados os resultados obtidos, e posteriormente alterar alguns parâmetros, tais como a inatividade da absorção ou o número de células, e entender como estes podem influenciar a propagação da onda no decorrer da simulação.

### 1.3 Estrutura da Dissertação

No presente caso de estudo é primeiro feita a abordagem ao *software* OpenFOAM, por forma a entender como definir uma boa propagação da onda ao longo do domínio computacional. Uma vez que criado tanto o modelo numérico como a modelada a central, é possível analisar os resultados obtidos e retirar conclusões acerca da central de energia das ondas, em Mutriku.

Esta dissertação encontra-se apresentada em seis capítulos: Introdução; Dispositivo de aproveitamento de energia das ondas: Coluna de Água Oscilante; Caracterização da agitação marítima; Modelo numérico, passando para a Caracterização Numérica e Discussão de Resultados, concluindo com as Conclusões e trabalhos futuros.

No primeiro capítulo é procurado contextualizar a necessidade deste estudo e o que se pretende com o mesmo.

No capítulo 2 é focado o tema acerca do tipo de dispositivo de energia das ondas que será estudado ao longo da dissertação, explicando um pouco a sua história, passando por mencionar como surgiu, como funciona e os possíveis melhoramentos para trabalhos futuros.

O terceiro capítulo aborda a contextualização teórica dos fenómenos físicos envolvidos no presente caso de estudo, fazendo uma introdução aos mesmos, para além dos fenómenos de formação e propagação das ondas. Neste também são abordadas as diversas teorias de geração de onda.

As ferramentas computacionais utilizadas para executar as simulações numéricas são abordadas no quarto capítulo. Neste são especificadas as funções dos *softwares* de modelação e as ferramentas auxiliares aos quais foram recorridos para o pré e pós processamento.

No capítulo 5, é feita a descrição dos parâmetros estipulados de modo a poder-se comparar este caso de estudo com outros, e as próprias análises produzidas até ao momento. Posteriormente são apresentados os restantes estudos criados no decorrer desta dissertação.

Finalmente, no capítulo 6 é discutido o trabalho produzido ao longo do presente caso de estudo, apresentando-se conclusões ao mesmo, e ainda são feitas sugestões acerca de

trabalhos futuros.

## DISPOSITIVO DE APROVEITAMENTO DE ENERGIA DAS ONDAS: COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE

### 2.1 Caracterização do Dispositivo

Como já mencionado, o dispositivo de conversão de energia das ondas de coluna de água oscilante, CAO, distingue-se dos demais – além de ser o mais popular – devido ao maior investimento depositado e porque chegou mais longe na fase de implementação à escala real.

Uma grande vantagem dos dispositivos CAO é a sua facilidade de aplicabilidade, uma vez que é comum serem inseridos junto à costa – *on-shore* –, tendo a versatilidade de poderem ser inseridos em estruturas já existentes na orla costeira. Exemplo disso são os quebra-mares. Desta forma, para além do reduzido impacto ambiental, a implementação de um dispositivo CAO num quebra-mar auxilia na amortização do custo de construção do mesmo com a produção de energia, para não falar da fácil manutenção da CAO devido aos fáceis acessos ao quebra-mar, e da simplificação da rede de distribuição de energia devido à proximidade à costa (Falcão 2010).

Contudo, as aplicações destes dispositivos na orla costeira apresentam uma desvantagem considerável: têm menos energia disponível, uma vez que o potencial energético das ondas na proximidade da costa é menor comparativamente ao potencial energético das ondas em maiores profundidades. Assim, os dispositivos CAO são projetados por forma a maximizar a energia produzida, de acordo com a altura, período e comprimento de onda característicos do local. Também procuram que a frequência das ondas e a frequência natural do dispositivo sejam o mais próximo possível, por forma a otimizar a sua eficiência (Falcão 2010).

Junto à costa, as forças da agitação marítima são mais significativas, o que apresenta ser uma desvantagem para estes dispositivos, uma vez que tais forças podem meter em

## CAPÍTULO 2. DISPOSITIVO DE APROVEITAMENTO DE ENERGIA DAS ONDAS: COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE

---

causa a integridade estrutural dos mesmos. Este é o maior problema que os dispositivos CAO têm enfrentado desde o início da sua implementação até agora (Falcão e Henriques 2016).

Em 1960, no Japão, foi criado o primeiro projeto parecido ao que hoje se chama de CAO. Este utilizava o movimento oscilante das ondas para alimentar as boias de sinalização marítima. Estes dispositivos apareceram na Europa apenas após a crise petrolífera de 1973, onde Portugal, Irlanda e Reino Unido tiveram uma ação preponderante no seu desenvolvimento. Porém, o primeiro projeto de um dispositivo CAO na Europa foi criado na Noruega, em 1985. Tal projeto – “*Multiresonante OWC*” – foi pioneiro na construção e implementação deste tipo de dispositivos de conversão de energia à escala real, possuindo uma potência instalada de 300KW. O protótipo mostrou o seu valor e gerou energia, mas, em 1988, devido a uma tempestade, este foi significativamente danificado, levando assim à sua desativação. No entanto, esta central foi um passo bastante importante na evolução da construção dos dispositivos CAO, uma vez que permitiu retirar ilações acerca da construção e funcionamento dos mesmos, mais concretamente a possibilidade de produzir energia de forma contínua e aprender com os erros, pois graças a este infeliz incidente, deu para perceber como estruturar a coluna por forma a garantir uma maior resistência à força proveniente das ondas (Brooke 2003).

Enquanto a *Multiresonant OWC* mostrava o seu potencial, outros protótipos estavam a ser desenvolvidos. Em 1990, foi implementada uma CAO na Escócia, sendo esta de pequena dimensão e com uma potência instalada de 75 KW (figura 2.1).



Figura 2.1: Dispositivo do tipo CAO na Escócia. Adaptado de Falcão e Henriques 2016.

Só em 1991 é que a energia das ondas entra para o programa europeu de energias renováveis, dando origem à implementação de mais protótipos de CAO, dos quais se

destacam o LIMPET e a central do Pico (Condeço 2018).

O LIMPET (figura 2.2) é um *upgrade* da central construída na Escócia (1990). Este foi desenvolvido devido a uma parceria entre a empresa Wavegen e a Queen's University Belfast, em 2000, com base nos dados da central da Escócia. Esta central foi construída com uma potência de 500KW, e em 2010 já produzia energia de forma comercial (Falcão e Henriques 2016).



Figura 2.2: Fotografia real do dispositivo LIMPET. Adaptado de Falcão e Henriques 2016.



Figura 2.3: Fotografia real da CAO, no Pico. Adaptado de Falcão e Henriques 2016.

Quanto à central do Pico (figura 2.3), esta surgiu de uma parceria entre o Instituto Superior Técnico e o Wave Energy Center, estando ativa até à primeira metade do ano de 2018. Foi construída entre 1991 e 1999, e desde então desempenhou a sua função de forma intermitente, quer devido a paragens, quer devido a problemas técnicos, ou falta de financiamento. A central do Pico, sendo uma das primeiras do seu tipo e à escala real, demonstrou ser bastante importante para o estudo do desenvolvimento destes dispositivos, uma vez que está instalada numa zona de forte agitação marítima. Assim, teve um

impacto importante no estudo da resistência da estrutura de betão, bem como no acerto da velocidade da turbina às características das ondas.

Estes projetos foram o ponto de partida para a construção da primeira central de produção de energia exclusivamente comercial, a central de Mutriku. As características desta central serão usadas como base para as simulações e estudos presentes nesta dissertação.

## 2.2 Mecanismo de funcionamento

No dispositivo coluna de água oscilante, a energia cinética proveniente do movimento do ar dentro da coluna é convertida em energia mecânica através de uma turbina, que posteriormente será convertida em energia elétrica.

Neste dispositivo, o movimento das ondas (que vêm do mar) obriga o movimento da superfície livre da água que se encontra dentro da coluna, pressurizando e despressurizando o ar que está “preso” dentro da mesma, dando origem a um fluxo (de ar) que atravessa uma turbina. Devido a esta condição, uma vez que o fluxo pode ser ascendente ou descendente, é necessário usar uma turbina que rode sempre no mesmo sentido, independentemente da direção do fluxo de ar (Santos et al. 2019). Na figura 2.4 encontra-se esquematizada uma instalação CAO.

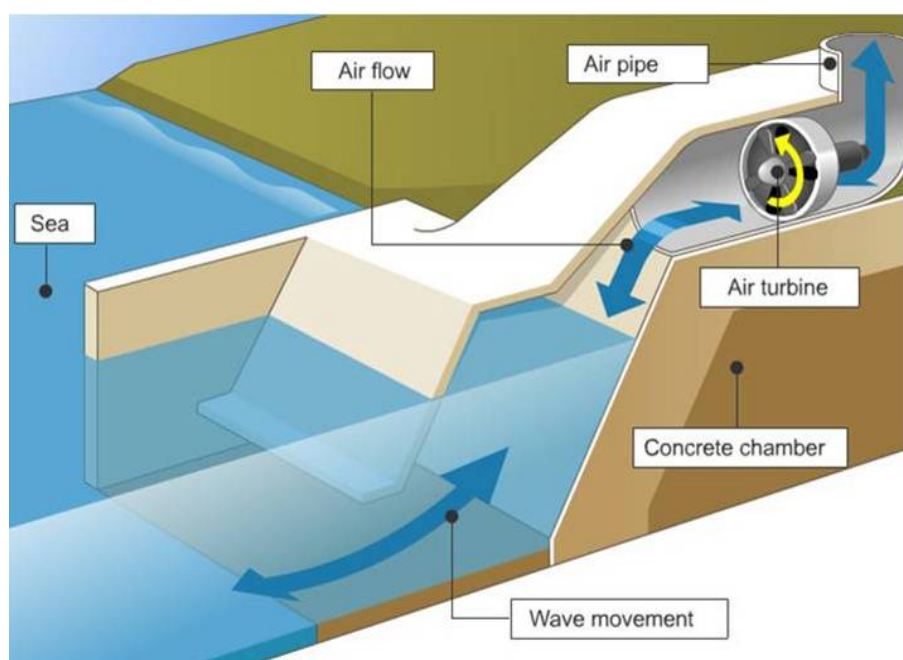


Figura 2.4: Representação esquemática de uma central CAO.

Observando a figura 2.4, esta encontra-se dividida em duas partes: uma parte submersa, caracterizada pela coluna de água, permitindo a entrada e saída da mesma, e uma parte emersa, onde se pode encontrar o conjunto da turbina, gerador e câmara pneumática.



Acerca da parte emersa, a conversão da energia do escoamento em força motriz pode ser conseguida através de uma turbina axial do tipo Wells. Esta foi desenvolvida por Alan Wells e possui características que a tornam adequada para os dispositivos do tipo CAO:

- É auto-retificadora, o que permite que o rotor rode sempre no mesmo sentido, independentemente do sentido do fluxo do escoamento devido à geometria da pá (figura 2.5), que apresenta um perfil simétrico;
- Consegue atingir velocidades de rotação elevadas, mesmo quando o escoamento que exerce a força motriz apresenta uma velocidade relativamente baixa;
- Permite obter um bom desempenho (eficiência entre os 70% e os 80%).

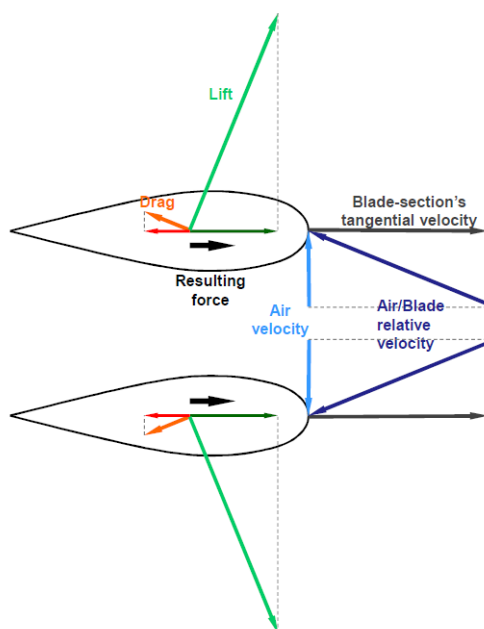


Figura 2.5: Representação do funcionamento da turbina Wells.

### 2.2.1 Problemas de aplicabilidade e possíveis melhorias

Como já dito, os dispositivos de conversão de energia do tipo CAO são os mais versáteis de instalar e são os que já revelaram conseguir produzir energia de forma contínua. No entanto, ainda existem problemas e melhorias a serem estudados, por forma a aumentar a capacidade produtiva dos dispositivos. De seguida serão apresentados alguns fatores limitativos, ou alvos de melhorias:

- A implementação destes dispositivos perto das zonas costeiras significa que a energia disponível para ser convertida é reduzida, uma vez que existem fenómenos de dissipação de energia associados ao efeito do fundo, ou os efeitos de rebentação. Isto leva a que o projeto destes dispositivos tenha já em conta a diminuição de energia disponível,

## CAPÍTULO 2. DISPOSITIVO DE APROVEITAMENTO DE ENERGIA DAS ONDAS: COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE

maximizando ao máximo o aproveitamento desta, tendo como variáveis a amplitude e o comprimento de onda mais comum no local. Não esquecer que a própria irregularidade marítima conta como fator limitativo, diminuindo a eficiência do dispositivo CAO;

- Um dos fatores mais estudados acerca dos dispositivos CAO são a sua geometria e a configuração da central, pois existem diversos modos para construir a mesma e que podem influenciar a sua eficiência. Sobre a configuração do fundo, este pode ir desde as entradas mais simples, como representado na figura 2.6 (3), ou opções mais complexas, como se pode observar na figura 2.6 (2) (Vyzikas et al. 2017). Também existem estudos sobre a posição de parede frontal, estando estes exemplificados na figura 2.7 (Bouali e Larbi 2013);

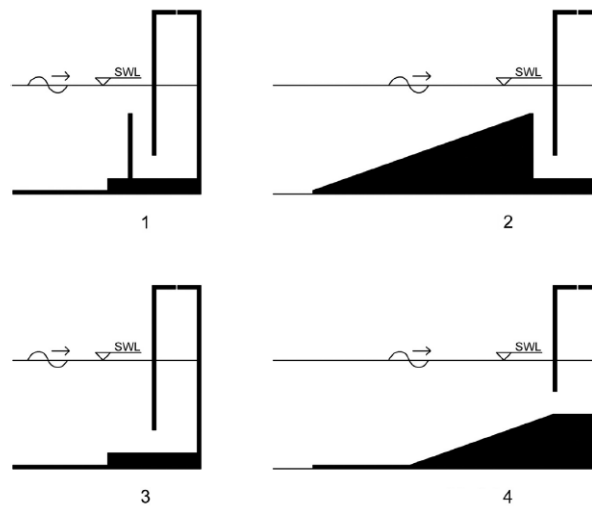


Figura 2.6: Tipos de configurações para o fundo do dispositivo CAO. Adaptado de Vyzikas et al. 2017.

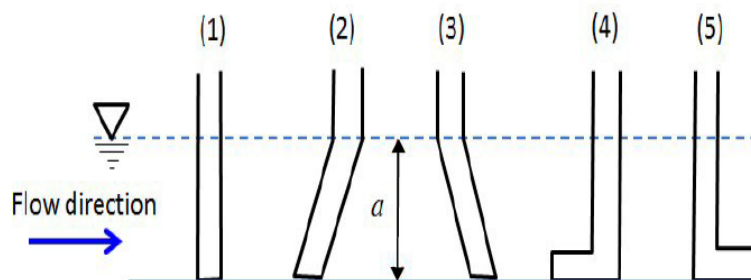


Figura 2.7: Tipos de configurações para a parede frontal do dispositivo CAO. Adaptado de Bouali e Larbi 2013.

- Existem algumas desvantagens na aplicabilidade da turbina Wells, uma vez que apresenta dimensões elevadas comparativamente com a potência que disponibiliza ou então o elevado ruído que faz estando em funcionamento, sendo necessário a utilização de

atenuadores. Estes problemas tem sido alvo de estudo, sendo a turbina axial auto-retificadora a nova possível turbina a usar, caso ultrapasse as incapacidades apresentadas pela turbina Wells (figura 2.8) (Falcão e Henriques 2016).

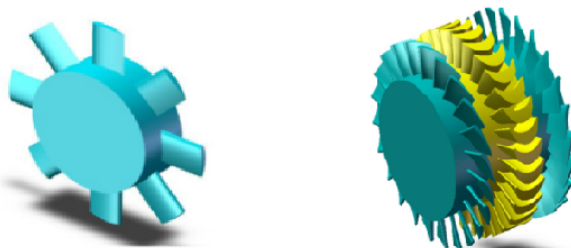


Figura 2.8: À esquerda, uma turbina Wells, à direita, uma turbina Axial. Adaptado de Falcão e Henriques 2016.

Por forma a ser possível estudar a influência destes fatores, recorreu-se a uma central que tem este dispositivo CAO já implementado à escala real – central de Mutriku. Assim, o caso de estudo presente nesta dissertação tem como base esta central.

## 2.3 Central de Mutriku

A central de Mutriku está situada no norte de Espanha e destaca-se por ser a primeira central de coluna de água oscilante (CAO) com exploração comercial.

Localizado no golfo de Biscay, o porto de Mutriku é fortemente afetado pelas tempestades que lá se formam. Deste modo, foi necessário desenvolver e implementar dispositivos que protegessem a costa e as infraestruturas que nela estão inseridas das condições marítimas adversas presentes ao longo dos anos. Estas condições impossibilitavam a circulação de embarcações nesse porto, afetando assim a economia regional, para além dos danos materiais causados na orla costeira. Analisando o problema, o governo espanhol considerou como solução a construção de um quebra-mar, que se pode observar na figura 2.9 (Torre-Enciso et al. 2009).

Sendo o quebra-mar a solução para o porto de Mutriku, o governo espanhol, em parceria com o comité energético do País Basco, quis aproveitar tal solução para projetar e instalar um dispositivo de aproveitamento de energia das ondas. Sendo esta uma proposta aliciante, foi necessário estudar quais as tecnologias – e respetivos dispositivos – existentes que conseguissem converter a energia o mais eficiente possível, sem causar grandes alterações no projeto inicial. Deste modo, concluiu-se que o dispositivo mais adequado para o caso seria um dispositivo coluna de água oscilante. A escolha deste dispositivo deve-se ao facto de este ser facilmente instalado, e é adequado para estruturas marítimas como os quebra mares, para não falar que este dispositivo já mostrou provas que consegue

## CAPÍTULO 2. DISPOSITIVO DE APROVEITAMENTO DE ENERGIA DAS ONDAS: COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE



Figura 2.9: Esquema de construção do quebra-mar. Adaptado de Torre-Enciso et al. 2009.

produzir energia de forma contínua. Na figura 2.10 pode-se observar alguns componentes que constituem um dispositivo CAO.

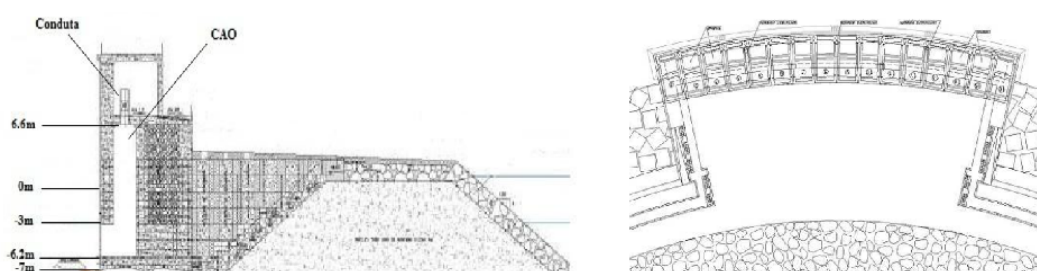


Figura 2.10: Lado esquerdo: representação em corte da central. Lado direito: representação das 16 câmaras. Adaptado de Torre-Enciso et al. 2009.

Na central de Mutriku foram implementadas 16 câmaras, estando inserida em cada câmara uma turbina do tipo Wells. A capacidade total deste conjunto é de 296 KW – 18,5KW por turbina –, onde se estima que seja produzido 600.00 KWh/ano (Conde e Condeço 2019).

A central de Mutriku, uma vez que não é o primeiro projeto implementado com este dispositivo, conta com a vantagem de conhecer o que é mais adequado para o seu caso. Assim, dispõe de uma tecnologia, manutenção e até a própria estrutura mais apropriadas. Um dos pontos fortes desta central é que é construída com partes em betão e outra partes em blocos de rocha compactada, por forma a assegurar o seu comportamento uniforme e a estrutura ser robusta. De notar que até as próprias turbinas foram concebidas de modo a ser possível uma fácil manutenção, pois estas apresentam dimensões reduzidas: 2,83m de altura, 1,25m de largura e pesam 1200kg (Torre-Enciso et al. 2009).

A central apresenta vários pontos chamativos, onde o mais relevante é claramente a diminuição de cerca de 600 toneladas nas emissões de CO<sub>2</sub>, sendo este argumento bastante importante para o cumprimento das normas europeias, relativamente à descarbonização das fontes. Sendo esta central a primeira de exploração comercial com este tipo de dispositivo de conversão de energia das ondas, é de enfatizar a sua importância,

uma vez que pode alterar o panorama no investimento da energia das ondas, abrindo portas aos vários dispositivos implementados e ainda em fase de teste, passando assim a uma exploração efetiva. Outro ponto a realçar neste caso é a demonstração da facilidade de implementação de dispositivos de conversão de energia em estruturas marítimas já existentes (Condeço 2018).

### 2.3.1 Batimetria

Como já mencionado, a configuração do fundo do mar é um dos aspetos que influencia a propagação das ondas. Assim, é notória a necessidade de saber concretamente como é o fundo do mar nas proximidades da central, nomeadamente perto dos dispositivos CAO.

Fachadas 2012, em *Análise de Vários Modelos Numéricos de Captura de Superfície Livre e Aplicação a um Dispositivo Conversor de Energia do Tipo Coluna de Água Oscilante*, estudou esta área, criando assim o seu próprio modelo geométrico do dispositivo CAO. Na figura 2.11 é possível observar tal geometria, e calcular a inclinação do fundo que usou no seu estudo. Assim, a rampa apresenta uma inclinação de  $0,86^\circ$ .

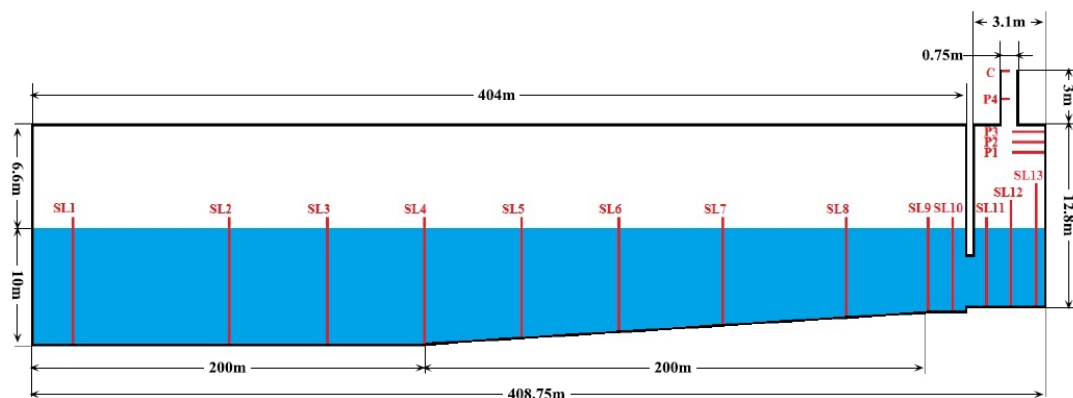


Figura 2.11: Geometria do dispositivo CAO e posição das sondas. Adaptado de Fachadas 2012.



Figura 2.12: Representação do domínio (esquerda). Refinamento da malha em volta do dispositivo CAO (direita). Adaptado de Medina-Lopez et al. 2015.

Consultando o artigo de Medina-Lopez et al. 2015, também é possível obter informação sobre a configuração do fundo do mar, e que representação foi utilizada para o

## CAPÍTULO 2. DISPOSITIVO DE APROVEITAMENTO DE ENERGIA DAS ONDAS: COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE

estudo (figura 2.12). Assim, o fundo do mar na proximidade dos dispositivos, tem uma inclinação de 1:7, o que perfaz um ângulo de  $8,13^\circ$ .

Por forma a simular o fundo do mar da melhor maneira possível, foi feito um estudo acerca da profundidade do mar na região de Mutriku, recorrendo assim a uma carta marítima. Com esta (figura 2.13), foi possível observar as *isolinhas* de profundidade – linhas onde a profundidade é constante –, sendo assim possível calcular o declive na zona. Para isso, foram traçadas quatro retas – Noroeste (NO), Norte (N), Nordeste (NE) e Este (E) – e posteriormente foram marcados pontos de referência sobre cada reta. De seguida, recorrendo a manipulações matemáticas e à ferramenta *Excel*, foi possível obter a inclinação do fundo: N –  $0,53^\circ$ ; NE –  $0,7^\circ$ ; E –  $1,64^\circ$  e NO –  $0,06^\circ$  (figura 2.14).

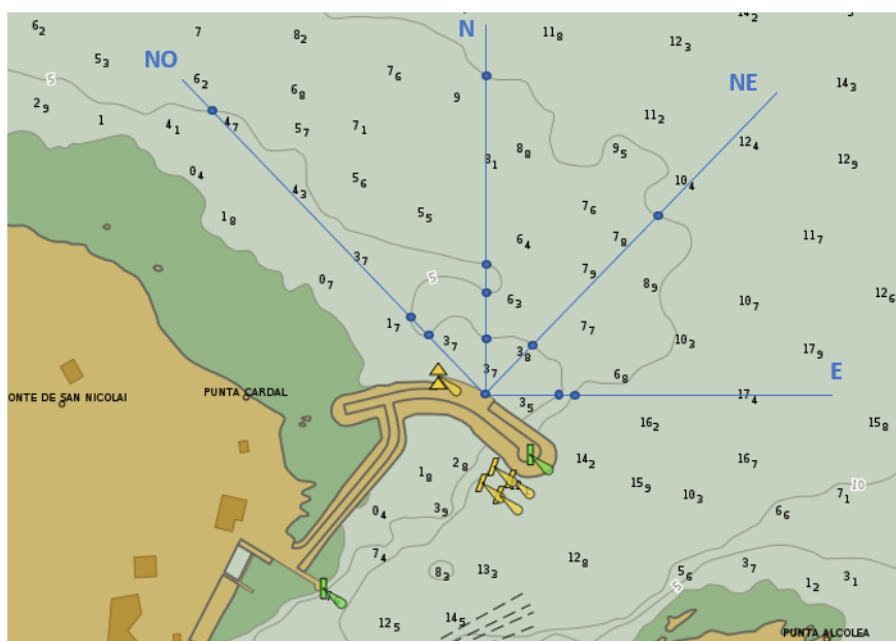


Figura 2.13: Excerto de uma carta marítima da região de Mutriku.

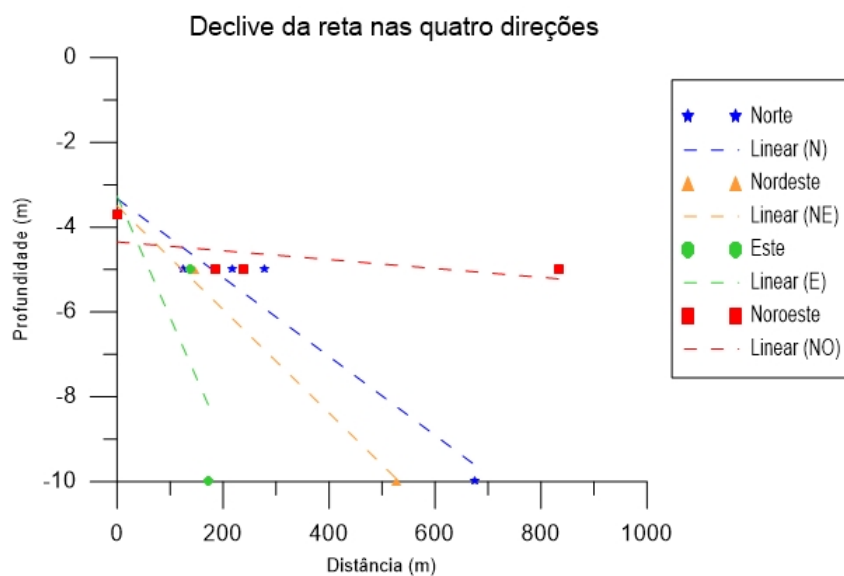


Figura 2.14: Declive das diferentes retas traçadas na carta marítima.

Uma vez que as inclinações obtidas rondam a inclinação usada em Fachadas 2012, para ser possível comprar resultados, foi usada a inclinação de  $0,86^\circ$ . De frisar que para as simulações corridas no presente caso de estudo, o modelo geométrico utilizado teve como base o modelo da figura 2.11.





## CARACTERIZAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA

Uma vez que as ondas são as principais responsáveis por modelar a geometria das praias e das zonas costeiras, é de todo o interesse para a engenharia o conhecimento das características que provêm destas, por forma a projetar estruturas costeiras mais robustas. Deste modo, o conhecimento dos modelos matemáticos que descrevem estes fenómenos são de grande importância para o projeto e modelação das mesmas.

Devido à complexidade da superfície do mar – ser maioritariamente irregular, não ser estacionária, entre outros fatores – não é possível simular com exatidão o seu comportamento. Assim, é necessário recorrer a simplificações e a teorias que se adaptem da melhor maneira possível aos casos em estudo, por forma a obter os melhores resultados.

No presente capítulo, para além de se abordar os mecanismos de formação, propagação e rebentação das ondas, também é mencionado os conceitos teóricos relacionados com a agitação marítima. Também serão apresentadas as teorias que foram utilizadas para a modelação numérica – teoria linear e teoria não linear.

### 3.1 Agitação Marítima

Existem várias formas de se obter diferentes ondas. Estas, para além de serem influenciadas pelas suas fontes, também são afetadas por outros fatores, onde se destaca a configuração do fundo do mar e a própria gravidade, fatores que são responsáveis pelos fenómenos de propagação e rebentação das ondas.

#### 3.1.1 Tipos de ondas e mecanismos de formação

A agitação marítima resulta do fenómeno de transmissão de energia através da água. Esta energia advém de fontes como o vento, forças gravíticas ou mesmo eventos sísmicos. A interação entre o vento e a superfície da água, combinada com a tensão superficial da

mesma, dá origem às chamadas ondas capilares. Caso o contacto se mantenha, haverá uma maior transferência de energia para a superfície da água, formando assim ondas com uma maior amplitude, designadas de ondas de gravidade, uma vez que, devido a esse aumento de amplitude, a gravidade é a principal força de restauração da superfície. As ondas resultantes de forças gravíticas são originadas devido a ação gravitacional da lua e do sol sobre a superfície terrestre, bem como pela rotação da Terra. Estas têm um período entre 12 e 24 horas. Por último, as ondas provenientes de eventos sísmicos são consequência da libertação de energia das placas tectónicas para a água.

Existem mais tipos de ondas para além dos referidos, e todos podem ocorrer simultaneamente, originando assim uma gama de ondas diferentes. Deste fenómeno resulta um variado espectro de ondas, com diferentes comprimentos e períodos de onda. A figura 3.1 representa um gráfico da energia absorvida pela superfície da onda, bem como das suas frequências. De notar que o gráfico está dividido por forma a entender-se a que gama de valores está associado cada mecanismo de formação de ondas.

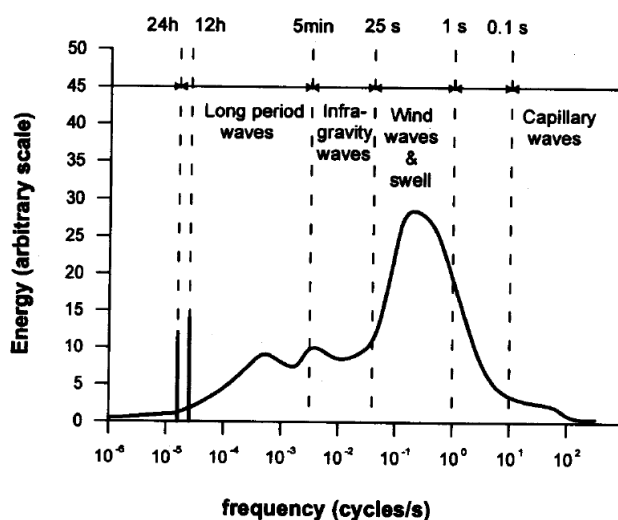


Figura 3.1: Distribuição esquemática da energia da onda por frequência. Adaptado de Massel 1996.

Observando o gráfico da figura 3.1, conclui-se que as ondas com maior potencial energético são as ondas de gravidade. Estas, sendo também as ondas mais comuns que se formam nos oceanos, constituem o maior interesse para aplicações de engenharia, daí o seu estudo ser bastante importante.

### 3.2 Teoria das ondas

Há mais de um século que a humanidade se intriga pelo comportamento das ondas marítimas. Os primeiros avanços acerca deste assunto começaram com estudos de Euler (1707-1783) e Laplace (1749-1827).

Uma vez que existem várias formas de criação de ondas, é bastante complexo utilizar uma teoria que consiga fundamentar todos os fenômenos inerentes ao mesmo de forma correta. Desta forma, recorrendo a várias simplificações, foi possível, através de estudos analíticos, chegar a relações matemáticas que consigam descrever estes fenômenos. Nesta dissertação serão apenas abordadas duas teorias: Teoria Linear das ondas e Teoria não Linear das ondas.

De forma a ser mais fácil entender o comportamento da agitação marítima, é possível dividir o tipo de onda em duas categorias: ondas regulares e ondas irregulares. Estas últimas são as que representam melhor a agitação marítima, não sendo necessariamente as que se usem sempre em simulações numéricas, uma vez que é necessário maior poder computacional, de forma a conseguir estudar os fenômenos tridimensionais que existem.

De seguida, serão abordadas as simplificações e as teorias que descrevem os fenômenos já mencionados, de modo a ser mais fácil o entendimento desta dissertação.

### 3.2.1 Parâmetros que definem a onda

De forma a conseguir reproduzir o comportamento marítimo, são definidos parâmetros para descrever o mesmo. As ondas regulares, caracterizadas por serem bidimensionais, sinusoidais e bem definidas pela sua amplitude e período em qualquer profundidade, podem ser descritas de uma maneira simples, através de variáveis espaciais,  $x$ , e variáveis temporais,  $t$ . Outra alternativa passa por combinar ambas, designada de fase de onda, sendo o seu domínio entre 0 e  $2\pi$ . A fase é constituída por funções de seno e cosseno, que ao serem combinadas com a altura, comprimento de onda e profundidade na zona de propagação, definem a onda. Existem também outros parâmetros, que são derivações dos já referidos. Estes podem ser encontrados na tabela seguinte - tabela 3.1.

Tabela 3.1: Parâmetros que descrevem uma onda simples. Adaptado de Cardoso 2017.

Parâmetro	Descrição
$H$ (m)	Altura da onda
$T$ (s)	Período
$L$ (m)	Comprimento de onda
$d$ (m)	Profundidade
$a$ (m)	Amplitude
$\theta$ (rad)	Fase
$k$ (rad/s)	Número de onda
$\omega$ (rad/s)	Frequência angular
$C$ (m/s)	Celeridade

Observando a figura 3.2, é possível definir o ponto mais alto da onda, tal como o seu ponto mais baixo, denominados de crista e cava, respetivamente. A distância entre estes pontos é conhecida como altura de onda,  $H$ . De forma análoga, a amplitude de onda,  $a$ , é definida pela diferença entre a altura da cava, ou da crista, e a superfície livre da água não perturbada, que no caso de ondas regulares, é metade da altura de onda:  $a = \frac{H}{2}$ . O

mesmo não acontece com as ondas não lineares.

O período,  $T$ , pode ser definido pelo intervalo de tempo entre duas cristas – ou cavas – sucessivas, num determinado ponto, e a distância horizontal entre esses mesmos pontos é o comprimento de onda,  $L$ .

A tabela 3.2 apresenta as expressões de algumas características:

Tabela 3.2: Características da onda.

Fase	$\theta = kx - \omega t$
Frequência angular	$\omega = \frac{2\pi}{T}$
Número de onda	$k = \frac{2\pi}{L}$
Celeridade da onda	$C = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{k}$
Declive	$\epsilon = \frac{H}{L}$

A superfície livre,  $\eta$ , que se pode observar na figura 3.2, é definida em função dos parâmetros já mencionados:  $\eta(x, t)$  ou por  $\eta(\theta)$ .

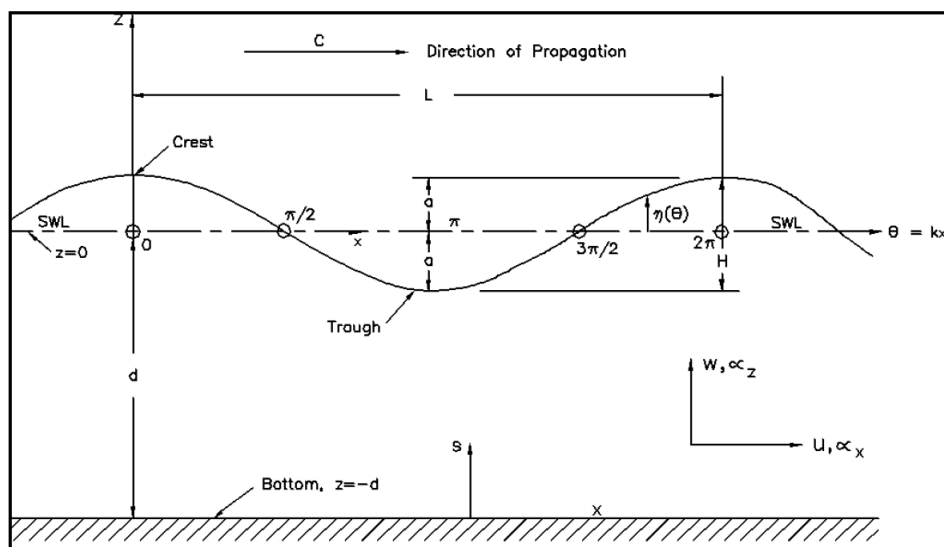


Figura 3.2: Representação de uma onda simples progressiva. Adaptado de Demirbilek e Vincent 2008.

### 3.2.2 Teoria Linear das Ondas

Proposta por G.Airy (1801-1892), a *Teoria Linear* é uma teoria de aplicabilidade acessível, ao mesmo tempo que apresenta resultados bastante viáveis acerca das características das

ondas para um espectro variado das mesmas. Devido à sua facilidade de utilização e à obtenção de bons resultados, esta teoria é bastante utilizada. Contudo, para se poder aplicar, de modo a obter-se valores fidedignos, é necessário ter em conta alguns pressupostos (Demirbilek e Vincent 2008):

- a) O fluido deve ser homogéneo e incompressível; Massa volúmica,  $\rho$ , constante.
- b) A tensão superficial pode ser desprezada.
- c) O efeito de Coriolis é desprezável.
- d) A pressão na superfície livre é constante e uniforme.
- e) O fluido é ideal ou invíscido.
- f) O escoamento é irrotacional.
- g) O fundo é horizontal, fixo e impermeável.
- h) A amplitude da onda é pequena e a sua forma não varia.
- i) Ondas são bidimensionais.

Tendo em conta os pressupostos acima referidos, é possível manipular algumas simplificações de modo a chegar a modelos matemáticos que representem as características das ondas, tendo como base as equações de Laplace, da continuidade e Bernoulli.

Devido ao sexto (f) ponto, é possível usar a função potencial de velocidade,  $\Phi$ . Esta é uma função escalar, cujo gradiente em qualquer parte do fluido é o vetor velocidade (Fachadas 2012). Assim, é definida a componente da velocidade do fluido na direção horizontal,  $x$ , e na direção vertical,  $z$ , respetivamente, por:

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad , \quad w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (3.1)$$

De realçar que a bidimensionalidade da velocidade se deve à simplificação de o escoamento ser bidimensional.

Sabendo a função potencial de velocidade, é possível definir a função corrente,  $\Psi$ , ortogonal à função potencial – condições de Cauchy-Riemann:

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\partial \Psi}{\partial z} \quad , \quad w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (3.2)$$

Para ser possível descrever o comportamento dos escoamentos de fluidos ideais – fluidos invíscidos e incompressíveis – é necessário recorrer à equação de Laplace. Esta é bastante útil pois para se aplicar a teoria linear, é necessário usar como condições base as propriedades dos fluidos ideais. Assim, tendo as funções  $\Psi$  e  $\Phi$ , é possível confirmar que

estas funções satisfazem a equação de Laplace (bidimensional) em termos de potencial de velocidade.

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.3)$$

Estas funções também satisfazem a equação da continuidade, para um escoamento incompressível e bidimensional (Dean e Dalrymple 1991):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.4)$$

Sendo  $u$  e  $w$  as componentes da velocidade nas direções  $x$  e  $z$ , respetivamente.

Para se resolver a equação de Laplace é necessário aplicar condições de fronteira. Neste tipo de problemas, é estabelecido um volume de controlo, onde tem de haver conservação da massa, em conjunto com condições estabelecidas sobre a fronteira. Na figura 3.3 é possível observar quais as condições de fronteira que são usadas para a dedução da Teoria Linear.

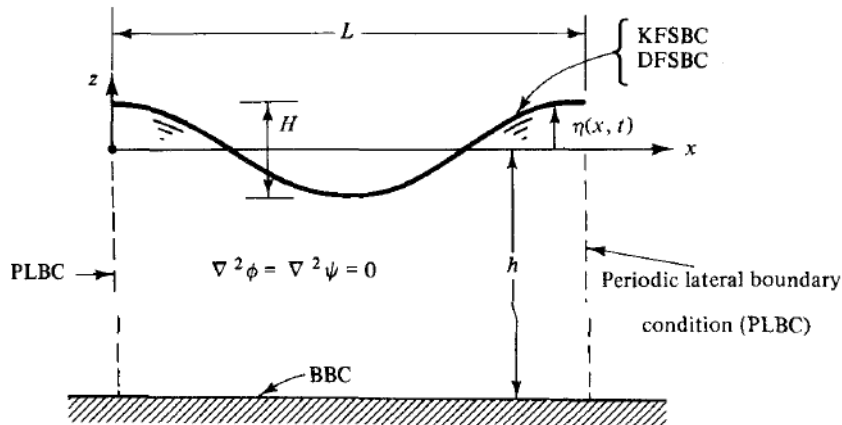


Figura 3.3: Condições de fronteira para ondas regulares. Adaptado de Dean e Dalrymple 1991.

Porém, para o sistema de equações estar completo, é necessário utilizar a equação de Bernoulli, para se obter as propriedades da onda. Para um escoamento potencial não estacionário, a equação de Bernoulli é dada por:

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{P_\eta}{\rho} + g z = 0, \quad \text{para } z = \eta(x, t) \quad (3.5)$$

Onde  $P_\eta$  é a pressão acima da superfície livre, e  $g$  a aceleração da gravidade.

A condição de fronteira dinâmica de superfície livre (DFSBC) descreve a interface água (superfície livre). Esta tem a particularidade de conseguir caracterizar superfícies

que não suportem variações de pressão, mantendo-a constante ao longo de todo o domínio. Assim, é possível assumir que a pressão acima da superfície livre é constante, cancelando deste modo o termo correspondente à mesma na equação de Bernoulli, ficando:

$$-\frac{\partial\Phi}{\partial t} + g_z = 0 \quad (3.6)$$

Simplificações feitas, é possível relacionar o deslocamento da superfície livre,  $\eta$ , com  $\Phi$ , em ordem ao tempo. A condição de fronteira cinemática de superfície livre (KFSBC), também é aplicada à interface ar-água. O facto desta interface estar sujeita a deformações devido a variações de pressão, obriga a que as mesmas respeitem a velocidade do fluido. Deste modo, a condição de fronteira é dada por:

$$\frac{\partial\eta}{\partial t} = \frac{\partial\Phi}{\partial z} \quad (3.7)$$

De notar que esta condição assume que a velocidade de uma partícula da superfície livre é igual à velocidade da própria superfície.

Sendo o perfil de onda, na Teoria Linear, uma senoide simples, a elevação da superfície livre é dada por:

$$\eta(x, t) = A \cos(\theta), \text{ onde } A = \frac{H}{2} \text{ e } \theta = kx - \omega t + \psi, \quad (3.8)$$

onde  $\psi$  corresponde ao ângulo de fase inicial.

Aplicando as condições de fronteira e com o auxílio do método de separação de variáveis, é possível resolver a equação de Laplace. Assim, o potencial de velocidade fica:

$$\Phi = \frac{H}{2} \frac{g}{\omega} \frac{\cosh(k)(d+z)}{\cosh(kd)} \sin(\theta) \quad (3.9)$$

Deste modo, torna-se possível obter as componentes da velocidade:

$$u = \frac{\partial\Phi}{\partial x} = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh(k)(d+z)}{\cosh(kd)} \cos(\theta) \quad (3.10)$$

$$w = \frac{\partial\Phi}{\partial z} = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\sinh(k)(d+z)}{\cosh(kd)} \sin(\theta) \quad (3.11)$$

Assim, conclui-se a formulação das hipóteses necessárias para, de acordo com a Teoria Linear, obter os parâmetros das ondas. Desta forma, combinando a solução de potencial de velocidade com a condição cinemática, satisfaz-se a relação linear de dispersão, dada por:

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (3.12)$$

Efetuada manipulações algébricas na expressão acima referida, pode-se exprimir a velocidade de propagação de onda, também denominada de celeridade:

$$C = \frac{L}{T} = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)} \quad (3.13)$$

Manipulando uma segunda vez a expressão, obtém-se uma relação para o comprimento de onda:

$$L = \frac{gT}{\omega} \tanh(kd) \quad (3.14)$$

Caso o leitor queira informação mais detalhada, tanto sobre as condições de fronteira, como sobre as manipulações algébricas anteriormente referidas, pode encontrar o pretendido em Dean e Dalrymple 1991.

Analisando as equações acima mencionadas, nota-se a forte dependência do parâmetro  $kd$ , parâmetro este que se refere à profundidade a que se propagam as ondas. É possível observar tal influência pela variação dos valores da  $\tanh(kd)$ , uma vez que para valores pequenos de  $kd$  este parâmetro aproxima-se do seu valor – de  $kd$  – e para valores elevados do mesmo, o valor de  $\tanh(kd)$  aproxima-se da unidade.

Na tabela 3.3 encontra-se a classificação das ondas consoante a profundidade a que se propagam.

Tabela 3.3: Caracterização das ondas consoante a profundidade a que se propagam. Adaptada de Demirbilek e Vincent 2008.

<b>Tipo de Onda</b>	<b>D/L</b>	<b><math>\tanh(kd)</math></b>	
Profundidade Infinita	1/2 a $\infty$	$\simeq 1$	Características independentes da profundidade
Profundidade intermédia	1/20 a 1/2	$\tanh(kd)$	Características dependentes da profundidade
Baixa Profundidade	0 a 1/20	$\simeq 1$	Velocidade de propagação depende da profundidade

Como dito anteriormente, as teorias têm algumas falhas. No caso da Teoria Linear, esta apresenta bons resultados para ondas de pequena amplitude, ou infinitesimais. No entanto, quando se pretende estudar a agitação marítima, nomeadamente ondas de grande amplitude ou a aproximação de ondas à orla costeira, esta apresenta falhas na representação destes fenómenos. Desta forma, tornou-se necessário desenvolver novas teorias que consigam descrever de forma correta os mesmos – Teoria das Ondas não Linear (Demirbilek e Vincent 2008).



### 3.2.3 Teoria das Ondas não Linear

Até ao momento, a Teoria Linear mostrou descrever bem as ondas de baixa amplitude, respeitando as condições de fronteira já mencionadas – condições de fronteira cinemáticas e dinâmicas. Contudo, características como a aproximação à orla costeira e a diferença de amplitude entre a crista e a cava mostram que esta teoria não é a mais indicada, uma vez que apresenta falhas.

Assim surgiu a necessidade de desenvolver teorias de ordem superior, tais como a Teoria de Stokes, de Cnoidal e ondas solitárias, que conseguem descrever também o fenómeno do transporte de massa – movimento da água na direção de propagação da onda, denominado como deriva de *Stokes*. Fatores como a profundidade do local onde se propagam as ondas, a altura e o período, influenciam a escolha da teoria a ser adotada. O estudo da dependência destes fatores, consoante o domínio de aplicabilidade de cada teoria de ordem superior, foi desenvolvido por Le Méhauté (1976). O gráfico da figura 3.4 resulta do mesmo.

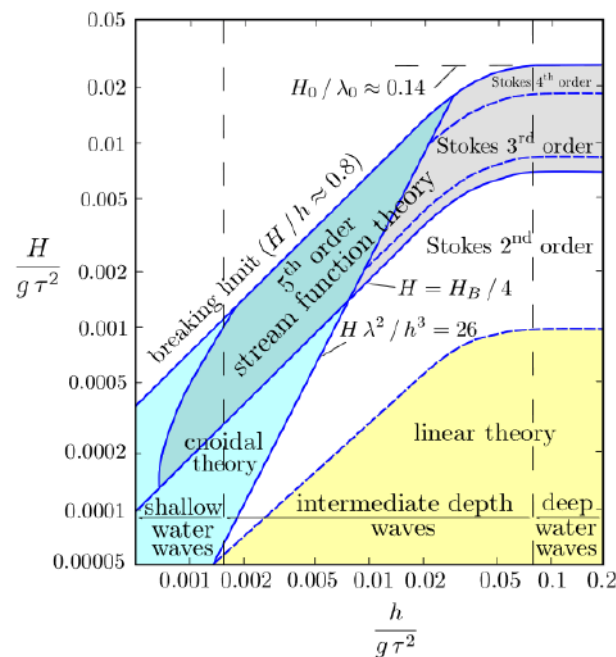


Figura 3.4: Teoria de Ondas por Le Méhauté. Adaptado de Le Méhauté 1976.

Desta forma, a escolha da teoria a ser utilizada, segundo as condições a serem estudadas, encontra-se facilitada. Durante esta dissertação, a teoria que será abordada será a teoria de Stokes de segunda ordem.

Através de uma expansão de potências, pelo método de perturbações, a teoria de Stokes é uma extensão da Teoria Linear a ordens superiores, onde nas suas formas mais complexas pode ir até à quinta ordem. A primeira ordem desta teoria é idêntica à teoria linear de *Airy*.

Assim, a variável:

$$\varepsilon = ka \quad (3.15)$$

é denominada como parâmetro de perturbação.

Deste modo, a expansão é dada por:

$$\Phi = \Phi_0 + \varepsilon\Phi_1 + \varepsilon^2\Phi_2 + \dots \quad (3.16)$$

Como se pode constatar, o termo  $\Phi_0$  não depende de  $\varepsilon$ , sendo este termo a solução linear. Segundo Dean e Dalrymple 1991, deve-se adimensionalizar as equações inerentes a esta teoria para ser possível proceder à sua resolução. Assim, obtém-se a seguinte elevação da superfície livre e as componentes da velocidade de uma onda *Stokes* de segunda ordem, respetivamente:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(\theta) + k \frac{H^2}{4} \frac{3 - \sigma^2}{4\sigma^3} \cos(2\theta) \quad (3.17)$$

$$u = \frac{H}{2} \omega \frac{\cosh(kz)}{\sinh(kd)} \cos(\theta) + \frac{3}{4} \frac{H^2 \omega k \cosh(2kz)}{4 \sinh^4(kd)} \cos(2\theta) \quad (3.18)$$

$$w = \frac{H}{2} \omega \frac{\sinh(kz)}{\sinh(kd)} \sin(\theta) + \frac{3}{4} \frac{H^2 \omega k \sinh(2kz)}{4 \sinh^4(kd)} \sin(2\theta) \quad (3.19)$$

onde  $H$  representa a altura de onda de primeira ordem ( $H = 2a$ ),  $\theta$  a fase ( $\theta = kx - \omega t + \phi$ ) e  $\sigma = \tanh(kd)$ . Nas teorias de ordem mais elevada de *Stokes*, surgem componentes harmónicas de ordens superiores. Estas harmónicas, ao sobrepor-se à componente fundamental prevista pela teoria linear, tornam a crista da onda mais longa e a cava mais curta, não esquecendo que passa a haver transporte de massa, devido à diferença de velocidade entre as mesmas (Dean e Dalrymple 1991).

## MODELO NUMÉRICO

Muitas vezes, para se estudar os fenómenos de interação das ondas com a orla costeira, é necessário recorrer a métodos experimentais – canais e tanques de ondas. Visto que dimensionar tais experiências à escala real se torna ineficiente, uma vez que os custos e o domínio de projeto são de grande ordem, opta-se por produzir modelos à escala, onde é necessário ter em conta o efeito da mesma, pois tais modelos podem falhar na reprodução dos fenómenos pretendidos (Marques 2015). Assim, tornou-se necessário encontrar métodos mais eficientes que permitissem a obtenção de resultados com menores custos associados à produção dos modelos físicos, e respetivos tanques/canais, mas também um método que fosse eficiente à escala real.

Com esta necessidade de novos métodos, e, paralelamente, o aumento da capacidade computacional, surgiu a Dinâmica dos Fluídos Computacional – *Computer Fluid Dynamics* (CFD). A CFD é uma área científica que abrange vários âmbitos da engenharia, desde aerodinâmica, combustão, até engenharia marítima. Esta distingue-se por permitir simular cenários variados e estudar os fenómenos (e respetivos efeitos) do problema em questão. Assim, obtém-se uma análise mais detalhada, garantindo soluções mais fiáveis, evitando o gasto de recursos económicos despendidos na elaboração de soluções menos precisas (Versteeg e Malalasekera 2007).

Ao longo deste capítulo são apresentadas as ferramentas computacionais que foram necessárias para o desenvolvimento da simulação numérica desta dissertação, bem como a descrição dos esquemas numéricos e dos algoritmos de resolução a utilizar.

### 4.1 Ferramentas e *Software*

Na presente dissertação foram utilizados *softwares* preferencialmente gratuitos e *open-source*. Foi utilizado o OpenFOAM-v1712, e usou-se como suporte o sistema operativo

Ubuntu 16.04 LTS. O computador utilizado para correr as simulações apresenta como características um processador Intel®Core™ i7-5820K @ 3.3GHz × 12 com 32GB de RAM.

#### 4.1.1 OpenFOAM

O OpenFOAM – *Open Field Operation and Manipulation* – é um *software* que permite solucionar problemas do meio contínuo, inclusive problemas da mecânica dos fluidos computacional. Criado pela *OpenFOAM Foundation*, distingue-se dos restantes *softwares* semelhantes por ser um código aberto – *open-source* –, sendo distribuído gratuitamente sob os termos da *General Public License* (GPL) (Foundation 2019).

Uma vez que o código base do *software* se baseia num aglomerado de bibliotecas em linguagem C++, torna possível ao utilizador manipular o código base do mesmo. Estas bibliotecas permitem criar executáveis, denominados de aplicações, que são responsáveis por executar tarefas de pré e pós processamento. Estes dividem-se em dois ramos: *solvers*, que consistem num conjunto de códigos e ferramentas criados para resolver problemas específicos da mecânica de meios contínuos, e *utilities*, responsáveis por executar tarefas de pré e pós processamento – criação de malha, definição de sondas, análise de resultados, entre outros. A figura 4.1 mostra a estrutura do *software* OpenFOAM.

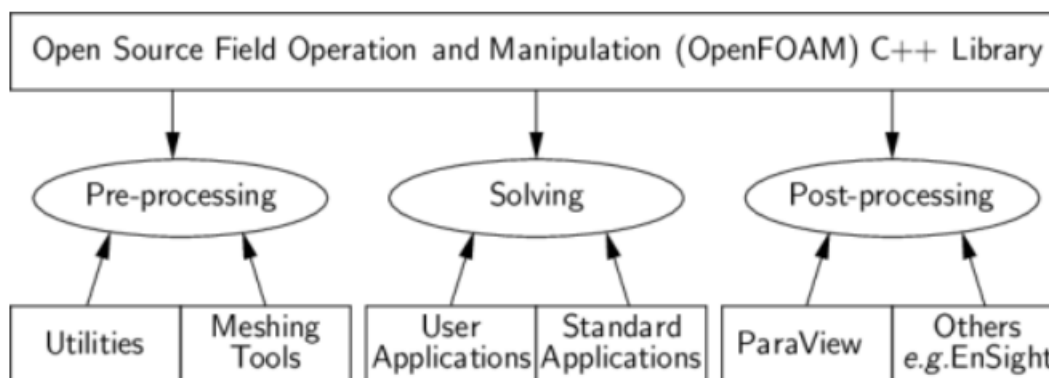


Figura 4.1: Estrutura do OpenFOAM.

O OpenFOAM não apresenta interface gráfica, por isso tem de se recorrer a pacotes externos para ser possível fazer o pós-processamento. Como se pode observar na figura 4.1, o *Paraview* é um desses pacotes. Este permite a visualização dos resultados de uma forma mais interativa, com recurso a uma interface gráfica. Outro caso é o *GnuPlot*, que permite compilar os resultados capturados pelas sondas. Este *software* está organizado numa estrutura modular, onde os ficheiros se encontram separados em diretorias e subdiretorias específicas. É aqui, nas diretorias, que se encontram os ficheiros que se podem manipular por forma ao utilizador conseguir implementar as condições de simulação desejadas, desde as condições de fronteira, condições iniciais de escoamento, malha e parâmetros de simulação. Estes ficheiros, posteriormente, são executados pelos *solvers* e pelas *utilities*, por forma a originar a simulação pretendida.

Os ficheiros, dentro da diretoria geral do caso, estão dispostos em três subdiretorias diferentes:

- “*Time*”: Usualmente denominada como “0”, esta subdiretoria contém ficheiros com informação acerca das condições de fronteira e condições iniciais para cada parâmetro de simulação, tais como a velocidade, pressão, entre outros.

- “*Constant*”: Nesta subdiretoria encontra-se informação sobre as propriedades do meio que se pretende estudar, tais como as propriedades do fluido e parâmetros do modelo de turbulência, e numa diretoria secundária – “*polyMesh*” – pode-se encontrar informação sobre a malha. No caso de se utilizar ficheiros STL (ficheiros criados e importados para o OpenFOAM) para auxiliar na modelação da geometria que se pretende estudar, também é numa diretoria secundária que se podem encontrar – “*triSurface*”.

- “*System*”: Onde se localiza a informação dos parâmetros de simulação, esquemas numéricos e algoritmos de resolução. No anexo A pode-se observar um esquema da estrutura de um caso pronto a simular pelo *software* OpenFOAM, sendo este um dos casos que será abordado posteriormente nesta dissertação.

#### 4.1.1.1 Geração de malha

O próprio OpenFOAM traz consigo ferramentas de geração de malha – *blockMesh* e *snappyHexMesh*. Também é possível gerar a malha utilizando outros *softwares*, tais como ANSYS, *Gmsh* e *Gambit*, importando posteriormente para o OpenFOAM.

Tanto o domínio da simulação, como a malha criada para o estudo desta dissertação foram produzidas utilizando unicamente *utilities* do OpenFOAM: o *blockMesh* e *snappyHexMesh*.

O princípio de funcionamento do *blockMesh* parte da decomposição da geometria do domínio em estudo em um ou mais blocos tridimensionais hexaédricos, onde as arestas podem ser linhas retas, arcos ou splines. Após a modelação da geometria, é produzida a malha, através do número de células e da taxa de expansão das mesmas – função *simpleGrading* – em cada direção do bloco. De notar que quanto maior o número de divisões que se pretende em cada bloco, maior o número de células e, conseqüentemente, a simulação demorará mais tempo. A geração da malha é criada através do ficheiro “*blockMeshDict*”, que se pode encontrar dentro da subdiretoria *system* (Anexo A) (OpenFOAM 2019).

O *utility snappyHexMesh* serve para gerar malhas tridimensionais, formadas por hexaedros ou hexaedros repartidos, a partir de geometrias superficiais compostas por triângulos, podendo ser no formato *Wavefront Object* (OBJ) ou *Stereolithography* (STL) (Cardoso 2017). Este *utility* encontra-se dividido em 3 partes: *CastellatedMesh*, *Snap* e *AddLayers*. Inicialmente, a malha conforma-se com a superfície, refinando iterativamente uma malha inicial. No caso de a malha não estar suficientemente boa, ou a própria geometria ter perdido informação – devido à falta de células – é possível definir vários níveis de refinamento em zonas especificadas. Esta informação está guardada no ficheiro “*snappyHexMeshDict*” (Anexo A).

Para ser possível a utilização do *snappyHexMesh*, são necessários os ficheiros STL/OJB com a geometria e as fronteiras do domínio que se pretende estudar. Para tal, é necessário recorrer a ferramentas CAD. No presente caso de estudo, foi utilizado o programa *SolidWorks*. Como mencionado anteriormente, os ficheiros STL/OJB estão na sub-diretoria “*triSurface*” (Anexo A) e são chamados através do ficheiro “*snappyHexMeshDict*”. Estando esta geometria importada, é necessária uma malha base produzida pelo próprio programa (OpenFOAM) que define a extensão do domínio computacional e o nível base da densidade da malha.

Uma vez que se pretende usar apenas funcionalidades do *software* OpenFOAM, e a própria geometria apresenta algumas particularidades, foi usado o *blockMesh* para produzir tanto a geometria como a malha, e o *snappyHexMesh* utilizado para delimitar as mesmas.

#### 4.1.1.2 Objetos Função

O OpenFOAM disponibiliza ao utilizador funcionalidades que podem ser executadas no decorrer das simulações, funcionalidades essas que são denominadas de objetos função – *Function Objects*. Estas, através da subdiretoria “*controlDict*” atuam para cada passo de tempo.

Na presente dissertação, a *function object* utilizada foi a função *probes*. Esta permite a obtenção de diversos parâmetros num local a definir pelo utilizador, e ainda pode ser fixo ou móvel. A função *probes* é bastante importante em estudos sobre ondas, uma vez que consegue captar a localização da superfície livre da água no decorrer da simulação. Assim, definindo o posicionamento de linhas (sondas) divididas em  $n$  segmentos (arbitrado pelo usuário), é atribuído ao respetivo segmento um determinado valor, por forma a distinguir o tipo de fase presente: 0 para ar e 1 para água.

#### 4.1.1.3 Pós-processamento

Quanto à análise e processamento de resultados, estes podem ser executados através de ferramentas inerentes ao OpenFOAM, ou utilizar *softwares* externos ao mesmo. Para este caso de estudo, recorreu-se aos *softwares* *Paraview* e *Gnuplot* para o tratamento e visualização dos resultados. O *Gnuplot* é um programa de elaboração de gráficos através de uma linha de comando, podendo ser executado a partir de um terminal ou chamado por outro programa. O *Paraview* é um *software open-source*, e permite a visualização gráfica dos dados. Desta forma, a análise dos mesmos pode ser feita interactivamente em 3D por parte do utilizador, ou recorrendo à programação (ParaView 2019).

Como explicado anteriormente no presente capítulo, os resultados a serem estudados são obtidos a partir dos objetos função – função *probes*. Estes, antes de qualquer tipo de análise, são compilados a partir de um *script* em linguagem *Python*.

O *Python* é uma linguagem de programação de alto nível, orientada a objetos, que apresenta a vantagem de ser de sintaxe concisa e clara, para além de ser *open-source*.

O *script* já mencionado – “*postSensVOF.py*” – foi utilizado com o intuito de compilar os valores obtidos pelas sondas que foram estrategicamente colocadas ao longo do domínio em estudo, por forma a ser possível entender a evolução da interface ar-água, através da fração de volume de fluido em cada célula. A cada sonda, é efetuado um integral de Riemann da fração de volume ao longo da altura para cada instante de tempo, armazenando, por sonda, um ficheiro que contém a posição da superfície livre no decorrer do tempo (Cardoso 2017).

## 4.2 Modelação matemática e numérica

O comportamento dos fluidos, como já explicado no capítulo anterior, é regido por equações diferenciais às derivadas parciais, também denominadas de EDP. Para resolver as mesmas, é necessário discretizar o domínio em estudo. Este processo pode ser feito de diversos métodos, entre os quais o Método dos Volumes Finitos (MVF), o Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método das Diferenças Finitas (MDF). No caso do OpenFOAM, é utilizado o MVF.

Para aplicar o método MVF, o primeiro passo passa por decompor o domínio computacional em várias células – volumes de controlo. Os volumes de controlo são caracterizados pelo seu centróide, uma vez que é aí que se encontram guardados os valores das variáveis e das constantes. As equações que regem o escoamento estão inseridas em todas as células do domínio, de modo a obter o valor das variáveis nos centros das mesmas, enquanto que o valor das variáveis nas faces é interpolado a partir dos centróides.

### 4.2.1 Equações RANS

São 3 as equações que regem o escoamento de um fluido: equação da conservação da massa, conservação da quantidade de movimento e da energia. Quando respeitadas as condições inerentes a estas equações, as equações de Navier-Stokes conseguem descrever o comportamento de escoamentos tridimensionais, newtonianos e incompressíveis (Versteeg e Malalasekera 2007).

As equações de Navier-Stokes descrevem bem escoamentos laminares. O mesmo não acontece para escoamentos turbulentos. Uma vez que a maior parte dos casos de estudo sobre agitação marítima apresenta características turbulentas, foram desenvolvidas as equações RANS – *Reynolds Averaged Navier Stokes equations* – para ser possível aplicar as equações de Navier-Stokes a escoamentos turbulentos.

Sendo o vetor velocidade dado por  $U = (u, v, w)$ , a equação que representa a lei da conservação da massa para um dado Volume de Controlo (VC) num caso tridimensional incompressível ( $\rho$  constante) é, na sua forma vetorial:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (4.1)$$

onde  $\nabla$  representa o divergente. A equação 4.1 também pode ser apresentada na notação de Einstein:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.2)$$

Procedendo de forma análoga, a lei da conservação do momento ou da quantidade de movimento (em notação de Einstein) é dada por:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p \delta_{ij}}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (4.3)$$

onde  $g$  representa a aceleração da gravidade,  $\delta$  o Delta de Kronecker ( $\delta_{ij}=1$  se  $i=j$  e  $\delta_{ij}=0$  se  $i \neq j$ ) e  $\mu$  a viscosidade dinâmica.

O número de Reynolds controla o regime do escoamento, sendo este adimensional e é calculado pela razão entre as forças de inércia e as viscosas. Assim, o número de Reynolds é definido por:

$$Re = \frac{\rho U L}{\mu} \quad (4.4)$$

onde  $U$  representa o módulo da velocidade e  $L$  um comprimento característico dependente da geometria e do escoamento.

Ao contrário de um regime laminar, um regime turbulento apresenta características como um estado de movimento caótico, irregular e imprevisível. Estas propriedades são a razão pela qual há libertação de vórtices com diferentes tamanhos, que por sua vez causam uma taxa de dissipação de energia rápida. Havendo um estado caótico, as propriedades do escoamento variam de forma imprevisível ao longo do tempo, tais como a velocidade e a pressão. Tal imprevisibilidade pode ser observada na figura 4.2, referente à velocidade.

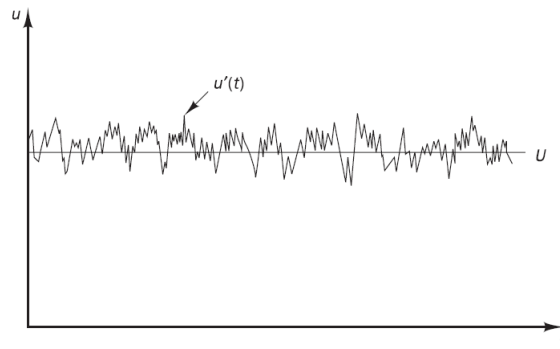


Figura 4.2: Medição pontual típica da velocidade num escoamento turbulento. Adaptado de Versteeg e Malalasekera 2007.



Com esta natureza imprevisível do escoamento surge a necessidade de utilizar uma nova maneira de representar as propriedades do mesmo. Para isso é utilizada uma metodologia denominada decomposição de Reynolds, que permite obter expressões matemáticas que descrevem o comportamento do escoamento do fluido, já tendo em conta os efeitos da turbulência. Essas expressões são substituídas posteriormente nas equações de Navier-Stokes, dando assim origem às equações RANS.

A decomposição de Reynolds, como o nome indica, decompõe uma propriedade do escoamento nas suas componentes média e flutuação, onde para qualquer propriedade instantânea do fluido definida por  $a$ , fica representada por  $a(t) = \bar{a} + a'(t)$ , sendo  $\bar{a}$  a média temporal e  $a'$  a flutuação relativa à propriedade.

Assim, aplicando este novo método à equação da conservação da massa, observa-se que esta não se altera, uma vez que a média da flutuação da velocidade é nula:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{x_i} = 0 \quad (4.5)$$

Para se aplicar a decomposição de Reynolds à equação da conservação do momento, deve ter-se em conta um termo que depende das flutuações, pois:

$$u_i u_j = (\bar{u}_i + u'_i)(\bar{u}_j + u'_j) = \overline{(\bar{u}_i \bar{u}_j)} + \overline{(\bar{u}_i u'_j)} + \overline{(u'_i \bar{u}_j)} + \overline{(u'_i u'_j)} = \bar{u}_i \bar{u}_j + \overline{u'_i u'_j} \quad (4.6)$$

Assim, ao introduzir a decomposição de Reynolds na equação da quantidade de movimento, obtém-se:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial \rho \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (4.7)$$

O novo termo -  $\rho \overline{u'_i u'_j}$  - depende das flutuações de velocidade ( $u'_i$ ), sendo por isso considerado como uma contribuição da turbulência. Para se resolver os termos das flutuações é necessário recorrer a modelos de turbulência, uma vez que as equações RANS não permitem a sua resolução. Deste modo, manipulando a equação anterior tendo em conta o termo turbulento:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (4.8)$$

Do lado direito encontram-se as tensões de Reynolds, sendo que estas correspondem às tensões turbulentas adicionais à componente da velocidade.

As tensões de Reynolds adicionam 6 incógnitas às equações que provêm dos modelos de turbulência, completando assim o sistema de equações do escoamento médio. Existem diversos modelos de turbulência e geralmente são classificados consoante o número adicional de equações de transporte necessárias resolver paralelamente às equações RANS.

Uma vez que a turbulência desempenha um papel importante na dissipação de energia, é comum a utilização de uma viscosidade adicional, dada por:

$$\overline{u'_i u'_j} = -\nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (4.9)$$

A viscosidade turbulenta (equação 4.9) é adicionada à viscosidade molecular, dando origem à viscosidade efetiva, onde  $\mu_{eff} = \mu + \rho\nu_t = \mu + \nu_t$ .

Desta forma, a equação de momento passa a:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] + F_i \quad (4.10)$$

onde  $F_i$  corresponde à ação de fontes externas (Higuera 2015).

#### 4.2.2 Modelos de Turbulência

A escolha do modelo de turbulência a utilizar está diretamente ligado à resolução dos resultados e ao esforço computacional inerente ao caso de estudo, logo, com o tempo de simulação. Uma vez que o tempo é uma variável que limita bastante os casos de estudo em engenharia, quando se escolhe um modelo de turbulência, deve-se ter em conta a qualidade dos resultados que se pretende e a capacidade computacional que está disponível. Existem diversas formas de integrar os modelos de turbulência, num estudo numérico, usando e resolvendo, as equações de Navier-Stokes:

- *Direct Numerical Simulation* (DNS) - É a técnica mais rigorosa, que resolve diretamente as equações RANS. Contudo, para tal ser possível, esta implica a utilização de uma malha com elementos bastante refinados, por forma a conseguir calcular os vórtices turbulentos de menor escala.
- *Large Eddy Simulation* (LES) - Esta técnica resolve as equações RANS para maiores escalas de turbulência, enquanto os pequenos vórtices turbulentos são modelados, não sendo necessário a utilização de uma malha bastante refinada.
- *Detached Eddy Simulation* (DES) - É uma junção das últimas duas técnicas referidas, uma vez que recorre à técnica LES quando a malha é refinada o suficiente, e para regiões de menor escala de turbulência, recorre a modelos RANS. Nestes, a turbulência é apenas modelada (Versteeg e Malalasekera 2007).

O modelo de turbulência *k - ε standard* - aplicado às RANS - é um modelo utilizado para escoamentos com gradientes de pressão relativamente pequenos, ou para escoamentos onde prevaleçam as tensões de corte de Reynolds (Cardoso 2017). Este não apresenta bons resultados quando utilizado para escoamentos com gradientes de pressão adversos, em zonas de grande curvatura de parede ou mesmo em zonas de separação de escoamento.

O modelo usa uma equação de transporte para modelar a energia cinética turbulenta,  $k$ , dada por:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U \cdot \nabla k - \nabla \cdot (D_k \nabla k) + \beta_k k = F_k \quad (4.11)$$

e uma equação para a taxa de dissipação de energia,  $\epsilon$ :

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U \cdot \nabla \epsilon - \nabla \cdot (D_\epsilon \nabla \epsilon) + \beta_\epsilon k = F_\epsilon \quad (4.12)$$

A tabela 4.1 mostra as expressões intermédias usadas pelo modelo de turbulência  $k - \epsilon$ . Nesta pode-se verificar a existência de vários coeficientes:  $D_k$  e  $D_\epsilon$  são coeficientes de difusão,  $\beta_k$  e  $\beta_\epsilon$  coeficientes de dissipação e  $F_k$  e  $F_\epsilon$  são termos fonte, que incluem o tensor da taxa de deformações,  $S$ :

$$S = \left[ \frac{\nabla U + (\nabla U)^t}{2} \right] \quad (4.13)$$

Tabela 4.1: Expressões intermédias para o modelo de turbulência  $k - \epsilon$ . Adaptado de Higuera 2015

Coeficientes	Expressões Intermédias
Coeficientes de Difusão	$D_k = \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k}$ $D_\epsilon = \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon}$
Coeficientes de Dissipação	$\beta_k = \frac{\epsilon}{k}$ $\beta_\epsilon = C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon}{k}$
Termos Fonte	$F_k = 2\nu_t S^2$ $F_\epsilon = 2C_{\epsilon 1} \nu_t \frac{\epsilon}{k} S^2$

Ainda nesta tabela, é possível observar que as equações de transporte para  $k$  e  $\epsilon$  contêm cinco constantes derivadas empiricamente. Para o caso do modelo  $k - \epsilon$  *standard*, as constantes apresentam os valores que se encontram na tabela 4.2 (Higuera 2015, Versteeg e Malalasekera 2007).

Tabela 4.2: Coeficientes do modelo de turbulência  $k - \epsilon$ .

Modelo	$C_\mu$	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$
$k - \epsilon$	0.09	1.44	1.92	1.00	1.30

### 4.2.3 Método VOF

Um sistema multifásico representa uma coexistência entre dois ou mais fluidos no mesmo domínio. No caso de os mesmos serem imiscíveis, forma-se uma superfície livre na região que separa ambos.

Existem diversos métodos para modelar uma superfície livre, mas para o presente caso de estudo, o método utilizado foi o VOF – *Volume of Fluid* (Hirt e Nichols 1981) – de modo a poder-se estimar a quantidade de fluido em cada célula. O uso deste método exige a utilização de uma equação de transporte adicional para determinar a fração de volume de fluido para cada célula do domínio. Uma vez que para a maioria das aplicações da engenharia costeira, e para o presente caso também, estão presentes principalmente ar e água, só é necessário a utilização de um indicador de fase,  $\alpha$ , para definir a quantidade de água por unidade de volume em cada célula. Assim:

$$x = \begin{cases} \alpha = 1, & \text{água} \\ 0 < \alpha < 1, & \text{interface ar-água} \\ \alpha = 0, & \text{ar} \end{cases} \quad (4.14)$$

O cálculo, em cada célula, de qualquer propriedade de um fluido passa por uma ponderação com base na fração de volume de fluido. Posto isto, assumindo que  $a$  representa uma qualquer propriedade do fluido:

$$\phi = \alpha a_{agua} + (1 - \alpha) a_{ar} \quad (4.15)$$

onde  $a_{agua}$  representa a propriedade  $a$  da água e  $a_{ar}$  à mesma propriedade, mas referente ao ar.

O movimento das fases é descrito por uma equação de advecção, dada por:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha U) = 0 \quad (4.16)$$

sendo  $U$  a velocidade do fluido.

De notar que esta equação apresenta algumas restrições. Em termos de resultados, os mesmos devem ser limitados entre 0 e 1, e a interface deve ser o mais fina possível, pois em líquidos reais a interface representa uma descontinuidade (Higuera 2015). O método VOF distingue-se pela sua fácil aplicabilidade, mesmo para configurações (de superfície livre) complexas.

#### 4.2.4 Equações que descrevem o escoamento

##### 4.2.4.1 *interFoam*

O *interFoam* é um *solver* que já está incluído no OpenFOAM. É utilizado para escoamentos multifásicos, não estacionários e incompressíveis. Resolve as equações RANS tridimensionais em malha estática. Estas são as expressões matemáticas que correlacionam a velocidade e a pressão. Assim, a equação da conservação da quantidade de movimento e a equação de advecção, respetivamente, sofrem algumas alterações (Higuera et al. 2013):

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) = -\nabla p^* - g \cdot X \nabla \rho + \nabla U \cdot \nabla \mu_{eff} + \sigma \kappa \nabla \alpha \quad (4.17)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot U \alpha + \nabla \cdot U_c \alpha (1 - \alpha) = 0 \quad (4.18)$$

onde  $U$  é o vetor de velocidade,  $\rho$  a massa volúmica,  $p^*$  a pressão pseudo-dinâmica (ou pressão modificada, sendo  $p^* = p - \rho g h$ ),  $X$  o vetor de posição,  $g$  a aceleração da gravidade e por último,  $U_c$  a velocidade de compressão.

O último termo da equação 4.17 representa o efeito da tensão superficial, onde  $\sigma$  é o coeficiente da tensão superficial e  $\kappa$  a curvatura da interface, dada por:

$$\kappa = \nabla \cdot \frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \quad (4.19)$$

e  $\alpha$  é o indicador de fase.

A viscosidade dinâmica efetiva,  $\mu_{eff}$ , que tem em conta os efeitos turbulentos e a viscosidade dinâmica molecular, é obtida da seguinte expressão:

$$\mu_{eff} = \mu + \rho \nu_t \quad (4.20)$$

onde  $\nu_t$  representa a viscosidade turbulenta escolhida pelo modelo de turbulência.

A equação 4.18 deriva da equação da superfície livre obtida de acordo com o modelo VOF (Higuera et al. 2013).

##### 4.2.4.2 *olaFlow*

Antigo IHFOAM, o *olaFlow* é um *solver* que pode ser importado pelo *software* OpenFOAM, por forma a ampliar a sua biblioteca, aumentando assim o tipo de resoluções que pode utilizar, em termos de simulação dinâmica das ondas.

Este *solver* funciona com base no *solver interFoam*, logo é um *solver* multifásico e distingue-se deste por implementar novas condições de fronteira, quer na geração de onda, quer na absorção ativa das mesmas. Também implementa novas condições de fronteira na captação da superfície livre em escoamentos sobre zonas porosas.

O `olaFlow`, tal como o `interFoam`, resolve as equações RANS, mas difere quando as condições de simulação apresentam porosidade, pois o *solver* adapta-se, e passa a resolver as equações VARANS - *Volume Averaged Reynolds Averaged Navier-Stokes*.

Na presente dissertação, será utilizado o *solver* `olaFlow`, e como as simulações não têm em consideração o fundo poroso, este *solver* apenas irá recorrer às equações RANS. No caso de o leitor querer mais informações acerca das equações VARANS, é sugerido a leitura de Higuera 2015.

### 4.2.5 Algoritmos de Resolução

Devido à dependência entre a pressão e a velocidade que é demonstrada pela resolução das equações RANS discretizadas, tornou-se notório a necessidade dos *solvers* dos *softwares* de CFD resolverem tal problema, recorrendo desta forma a algoritmos. Estes são processos iterativos que permitem combinar as equações de conservação do momento e da massa, resolvendo as equações para a pressão e velocidade. Para tal, os algoritmos têm como base previsões iniciais de soluções e as suas sucessivas correções (Versteeg e Malalasekera 2007).

No presente estudo, o algoritmo de resolução usado é o PIMPLE, sendo este uma combinação de outros dois algoritmos: SIMPLE – *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked equations* (Patankar 2018) e PISO – *Pressure Implicit with Splitting of Operators* (Issa 1982). Em termos de estrutura, o PIMPLE e o PISO são idênticos, contudo o algoritmo PIMPLE permite fatores de relaxamento, de modo a assegurar a convergência de todas as equações a cada passo de tempo.

Na figura 4.3 está um fluxograma que representa o algoritmo PIMPLE. Como se pode observar, existem vários ciclos, sendo o ciclo a sombreado o principal, enquanto os restantes representam o subciclo Alfa – *AlphaSubCycle* – e o ciclo PIMPLE. Estes são realizados externamente ao ciclo principal.

O subciclo Alfa é o responsável por solucionar a equação da fração de volume de fluido, isto é, que faz o cálculo da superfície livre do escoamento.

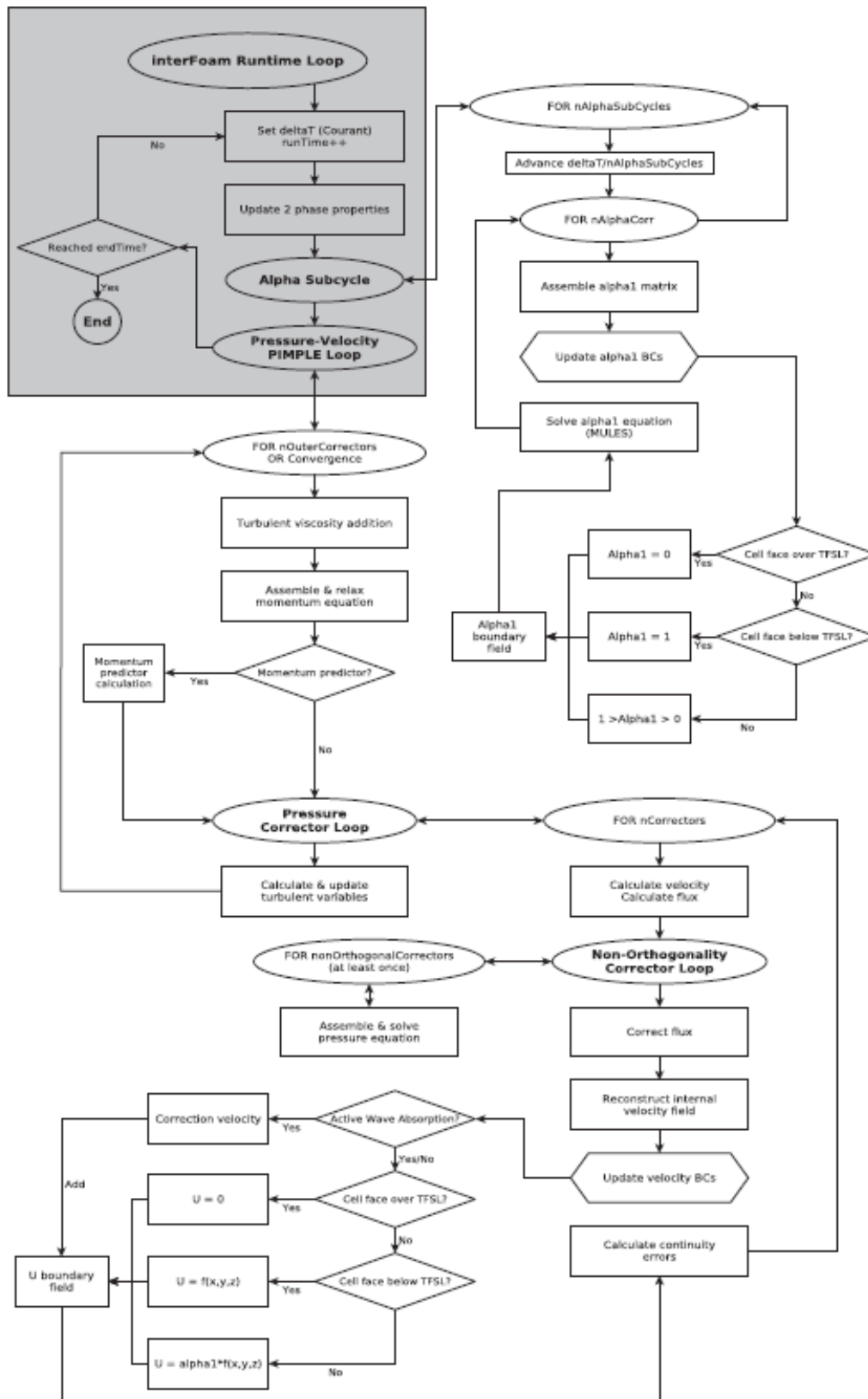


Figura 4.3: Fluxograma representativo do algoritmo PIMPLE, aplicado no interFoam (solver do OpenFOAM em que o IHFOAM se baseia). Adaptado de Higuera et al. 2013.

Dentro do algoritmo são definidos (pelo utilizador) seis parâmetros de controlo:

- *nCorrectors*: Parâmetro que define o número de vezes que o algoritmo resolve a equação de pressão e a correção do momento em cada passo de tempo.
- *nNonOrthogonalCorrectors*: Este corrige os resultados de malhas não ortogonais, de modo a melhorar a convergência.
- *nOuterCorrectors*: Responsável por definir o número de vezes que o sistema é resolvido por cada passo de tempo. Regra geral, quando se quer usar o algoritmo PISO, atribui-se a este parâmetro o valor de 1, pelo que no caso de se querer utilizar o PIMPLE, será necessário um valor superior a 1.
- *momentumPredictor*: Controla se cada passo de tempo se inicia (ou não) pela resolução da equação do momento, sendo este utilizado (nesta dissertação) como não ativo.
- *nAlphaSubCycles*: Este controla o número de vezes que a equação de transporte do método VOF é resolvida em cada passo de tempo.
- *nAlphacorr*: Especifica o número de correções a executar na equação do método VOF a cada iteração.

Estes são os parâmetros que permitem definir o algoritmo e a quantidade de iterações a realizar em cada *loop*. As simulações que foram utilizadas para o desenvolvimento desta dissertação adotaram os valores presentes na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Parâmetros de controlo do algoritmo PIMPLE.

Parâmetros	Valor
<i>nCorrectors</i>	3
<i>nNonOrthogonalCorrectors</i>	0
<i>momentumPredictor</i>	Não
<i>nAlphaSubCycles</i>	2
<i>nAlphacorr</i>	1

Os processos iterativos realizados no algoritmo têm como função a resolução de sistemas de equações discretizadas (Cardoso 2017). O *solver*, para resolver cada um destes sistemas, recorre a métodos numéricos de resolução de sistemas de equações lineares (*linear-solvers*). De notar que *solver* e *linear-solver* não são o mesmo: um *solver* é um conjunto de equações e algoritmos que são responsáveis por resolver problemas específicos.

Os *linear-solvers* consistem em processos iterativos, que se baseiam na redução dos resíduos das equações no decorrer das soluções. Os resíduos são uma medição do erro da solução, isto é, quanto menores forem os erros, mais precisa será a solução. O cálculo dos resíduos passa por substituir a solução obtida na expressão e calcular a diferença entre ambos os lados da equação, sendo este um processo normalizado, de modo a tornar os resultados adimensionais (Cardoso 2017).



Mas, antes de ser executado este processo, os resíduos iniciais são avaliados, com base nos valores atuais do campo. Após cada iteração o valor dos resíduos é reavaliado, parando a resolução do *linear-solver* apenas quando:

- Os resíduos caírem abaixo do valor de tolerância;
- Ou o rácio entre resíduo atual e inicial cair abaixo da tolerância relativa;
- Ou o número de iterações exceder o número máximo.

Esta tolerância serve como um nível de resíduo, a partir do qual a solução pode ser considerada suficientemente precisa. A tolerância relativa restringe a evolução relativa da solução inicial para a final, a cada iteração. Em problemas não estacionários – como é o caso desta dissertação – é geralmente utilizado o valor 0 para a tolerância relativa, por forma a forçar a solução a convergir a cada passo de tempo (OpenFOAM 2019).

Na tabela 4.4 estão representados os *linear-solvers* utilizados nas simulações do presente caso de estudo. Uma vez que o olaFlow traz consigo tutoriais (e é o *solver* que vai ser utilizado), a escolha destes valores foi baseada nos mesmos, uma vez que os parâmetros já se encontram otimizados para cada caso de estudo. Neste dissertação recorreu-se ao tutorial *waveFlume*, que resolve as ondas com a lei de Stokes II.

Tabela 4.4: Linear-solvers (escolhidos no olaFlow) utilizados pelo OpenFOAM ao longo da presente dissertação.

$p\text{-rgh}$	<b>Linear-Solver</b> <i>Preconditioned Conjugate Gradient (PCG)</i>	<b>Pré-conditioner</b> <i>Diagonal Incomplete-Cholesky (DIC)</i>	<b>Tolerance</b> $1 \times 10^{-7}$	<b>Rel. Tolerance</b> 0.05
$\mathbf{u}$	<b>Linear-Solver</b> <i>smoothSolver</i>	<b>smoother</b> <i>symGaussSeidel</i>	<b>Tolerance</b> $1 \times 10^{-6}$	<b>Rel. Tolerance</b> 0
$\kappa, \epsilon$	<b>Linear-Solver</b> <i>smoothSolver</i>	<b>smoother</b> <i>symGaussSeidel</i>	<b>Tolerance</b> $1 \times 10^{-8}$	<b>Rel. Tolerance</b> 0

#### 4.2.6 Esquemas numéricos e de interpolação

Para serem aplicados os algoritmos de resolução, as equações que regem o escoamento são previamente discretizadas para cada volume de controlo. Para tal, consoante a categoria que se enquadram os diferentes termos das equações, são utilizados esquemas numéricos de discretização. Assim, o OpenFOAM categoriza os esquemas numéricos da seguinte forma:

- *interpolationSchemes*: Interpolação de valores ponto a ponto;

- *snGradSchemes*: Componente do gradiente normal à face de uma célula;
- *gradSchemes*: Gradiente ( $\nabla$ );
- *divSchemes*: Divergência ( $\nabla \cdot$ );
- *laplacianSchemes*: Laplaciano ( $\nabla^2$ );
- *timeSchemes*: primeira e segunda derivadas temporais ( $-\partial/\partial t$  e  $\partial^2/\partial^2 t$ ).

Além dos esquemas numéricos, o utilizador também necessita de definir os esquemas de interpolação. Estes permitem a obtenção dos valores do centro das faces das células a partir da interpolação dos valores do centro dos elementos. A definição dos mesmos, e dos esquemas numéricos, é feita no ficheiro *fvSchemes*, que está na diretoria *system* do caso de estudo.

Os esquemas numéricos e de interpolação utilizados ao longo da presente dissertação estão apresentados na tabela 4.5. Estes, tal como os *linear-solvers*, foram escolhidos com base nos tutoriais inerentes ao *olaFlow*, e neste caso de estudo, foi utilizado o tutorial *waveFlume*, uma vez que este tutorial tem como base a otimização de parâmetros para casos semelhantes ao presente. De notar que os termos estão escritos por extenso para não induzir o leitor a erro de interpretação.

Tabela 4.5: Esquemas numéricos e respetivos esquemas de interpolação utilizados no OpenFOAM.

<i>ddtSchemes</i> (derivada temporal $\partial/\partial t$ )			
Termo	Discretização	Descrição do esquema	
Default	Euler	Primeira ordem, limitado, implícito	
<i>gradSchemes</i> (termos gradiente $\nabla$ )			
Termo	Discretização	Interpolação	Descrição do esquema
Default	Gauss	Linear	Segunda ordem, interpolação linear

<i>divSchemes</i> (termos divergente $\nabla \cdot$ ou <i>div</i> )			
Termo	Discretização	Interpolação	Descrição do esquema
div(rhoPhi,U) div((rhoPhi interpolate (porosity)),U) div(rhoPhiPor,UPor) div(rhoPhi,UPor) div(rhoPhiPor,U)	Gauss	limitedLinearV 1	Primeira ordem, limitado
div(U) div((muEff*dev(T (grad(U))))))	Gauss	linear	Segunda ordem, interpolação linear
div(phi,alpha)	Gauss	vanLeer	Primeira ordem, limitado
div(phirb,alpha)	Gauss	interfaceCompression	Primeira ordem, limitado
div(phi,k) div(phi,epsilon) div((phi interpolate (porosity)),k) div((phi interpolate (porosity)),epsilon) div(phi,omega) div((phi interpolate (porosity)),omega)	Gauss	upwind	Primeira ordem, limitado
<i>laplacianSchemes</i> (laplaciano $\nabla^2$ )			
Termo	Discretização	Interpolação	Descrição do esquema
Default	Gauss	linear corrected	Segunda ordem, não limitado, conservativo
<i>interpolationSchemes</i> (Componente do gradiente normal à face de uma célula)			
Termo	Discretização	Descrição do esquema	
Default	Linear	Interpolação linear	
<i>snGradSchemes</i> (Componente do gradiente normal à face de uma célula)			
Termo	Discretização	Descrição do esquema	
Default	Corrected	Segunda ordem, não limitado, conservativo, correção não ortogonal	



## CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICA E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### 5.1 Modelação da Central de Mutriku

Como já referido, uma vez que o modelo geométrico criado em Fachadas 2012, para além de representar a central de Mutriku, utiliza uma inclinação do fundo do mar idêntica à pretendida. Assim, o modelo geométrico utilizado no presente caso de estudo tem como base o criado em Fachadas 2012 (figura 5.1).

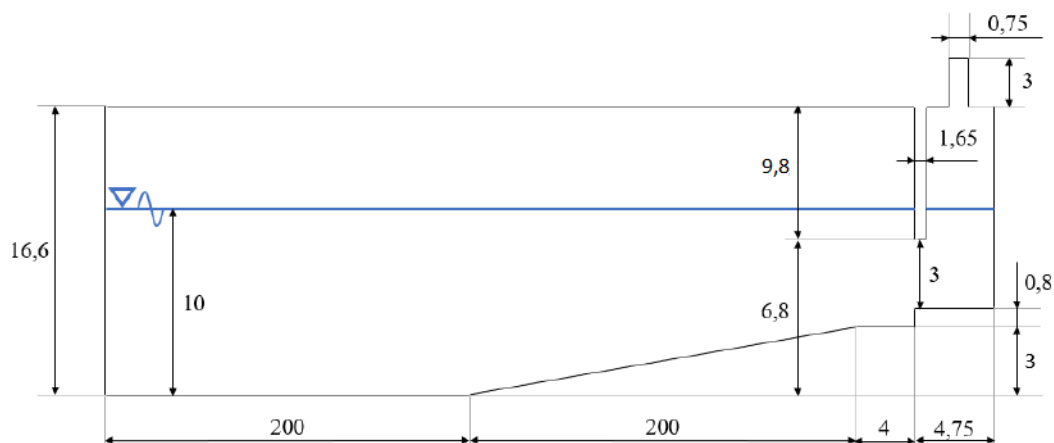


Figura 5.1: Representação, não à escala, do modelo geométrico pretendido (geometria 2).

Inicialmente, para criar o modelo geométrico, foi utilizado o *utility blockMesh*. Uma vez que este funciona a partir da decomposição da geometria do domínio em estudo em vários blocos, é possível criar a mesma geometria de várias maneiras diferentes. Contudo, existem várias características que não são mencionadas nos tutoriais do OpenFOAM, levando a que nem todas as decomposições funcionem posteriormente em simulações.

Assim, foi necessário identificar como funciona na realidade o *blockMesh* e construir a melhor decomposição do domínio em estudo. Exemplo disso são as figuras 5.2 e 5.3, sendo estas decomposições que posteriormente, durante a simulação, impediram a propagação da onda, mesmo não existindo nenhuma razão evidente para tal.

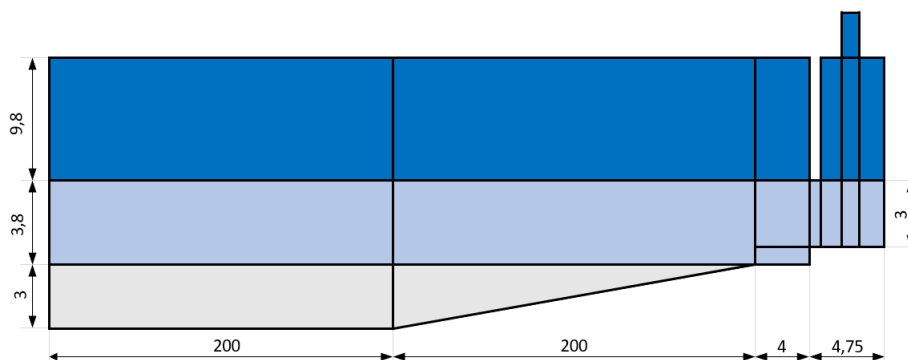


Figura 5.2: Primeira tentativa da modelação da Central.

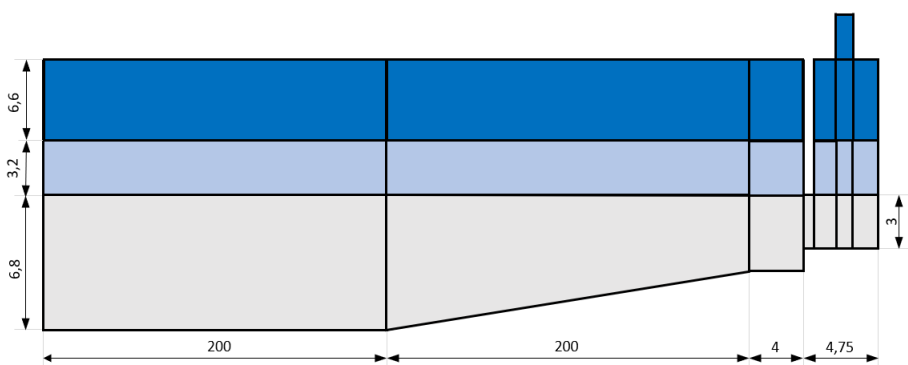


Figura 5.3: Uma das diversas tentativas da modelação da Central.

Assim, foi necessário recorrer a outro *utility* do OpenFOAM: *snappyHexMesh*.

O *snappyHexMesh* é um *add-in* do OpenFOAM e apresenta uma grande vantagem face ao *blockMesh*: permite importar geometrias superficiais de outros programas em formato OBJ ou STL, permitindo usá-las como domínio do caso de estudo ou delimitar a geometria criada no *blockMesh*. A junção destes dois *utilities* permitiu a criação do modelo geométrico, do domínio computacional e da malha.

## 5.1.1 Criação do Domínio Computacional

### 5.1.1.1 *blockMeshDict*

Dentro da subdiretoria *system* estão vários ficheiros, entre eles o ficheiro "*blockMeshDict*". É neste que o utilizador pode fazer alterações quanto à geometria em estudo e respetiva

malha. Para tal, é de destacar alguns parâmetros que ajudam na alteração das mesmas: *vertices*, *blocks* e *boundary*.

No parâmetro *vertices*, são colocadas as coordenadas de todos os vértices da geometria a ser modelada, de modo a ficar sempre um domínio fechado e que permita a criação de blocos. Teve-se o cuidado de colocar a cota  $Z=0$  m coincidente com a linha de superfície livre da água, de modo a ser mais fácil analisar os resultados.

Para criar os blocos, recorre-se ao parâmetro *blocks*. Neste, é possível criar várias formas geométricas, mas no presente estudo apenas foram utilizados paralelepípedos, usando a funcionalidade *hex*. Para usar esta funcionalidade é necessário indicar quais são os vértices que irão formar o bloco, não esquecendo a regra da mão direita, por forma a indicar o “sentido” ao programa OpenFOAM. De notar que é bastante importante usar esta regra, uma vez que mal atribuída a orientação dos blocos, o *utility blockMesh* não funciona. Estando o modelo de bloco e os vértices escolhidos, é necessário definir em quantas vezes se irá dividir os blocos, por forma a criar células. Este fator é crucial para o estudo, uma vez que a má atribuição do número de divisões por eixo pode originar uma malha que não capte bem a propagação da onda, ou então, no caso de serem criadas demasiadas células, a simulação irá demorar demasiado tempo, não sendo eficiente. Posteriormente, pode ser definida a taxa de expansão das células, usando a funcionalidade *simpleGrading*. Na figura 5.4 pode-se observar os valores atribuídos neste caso de estudo, por forma a tentar obter o modelo geométrico mostrado na figura 5.1.

```
blocks
(
  hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (925 1 300) simpleGrading (0.008 1 1)
  hex (4 5 6 7 8 9 10 11) (925 1 100) simpleGrading (0.008 1 1)
  hex (8 9 10 11 12 13 14 15) (925 1 300) simpleGrading (0.008 1 1)
  hex (1 16 19 2 5 20 23 6) (90 1 300) simpleGrading (10 1 1)
  hex (5 20 23 6 9 24 27 10) (90 1 100) simpleGrading (10 1 1)
  hex (16 17 18 19 20 21 22 23) (100 1 300) simpleGrading (1 1 1)
  hex (20 21 22 23 24 25 26 27) (100 1 100) simpleGrading (1 1 1)
  hex (24 25 26 27 28 29 30 31) (100 1 300) simpleGrading (1 1 1)
  hex (28 29 30 31 32 33 34 35) (100 1 300) simpleGrading (1 1 1)
);
```

Figura 5.4: Parâmetro *blocks* do ficheiro "*blockMeshDict*".

Por fim, no parâmetro *boundary* definem-se as fronteiras do domínio, associando assim a cada face – externa – dos blocos um tipo de condição de fronteira. Neste estudo foram usadas as condições *patch* para definir a entrada, para o topo da conduta da turbina e para o topo da geometria antes da CAO, e *wall* para simular os obstáculos. Mais uma vez será necessário ter atenção à regra da mão direita, devendo haver sempre coerência com o vértice por onde se começa.

Segundo Higuera 2015, a definição considerada aconselhável para garantir bons resultados são de 10 células/H e 100 células/L. Assim, quando se proceder à simulação, ver-se-á se a malha satisfaz tal fator. De notar que na figura 5.4 a coordenada Y apenas

apresenta uma célula. Facto este pois é pretendido uma malha bidimensional, e foi necessário rodar a geometria uma vez que o tutorial base apresenta o parâmetro aceleração da gravidade,  $g$ , alinhado com a coordenada Z e não com Y.

A figura 5.5 procura mostrar o resultado final após a alteração dos parâmetros que se encontraram dentro do ficheiro "*blockMeshDict*", e a tabela 5.1 apresenta o número de células definidas em cada bloco. De notar que na tabela 5.1 não há informação sobre a coordenada Y. Isto acontece devido ao facto de o valor ser sempre  $-1$ , uma vez que a malha pretendida é bidimensional.

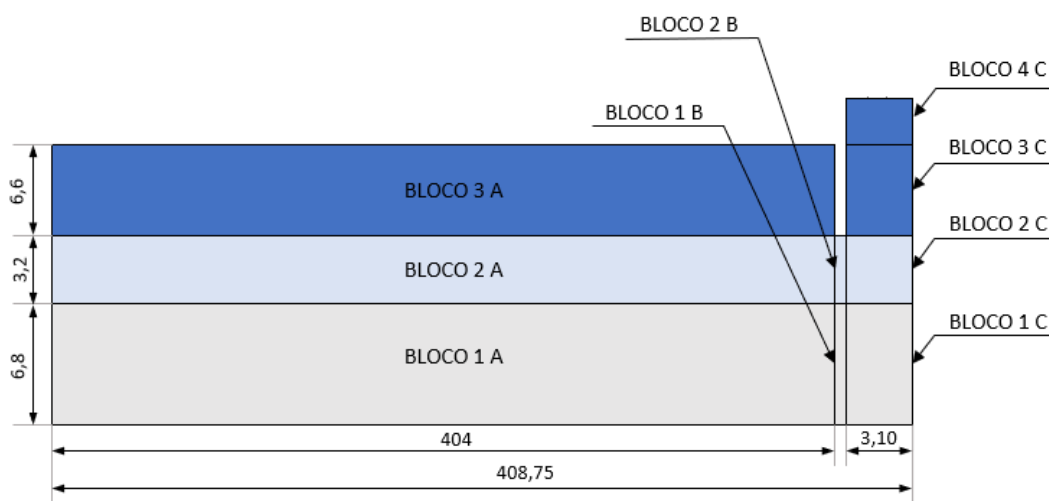


Figura 5.5: Representação, não à escala, da geometria criada pelo *utility blockMesh*.

Como é possível observar, o modelo geométrico apresentado na figura 5.5 não tem ainda o fundo nem a parede frontal da CAO, bem como a conduta da turbina (figura 5.1). Estes elementos serão produzidos recorrendo a outro *utility*, o *snappyHexMesh*.



Tabela 5.1: Características da malha utilizada para criar a geometria.

	<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
<b>Bloco 1 A</b>	$N_x$	925
	$N_z$	300
	$\Delta x_{inicial} - \Delta x_{final}$	2,122 - 0,017
	$\Delta z_{inicial} - \Delta z_{final}$	0,0226 - 0,0226
<b>Bloco 2 A</b>	$N_x$	925
	$N_z$	100
	$\Delta x_{inicial} - \Delta x_{final}$	2,122 - 0,017
	$\Delta z_{inicial} - \Delta z_{final}$	0,032 - 0,032
<b>Bloco 3 A</b>	$N_x$	925
	$N_z$	300
	$\Delta x_{inicial} - \Delta x_{final}$	2,122 - 0,017
	$\Delta z_{inicial} - \Delta z_{final}$	0,022 - 0,022
<b>Bloco 1 B</b>	$N_x$	90
	$N_z$	300
	$\Delta x_{inicial} - \Delta x_{final}$	0,0047 - 0,047
	$\Delta z_{inicial} - \Delta z_{final}$	0,0226 - 0,0226
<b>Bloco 2 B</b>	$N_x$	90
	$N_z$	100
	$\Delta x_{inicial} - \Delta x_{final}$	0,0047 - 0,047
	$\Delta z_{inicial} - \Delta z_{final}$	0,032 - 0,032
<b>Bloco 1 C</b>	$N_x$	100
	$N_z$	300
	$\Delta x_{inicial} - \Delta x_{final}$	0,031 - 0,031
	$\Delta z_{inicial} - \Delta z_{final}$	0,0226 - 0,0226
<b>Bloco 2 C</b>	$N_x$	100
	$N_z$	100
	$\Delta x_{inicial} - \Delta x_{final}$	0,031 - 0,031
	$\Delta z_{inicial} - \Delta z_{final}$	0,032 - 0,032
<b>Bloco 3 C</b>	$N_x$	100
	$N_z$	300
	$\Delta x_{inicial} - \Delta x_{final}$	0,031 - 0,031
	$\Delta z_{inicial} - \Delta z_{final}$	0,022 - 0,022
<b>Bloco 4 C</b>	$N_x$	100
	$N_z$	300
	$\Delta x_{inicial} - \Delta x_{final}$	0,031 - 0,031
	$\Delta z_{inicial} - \Delta z_{final}$	0,01 - 0,01

5.1.1.2 *snappyHexMesh*

Para terminar a geometria, foram produzidos três ficheiros no formato STL: *rampa.stl*, *parede.stl* e *turbina.stl* (figura 5.6).

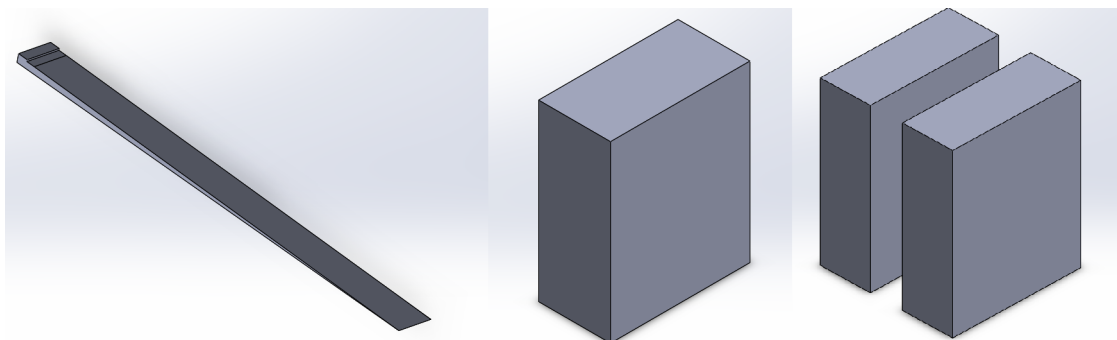


Figura 5.6: Figura à esquerda: *rampa.stl*. No meio: *parede.stl*. À direita: *turbina.stl*.

De notar que as geometrias criadas na ferramenta CAD *SolidWorks* são tridimensionais. Tal constitui uma vantagem pois o *utility snappyHexMesh* apenas cria malhas tridimensionais. No entanto, para o caso de estudo presente, é pretendido usar uma malha bidimensional. Assim, é necessário criar o modelo geométrico com uma malha tridimensional, e, posteriormente, manipular os parâmetros do *olaFlow* por forma a que simule e capte os resultados a partir de uma malha bidimensional.

Para poder executar o *snappyHexMesh* precisa-se de utilizar dois ficheiros: “*surfaceFeatureExtractDict*” e “*snappyHexMeshDict*”, que se encontram na subdiretoria *system*.

Com o ficheiro “*surfaceFeatureExtractDict*” é importado para o programa *OpenFOAM* os ficheiros STL pretendidos, neste caso os últimos três apresentados. Após importados, com o ficheiro “*snappyHexMeshDict*” é possível criar uma malha que torna os ficheiros importados aptos a serem manipulados. Para tal é necessário mexer em alguns parâmetros: *geometry* e *castellatedMesh*.

No parâmetro *geometry* identifica-se quais os ficheiros STL que entram na geometria, e define-se, para as faces importadas, o tipo de malha que se pretende usar. Nesta dissertação o tipo de malha utilizado foi o *triSurfaceMesh*. Neste parâmetro ainda é possível refinar a malha num local específico do domínio, o qual não foi usado no presente estudo.

Uma das funcionalidades que destaca o parâmetro *castellatedMesh* é o utilizador poder escolher qual a geometria que quer que obtenha malha. Neste caso o *locationInMesh* foi (1 0.5 5.25), por forma a ter a certeza que a geometria que irá pertencer ao domínio seja a criada pelo *blockMesh*, sendo que os ficheiros STL apenas delimitam a mesma. Tal pode ser observado na figura 5.7.

No presente estudo, apenas os parâmetros *castellatedMesh* e *snap* estão ativos, estando o parâmetro *addLayers* inativo.

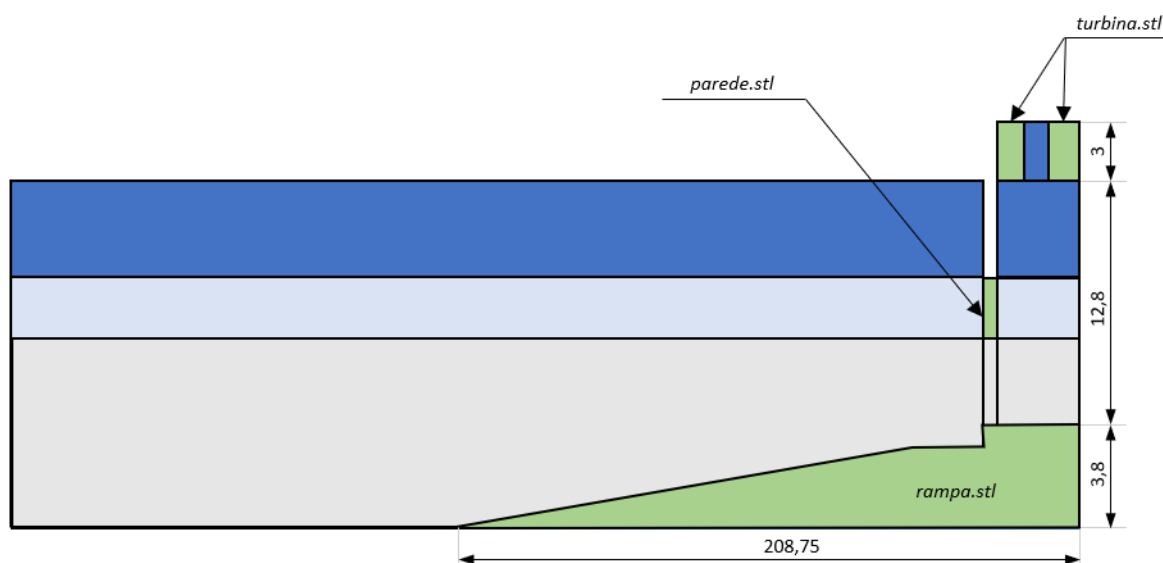


Figura 5.7: Representação, não à escala, da modelação do modelo geométrico, usando os dois *utilities*.

Assim, estando tanto o ficheiro “*blockMeshDict*” como os ficheiros associados ao *snappyHexMesh* alterados para o caso em estudo, é necessário executar o programa.

A figura 5.8 mostra uma representação em pormenor da malha perto, e no interior, da CAO.



Figura 5.8: Representação em pormenor da malha gerada.

Após a análise da malha, notou-se algumas disformidades na mesma. Foram estudados vários métodos para resolver o problema, não chegando à resolução do mesmo, uma

vez que a melhor malha criada ainda apresenta algumas anomalias (figura 5.9). Mesmo assim, uma vez que a geometria foi bem modelada, será usada a mesma nas posteriores simulações, e ao analisar os resultados, será perceptível entender se tal defeito influencia os dados obtidos. De notar que a presente malha apresenta  $7.84 \times 10^5$  elementos.

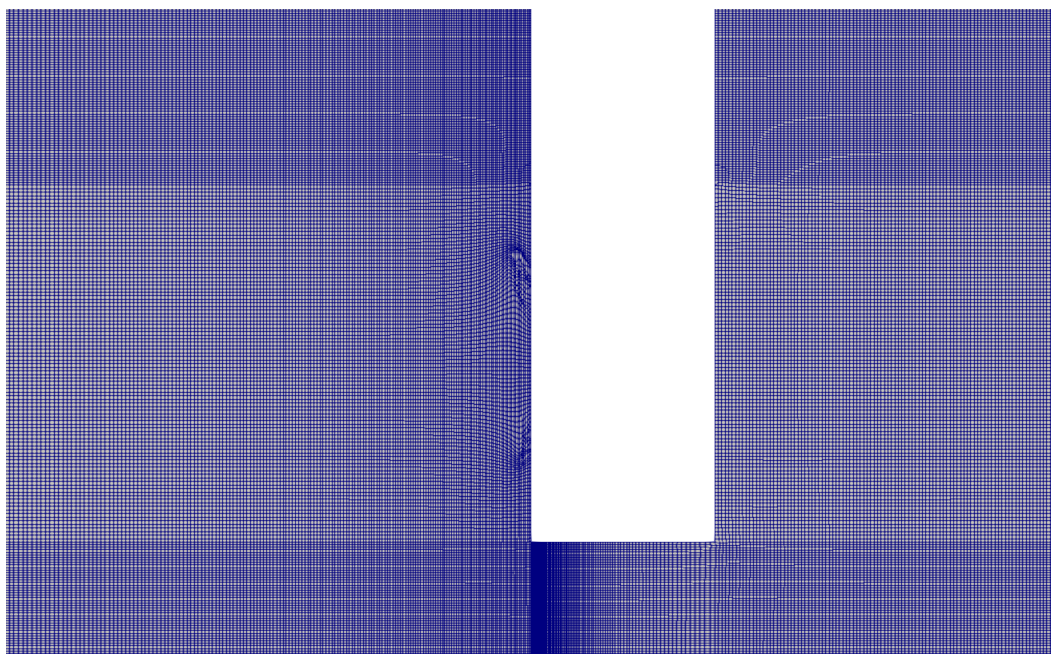


Figura 5.9: Representação em detalhe das anomalias presentes na malha.

### 5.1.2 Modelo Numérico

Ao longo do tempo, o código *OpenFOAM* implementou-se nos estudos, sendo a sua viabilidade testada para uma série de problemas no âmbito da propagação de ondas (Higuera 2015). Uma vez que o programa *OpenFOAM* é *open-source*, este disponibiliza gratuitamente tutoriais que procuram alcançar a maior parte dos *solvers* que podem ser usados no *software*. Para o presente estudo, é de realçar que um dos *solvers* é dedicado a problemas multifásicos, e que correspondem a problemas de propagação de ondas. Existem vários tutoriais que envolvem a propagação das ondas, usando diferentes teorias de geração de ondas, tais como as três teorias de Stokes, Cnoidal e ondas solitárias (Condeço 2018).

A simulação numérica, uma vez que procura retratar a realidade, possui diversos pontos críticos que têm de ser estudados meticulosamente antes de se dar início à simulação efetiva, visto que a má definição da malha ou dos parâmetros de simulação pode originar resultados incorretos e bastante longe da realidade que se pretende estudar. Assim, aconselha-se o uso de um exemplo como base, ou então, como neste caso, um tutorial do *OpenFOAM* que esteja calibrado para apresentar resultados fisicamente credíveis. Com esta prática evita-se tempo a realizar simulações incorretas, e na correção das mesmas.

Para a presente dissertação, foi necessário recorrer a um dos tutoriais do *OpenFOAM* relativo à propagação de ondas. Para tal, primeiro foi necessário identificar o tipo de

onda que se quer estudar. Como já referido, existem diversas teorias resumidas e compiladas por Le Méhauté num gráfico que pretende facilitar a identificação da teoria a que corresponde a onda que se está a estudar (Condeço 2018).

Para testar o modelo numérico criado, este caso de estudo teve como base o artigo de Conde e Condeço 2019. Neste, foram realizados estudos acerca das ondas que se propagam na zona onde está instalada a central de Mutriku. Assim, tal como em Conde e Condeço 2019, foram estudadas três ondas diferentes (tabela 5.2).

Tabela 5.2: Características das ondas a serem simuladas.

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Altura média	0.6 metros
Período	10 segundos
Comprimento de onda	92.4 metros

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Altura média	1.2 metros
Período	10 segundos
Comprimento de onda	92.4 metros

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Altura média	2 metros
Período	10 segundos
Comprimento de onda	92.4 metros

Para ser possível aplicar o estudo feito por Le Méhauté, apenas falta definir a profundidade na zona de geração de onda, que segundo Torre-Enciso et al. 2009, aparenta rondar os 10 metros. Assim, a partir do período, altura de onda e profundidade na zona de geração da mesma, foi identificada a onda mais apropriada, sendo esta de Stokes II (figura 5.10).

Como se pode observar, na figura 5.10a) e 5.10b), o ponto vermelho que identifica a teoria de geração de ondas que se procura estudar indica ondas referentes à teoria de Stokes II. Na figura 5.10c) o ponto vermelho está no limite entre a teoria de Stokes II e Stokes III. Ainda assim, a onda com altura de dois metros foi simulada com a teoria de geração de ondas Stokes II, uma vez que ao encontrar-se no limiar das duas teorias, o *software* consegue adaptar a onda à teoria que se queira utilizar, e neste caso permitindo a comparação de resultados com o artigo Conde e Condeço 2019, visto que todas as ondas geradas foram formuladas a partir da teoria de Stokes II.

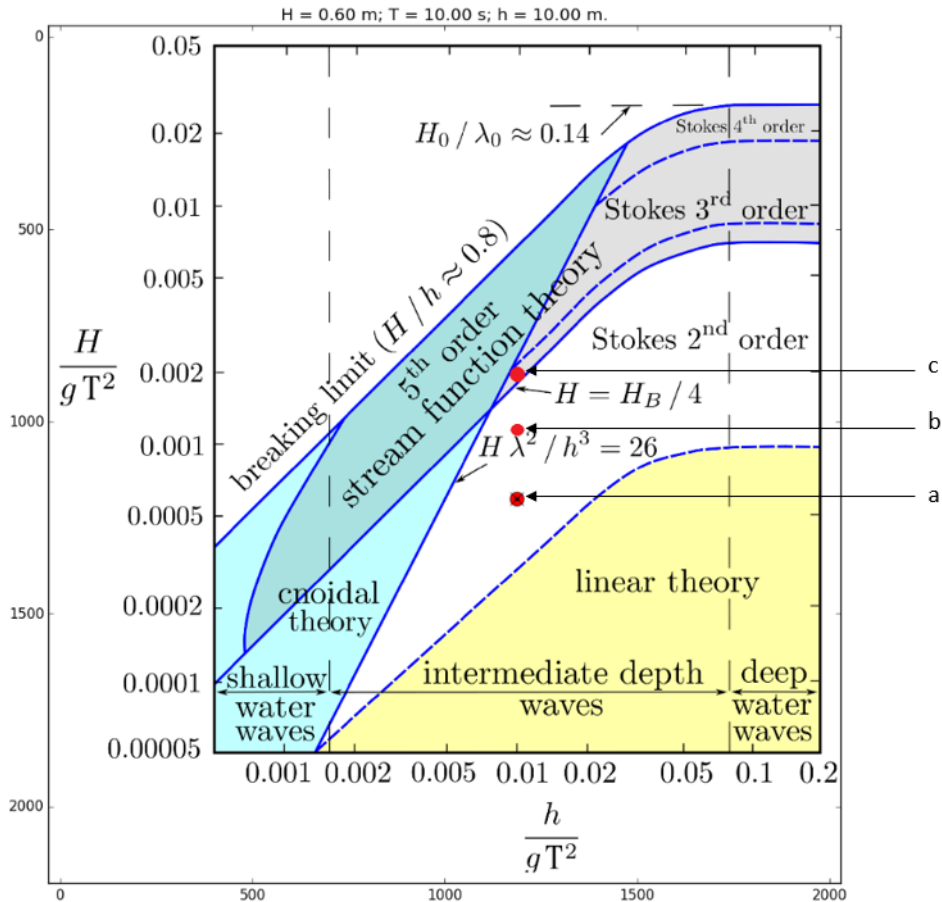


Figura 5.10: Identificação da teoria das ondas: a) 0.6 metros; b) 1.2 metro; c) 2 metros.

### 5.1.2.1 Parâmetros de Simulação

Passando para os parâmetros associados ao controlo temporal da simulação, é necessário ter em conta o número de Courant,  $Co$ , e o passo de tempo, uma vez que estão fortemente ligados entre si, e são um dos fatores que indica se a simulação está a ser bem processada, ou não. O número de Courant refere-se à chamada condição de Courant-Friedrich-Levy (CFL), condição esta que é responsável por assegurar que os resultados obtidos são os corretos. O  $Co$ , em termos de propagação das ondas, garante que o passo de tempo da simulação seja inferior ao tempo que a onda demora a passar de um elemento para o seguinte. Assim, é notória a dependência do passo de tempo com a definição da malha, uma vez que em qualquer ponto do domínio é necessário assegurar tal condição, garantindo desta forma que a simulação consiga processar o que está a ser exigido e que os resultados sejam os mais viáveis possíveis. Para tal é necessário garantir que o  $Co$  seja inferior a 1, sendo calculado com a seguinte fórmula:

$$Co = \frac{u_i \delta t}{c_i} \quad (5.1)$$

onde  $u_i$  representa a componente da velocidade no centro do elemento da malha,  $c_i$  as dimensões dos elementos da malha que se quer estudar, e o respetivo passo de tempo,  $\delta t$ .

Consultando o ficheiro “*controlDict*” que se encontra na subdiretoria *system*, é possível definir o número de Courant e o passo de tempo da simulação. Para ser possível comparar o presente estudo com Conde e Condeço 2019, definiu-se o  $Co$  em 0,25 e acerca do passo de tempo, foi ativada a opção *adjustTimeStep*, tal como em Conde e Condeço 2019, pois permite que a simulação ajuste o passo de tempo à medida que a malha, ou as condições de simulação, se vão tornando mais exigentes, garantindo assim que se cumpra a condição CFL em todo o domínio (Condeço 2018).

### 5.1.2.2 Introdução de um modelo de turbulência

Existem alguns fenómenos que devem ser estudados relativamente ao comportamento da onda no interior da coluna de água oscilante, tais como o fator de amplificação, a fase angular, o *Sloshing* e a potência pneumática.

O fator de amplificação consiste na variação entre a amplitude da onda no interior da CAO e a amplitude da onda incidente. O cálculo deste é uma relação entre a altura de onda incidente,  $H_i$ , e a altura de onda média no interior da CAO,  $H_m$ , chegando desta forma ao seguinte parâmetro adimensional:

$$F_{amp} = \frac{H_m}{H_i} \quad (5.2)$$

Este fator é bastante importante uma vez que é a forma mais direta de quantificar a energia hidráulica útil gerada a partir da onda, pois quanto maior este for, maior será a elevação da superfície livre no interior da coluna de água oscilante, logo, maior será a ação da água sobre o ar que se encontra aprisionado na câmara, levando a um maior impulso exercido na turbina. Com este parâmetro, é possível estudar a eficiência das centrais de um ponto de vista unicamente hidráulico.

A relação da fase de oscilação no interior da câmara com a fase de oscilação da onda imediatamente antes da mesma fica a cargo da fase angular. Com esta, é possível observar a existência de diferentes fases no interior e no exterior da câmara, podendo assim criar um desequilíbrio na ação de forças na parede frontal, aumentando a probabilidade de causar danos estruturais com o passar do tempo (Condeço 2018).

O fenómeno que descreve a elaboração da superfície livre de um fluido quando estrangido num compartimento fechado denomina-se de *Sloshing*. Neste caso, o *Sloshing* consiste numa medida de agitação da superfície livre dentro da CAO. Para tal, é necessário recorrer ao desvio padrão, uma vez que quanto maior for o desvio padrão da amostra de dados em estudo, maior será a agitação no interior da coluna de água oscilante.

Finalmente, a potência pneumática. Este parâmetro permite medir o desempenho energético da CAO, relacionando a pressão com o caudal que entra - e sai - da coluna

(Fachadas 2012).

Uma vez que esta dissertação tem um tempo bastante limitado para o seu estudo, apenas foi possível estudar o parâmetro fator de amplificação.

Analisando o estudo feito em Condeço 2018, existem três zonas críticas na modelação deste modelo geométrico: zona junto à parede da central, zona de entrada na câmara e a interface ar-água no interior da mesma.

É junto da parede da central que se dará a reflexão das ondas, podendo surgir zonas onde exista a ocorrência de vórtices e zonas onde poderá ocorrer a estagnação do fluido - rebentação da onda.

Na entrada para a câmara haverá dois sentidos de escoamento: um no sentido do interior da CAO e outro no sentido oposto a este. Nesta zona também ocorrem vórtices provenientes dos fenómenos que ocorrem junto à parede, tal como a ação do escoamento sobre a extremidade da parede, visto que esta apresenta uma aresta viva, o que irá aumentar a ocorrência dos mesmos. Ao haver escoamento em ambas as direções através do mesmo canal, algumas zonas terão um perfil de velocidade não uniforme. Tal é agravado devido à condição de fronteira bottom, onde a velocidade é definida como nula (Condeço 2018).

É na interface ar-água – dentro do interior da câmara – que se pode verificar o *Sloshing* e fator de amplificação, que são responsáveis por originar zonas onde existe a ação violenta de vórtices. Outro elemento a ter em conta no interior da câmara será o ar, que devido à agitação da fase líquida é comprimido, e em casos de estudo onde a CAO não é totalmente aberta, a compressão da fase gasosa pode originar o movimento complexo da mesma e ocorrerá turbulência (Mendonça et al. 2018).

Assim, após o estudo dos fenómenos que estão envolvidos no presente modelo geométrico, é evidente que o escoamento em causa apresente turbulência, quer na fase líquida, quer na fase gasosa. Posto isto, foi implementado um modelo de turbulência, de modo a ser possível processar tais fenómenos.

A teoria presente nos modelos de turbulência já foi levemente mencionada no capítulo 4. Para este estudo, escolheu-se o modelo *k - ε standard*, por ser o modelo mais utilizado em termos de CFD devido à sua robustez.

Na subdiretoria *constant* é possível definir o modelo de turbulência pretendido, a partir do ficheiro "*turbulenceProperties*". Assim, em vez de laminar, no parâmetro *simulationType*, é colocado *RANS*. Posteriormente ainda é necessário definir dois campos, sendo um deles o próprio modelo de turbulência (*k - ε*) e ativar o mesmo – *on*.

Ao estar definido o modelo de turbulência, é necessário adicionar novas condições de fronteira para cada uma das variáveis que este traz consigo. Assim, na subdiretoria *0* são colocados três novos ficheiros: *k*, *ε* e *nut*. Nestes serão atribuídas as condições de fronteira que irão ser aplicadas a cada elemento do domínio em estudo.



### 5.1.3 Sondas

Para ser possível captar os resultados após a simulação ter terminado, é necessário a utilização de sondas – *probes* – em lugares específicos da geometria, por forma a entender concretamente se a simulação executou o pretendido.

Assim, foram colocadas cinco sondas: uma a 20m à frente do gerador de ondas, outra a 2m da parede externa da central e as restantes dentro da câmara, uma no centro, e as demais a 5cm das paredes. Com estas sondas, para além de ser possível captar os resultados pretendidos, é possível fazer a comparação com o estudo feito em Conde e Condeço 2019, uma vez que as sondas se encontram na mesma posição (figura 5.11).

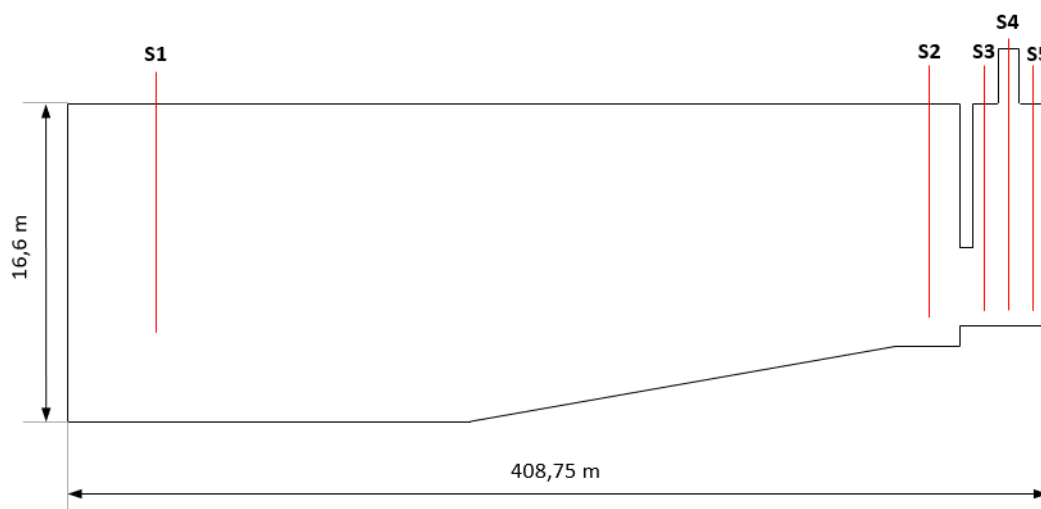


Figura 5.11: Representação, não à escala, da localização das sondas no modelo geométrico.

A tabela 5.3 indica a posição das sondas. De notar que foi necessário ter o cuidado com a colocação das mesmas, uma vez que mal atribuídas, as sondas podem influenciar os resultados, obrigando o estudo retroceder e procurar o erro.

Tabela 5.3: Localização das sondas ao longo do domínio do caso de estudo.

Sonda	Distância ao gerador [m]
S1	20
S2	402
S3	405.7
S4	407.2
S5	408.7

## 5.2 Resultados e Discussão

Como já mencionado, por forma a entender se os resultados obtidos com os parâmetros atribuídos estão corretos, no decorrer deste capítulo será feita uma comparação entre estes e os resultados obtidos em Conde e Condeço 2019.

Neste artigo são estudadas duas geometrias: uma com a câmara pneumática ligada diretamente à atmosfera (figura 5.12) – geometria 1 (CAO aberta) –, e outra com a câmara ligada a um duto onde se simula ser a localização de uma turbina (figura 5.1) – geometria 2 (CAO fechada). Para além desta diferença, na geometria 1 a extensão do fundo tem apenas 100m.

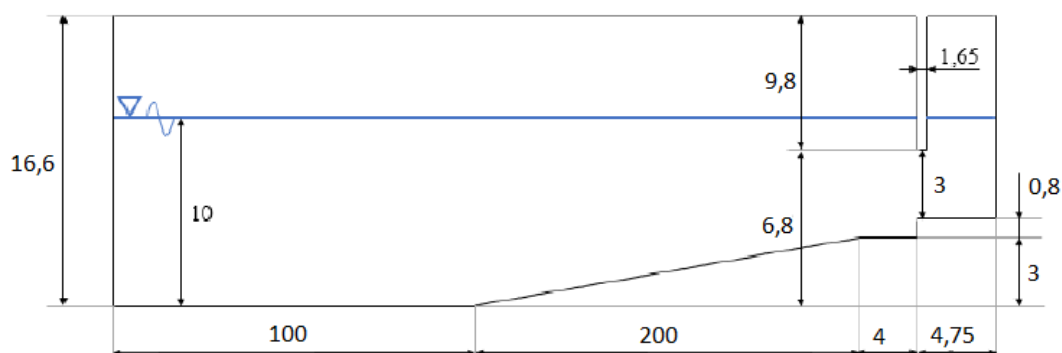


Figura 5.12: Representação, não à escala, da geometria 1 - CAO aberta.

As ondas geradas em Conde e Condeço 2019 apresentam as características representadas na tabela 5.2, e a geometria 1 tem  $1,19 \times 10^5$  células, enquanto a geometria 2 dispõe de  $1,26 \times 10^5$  células.

Quanto às sondas, uma vez que a geometria 2 apresenta as mesmas características geométricas que o caso de estudo presente nesta dissertação, todas mantêm as posições originais. Quanto à geometria 1, visto que tem menos 100m de domínio que a geometria 2, foi necessário reposicionar as sondas (tabela 5.4):

Tabela 5.4: Localização das sondas ao longo do domínio da geometria 1.

Sonda	Distância ao gerador [m]
S1	20
S2	302
S3	305.7
S4	307.2
S5	308.7

### 5.2.1 Geometria 1

Uma vez que a geometria 1 (figura 5.12) é ligeiramente inferior ao modelo geométrico estudado anteriormente (figura 5.1), foi necessário proceder a algumas alterações:

5.2.1.1 *blockMeshDict*

Este ficheiro foi definido da mesma maneira que o anteriormente explicado (figura 5.4), logo, após algum estudo sobre o mesmo, chegou-se à conclusão que a melhor maneira de definir o parâmetro *blocks* é da seguinte forma (figura 5.13):

```
blocks
(
  hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (1500 1 400) simpleGrading (1 1 1)
  hex (4 5 6 7 8 9 10 11) (1500 1 400) simpleGrading (1 1 1)
  hex (1 12 15 2 5 16 19 6) (100 1 400) simpleGrading (1 1 1)
  hex (12 13 14 15 16 17 18 19) (100 1 400) simpleGrading (1 1 1)
  hex (16 17 18 19 20 21 22 23) (100 1 400) simpleGrading (1 1 1)
);
```

Figura 5.13: Parâmetro *blocks* do ficheiro "*blockMeshDict*".

As fronteiras do domínio foram definidas de forma análoga à anteriormente explicada, por isso não será dado ênfase, uma vez que são bastante similares.

Assim, a geometria criada a partir do *utility blockMesh* foi a seguinte:

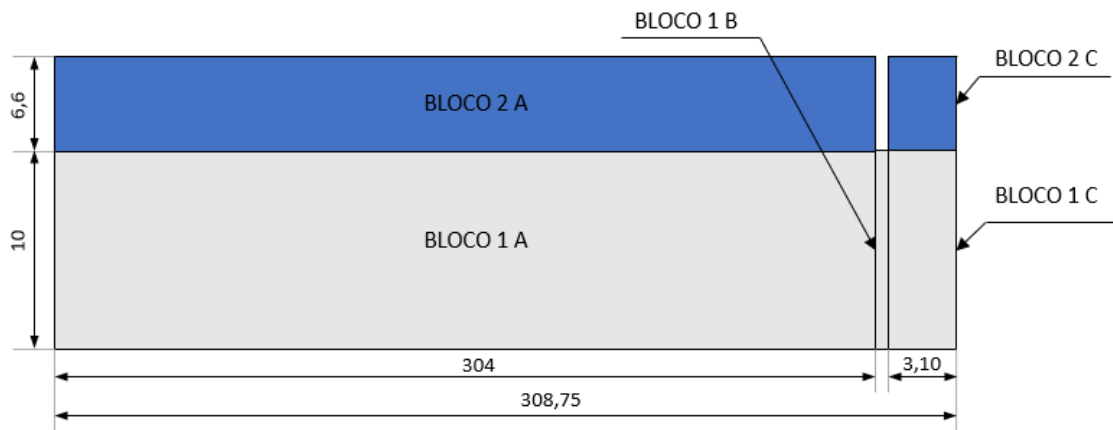


Figura 5.14: Representação, não à escala, da geometria criada pelo *utility blockMesh*.

A tabela 5.5 mostra as características da malha gerada para se obter a geometria representada na figura 5.14.

Tabela 5.5: Características da malha utilizada para criar a geometria 1.

	<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
<b>Bloco 1 A</b>	$N_x$	1500
	$N_z$	400
	$\Delta x_{inicial} - \Delta x_{final}$	0,2027 - 0,2027
	$\Delta z_{inicial} - \Delta z_{final}$	0,025 - 0,025
<b>Bloco 2 A</b>	$N_x$	1500
	$N_z$	400
	$\Delta x_{inicial} - \Delta x_{final}$	0,2027 - 0,2027
	$\Delta z_{inicial} - \Delta z_{final}$	0,0165 - 0,0165
<b>Bloco 1 B</b>	$N_x$	100
	$N_z$	400
	$\Delta x_{inicial} - \Delta x_{final}$	0,0165 - 0,0165
	$\Delta z_{inicial} - \Delta z_{final}$	0,025 - 0,025
<b>Bloco 1 C</b>	$N_x$	100
	$N_z$	400
	$\Delta x_{inicial} - \Delta x_{final}$	0,031 - 0,031
	$\Delta z_{inicial} - \Delta z_{final}$	0,025 - 0,025
<b>Bloco 2 C</b>	$N_x$	100
	$N_z$	400
	$\Delta x_{inicial} - \Delta x_{final}$	0,031 - 0,031
	$\Delta z_{inicial} - \Delta z_{final}$	0,0165 - 0,0165

### 5.2.1.2 *snappyHexMesh*

A geometria 1, uma vez que não apresenta uma chaminé, não necessita do uso do ficheiro *turbina.stl*. Os restantes – *rampa.stl* e *parede.stl* –, visto que o domínio em estudo perdeu 100m, foi necessário reposicioná-los, por forma a obter a geometria pretendida (figura 5.15):



Figura 5.15: Representação em pormenor da malha gerada.

De notar, na figura 5.16, que neste modelo geométrico não houve os mesmos problemas de malha que os apresentados na figura 5.9.

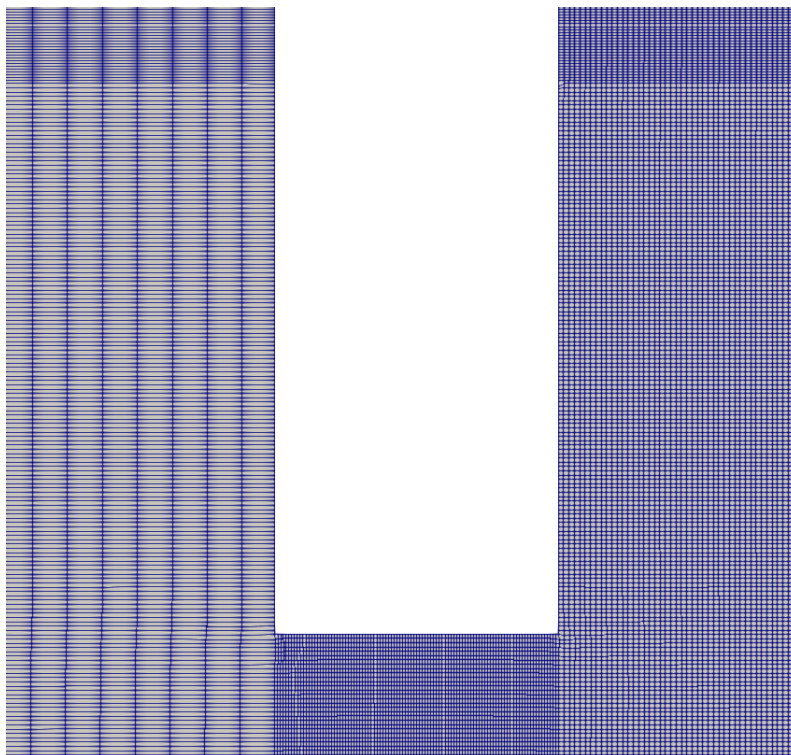


Figura 5.16: Representação da ausência das anomalias dentro da malha.

Assim, a geometria criada para recriar a geometria 1 (figura 5.15), apresenta  $1.32 \times 10^6$  células. Foi necessário um aumento substancial da criação de células, comparativamente ao artigo Conde e Condeço 2019. Tal ocorreu pois o *snappyHexMesh* necessita de uma boa definição de malha para conseguir modelar a inclinação pretendida, uma vez que é bastante pequena ( $0,86^\circ$ ). Com este aumento de células, as simulações irão decorrer durante dias, o que é uma desvantagem necessária para este caso de estudo, visto que irá captar os dados criados a partir da simulação com mais detalhe.

### 5.2.1.3 Modelo Numérico

Quanto ao modelo numérico, os parâmetros definidos para a geometria 1 são os mesmos que os apresentados no subcapítulo 5.1.2, entre os quais as características das ondas a serem simuladas (tabela 5.2) e os parâmetros de simulação. As sondas utilizadas para registar os valores obtidos encontram-se localizadas ao longo do domínio em estudo, como indicado na tabela 5.4, e explicado no subcapítulo anterior.

### 5.2.1.4 Análise de Resultados

Para analisar os resultados obtidos, serão estudadas três sondas: Sonda 1, para verificar a propagação da onda no início do canal, e se esta apresenta as características estipuladas;

Sonda 2, por forma a estudar a propagação da onda após a diminuição da profundidade; por fim, a Sonda 4, com o intuito de visualizar o interior da CAO e analisar a alteração dos parâmetros iniciais, como pretendido para este caso de estudo.

Na figura 5.17 estão representadas as series temporais das três sondas anteriormente mencionadas para uma onda com uma altura de 2m, para a geometria 1.

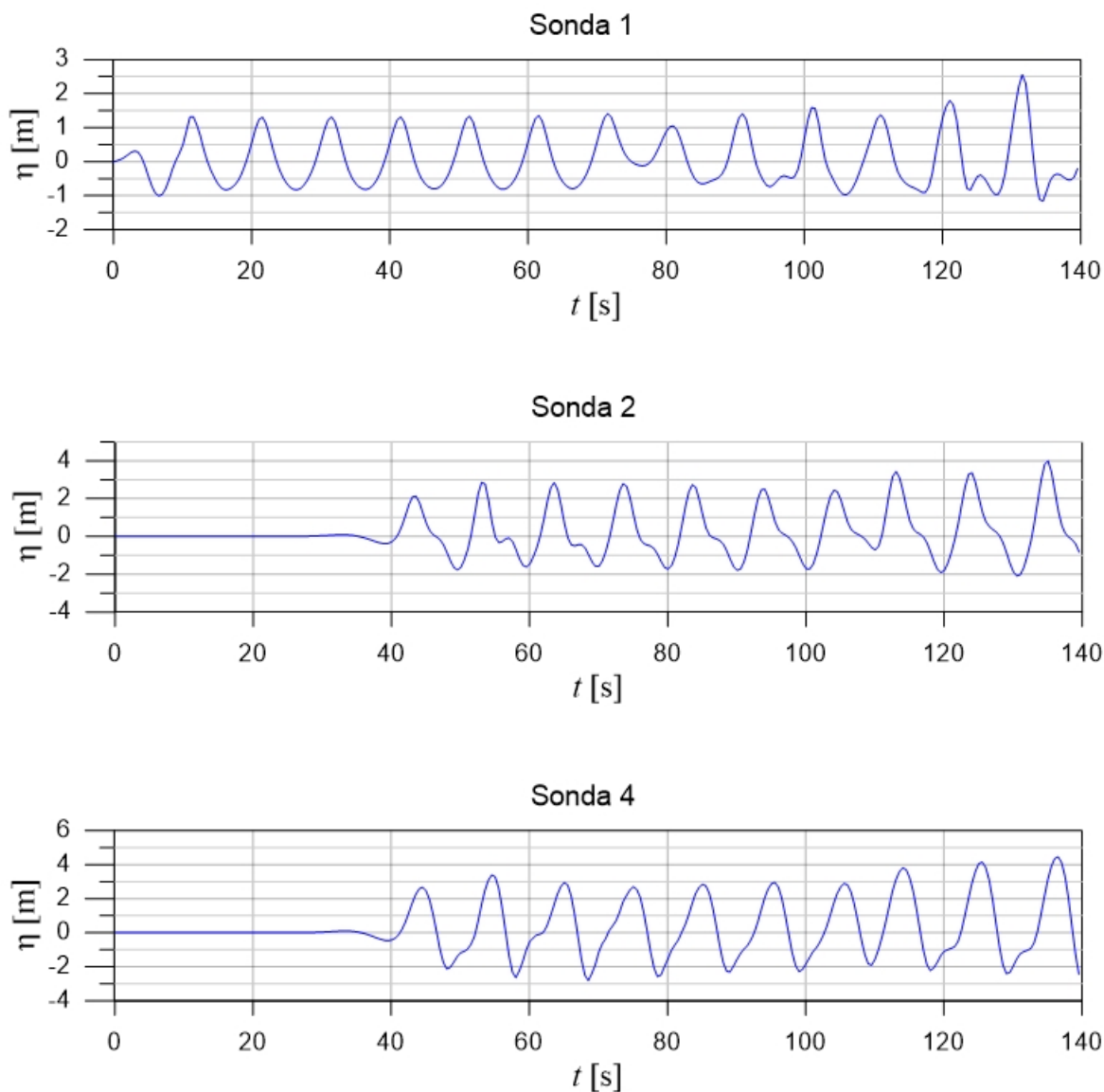


Figura 5.17: Representação gráfica da evolução da elevação da superfície livre da água ao longo do tempo para as Sondas 1,2 e 4, respetivamente para a geometria 1.

Analisando a Figura 5.17, é possível visualizar na Sonda 1 que a onda começou a sua propagação com os parâmetros estipulados bem definidos, mantendo a amplitude. Uma vez que a lei que está por detrás da propagação da onda é de segunda ordem, é possível depreender que a crista seja ligeiramente superior comparativamente à cava. Ainda é possível observar perturbações na propagação da onda a partir dos 70s devido à reflexão da mesma.

A Sonda 2 mostra que a alteração da superfície livre da água apenas começa perto dos 40s. É possível observar ondas com frequências diferentes sobrepostas às respectivas ondas incidentes. Tal ocorre devido ao fluxo – nos dois sentidos – na entrada da coluna de água oscilante. Após os 100s o comportamento da onda altera-se devido às ondas refletidas que chegam à localização da Sonda 2, tal como em Conde e Condeço 2019.

A Sonda 4 mostra a evolução da onda dentro da câmara. De notar que neste também é possível observar ondas com diferentes frequências, mas apresenta uma mudança de fase em relação aos resultados captados na Sonda 2.

A figura 5.18 mostra os resultados captados no interior do dispositivo – Sonda 3, Sonda 4 e Sonda 5. Esta figura compara a elevação da superfície livre no centro e nas extremidades da câmara. Quando a água se move no sentido ascendente dentro desta, a velocidade reduz, como se pode observar instantes antes dos 50s, 60s, entre outros, tal como no artigo Conde e Condeço 2019. Com estes resultados pode-se concluir que não existe a presença do fenómeno *Sloshing*.

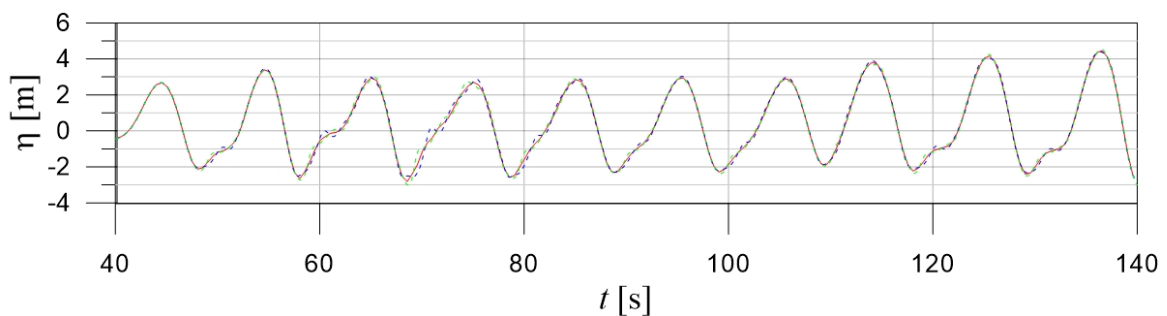


Figura 5.18: Elevação da superfície livre da água registada pelas sondas 3, 4 e 5, para a geometria 1.

Para ser possível entender se os resultados obtidos apresentam parencas com os resultados mostrados em Conde e Condeço 2019, foi feita a média dos resultados das Sondas 3, 4 e 5, das três ondas simuladas: 0.6m, 1.2m e 2m.

Na figura 5.19 é feita a análise dos resultados entre os obtidos nesta dissertação – usando o programa OpenFOAM – e os apresentados em Conde e Condeço 2019, usando o programa Fluent. Existem algumas diferenças entre as soluções apresentadas pelos programas, nomeadamente o desfasamento que se pode observar ao longo do tempo, e a amplitude das ondas. Tal desfasamento pode ocorrer devido ao aumento do número de células, uma vez que uma malha mais refinada permite captar mais fenómenos, e como estes influenciam o decorrer da simulação. Tal como em Conde e Condeço 2019, a propagação da onda muda o seu comportamento após os 100s devido à chegada da onda refletida.

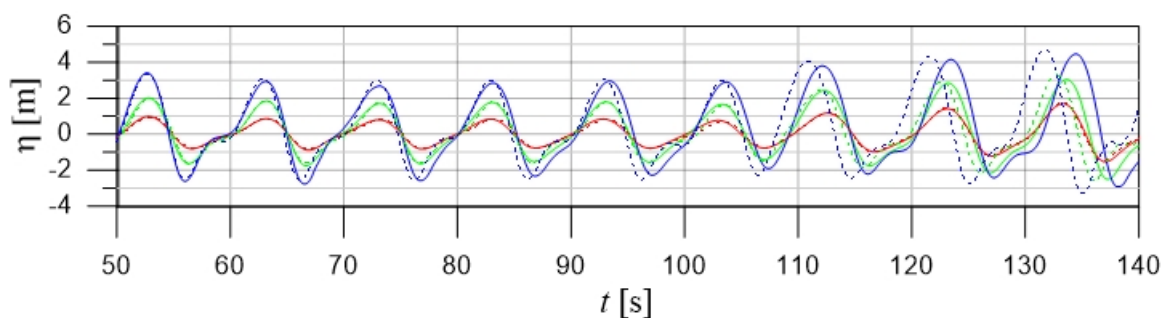


Figura 5.19: Elevação da superfície livre da água (média das sondas 3,4 e 5):  $H=0.6\text{m}$  - vermelho;  $H=1.2\text{m}$  - verde;  $H=2\text{m}$  - azul. (- OpenFOAM; - - Fluent).

Na figura 5.20 é feita uma análise análoga à anterior, mas entre os resultados obtidos pelo programa OpenFOAM no presente estudo e os resultados mostrados em Conde e Condeço 2019, usando o mesmo programa – OpenFOAM – mas com uma malha importada do programa Gambit.

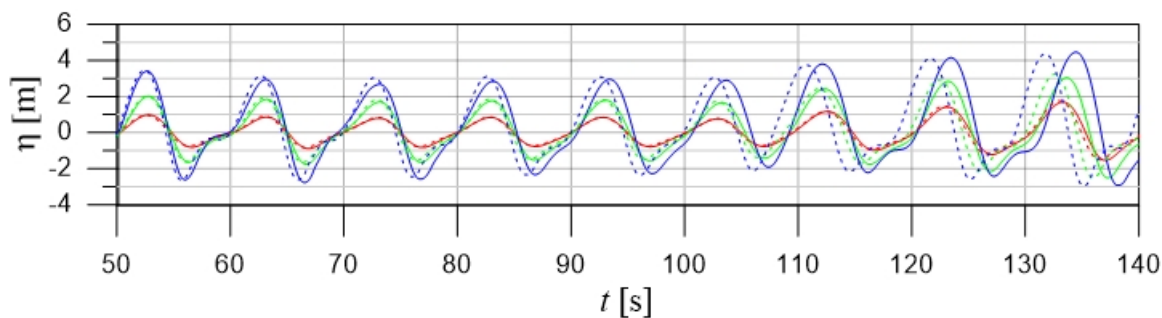


Figura 5.20: Elevação da superfície livre da água (média das sondas 3,4 e 5):  $H=0.6\text{m}$  - vermelho;  $H=1.2\text{m}$  - verde;  $H=2\text{m}$  - azul. (- OpenFOAM; - - OpenFOAM(alterado)).

Numa análise cuidada, pode-se observar que ocorreu o mesmo que o explicado na análise anterior, contudo as amplitudes das ondas, neste caso, mantêm-se a mesma em ambos os casos.

De um modo geral, os resultados obtidos comprovam que a malha criada no presente caso de estudo - figura 5.15 - satisfaz as necessidades pretendidas, usando apenas funcionalidades do programa OpenFOAM.

A partir dos resultados usados para obter as figuras 5.19 e 5.20, é possível estimar o fator de amplificação, sendo este a razão entre o máximo da elevação da superfície livre da água dentro da coluna de água oscilante, e a onda incidente gerada pelo batedor, tal como já explicado nesta dissertação.

Mais uma vez, para facilitar a análise entre os valores obtidos e os apresentados em Conde e Condeço 2019, vão ser comparados os resultados separadamente.

A figura 5.21 relaciona o fator de amplificação obtido neste caso de estudo, para as três alturas de onda simuladas, a partir do programa OpenFOAM, e o fator de amplificação – para as mesmas alturas de onda – apresentados em Conde e Condeço 2019, usando o programa Fluent, para a geometria 1.



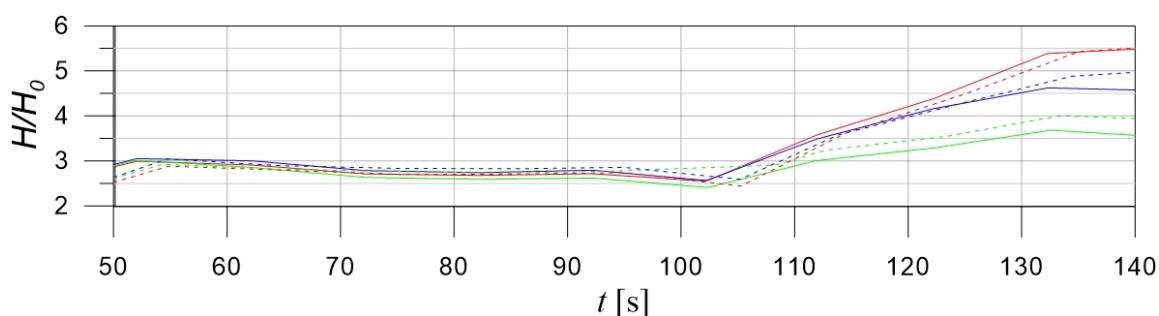


Figura 5.21: Fator de Amplificação para:  $H=0.6\text{m}$  - vermelho;  $H=1.2\text{m}$  - azul;  $H=2\text{m}$  - verde. (- OpenFOAM; - - Fluent).

Nesta, é possível observar que entre os programas usados, os resultados não parecem convergir na totalidade. Contudo, no intervalo de tempo usado para estudar o fator de amplificação – entre os 55s e os 105s – os valores encontram-se próximos, mostrando valores do parâmetro pretendido entre 2 e 3 (m/m). Os resultados obtidos a partir dos 105s não demonstram a realidade, uma vez que tal alteração no comportamento deste fator se deve à chegada da reflexão da onda, o que não ocorre na natureza.

A figura 5.22 apresenta a comparação entre os resultados obtidos nesta dissertação, para a geometria 1, e os apresentados por Conde e Condeço 2019, usando o mesmo programa (OpenFOAM), mas usando uma malha exportada do programa Fluent.

Aqui, os valores obtidos por ambos os estudos apresentam bastantes semelhanças, levando a crer que não é a malha que está a influenciar os resultados, mas sim os próprios códigos que regem os diferentes programas usados. Novamente, o fator de amplificação está entre o intervalo de tempo da chegada da primeira onda e a chegada da onda refletida.

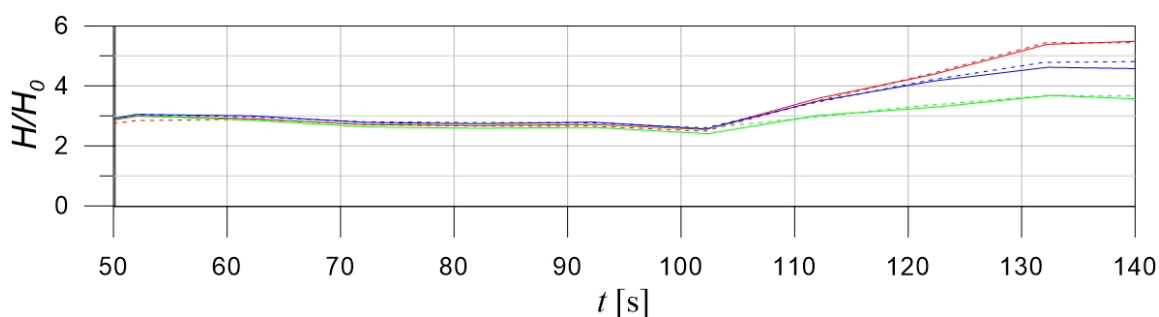


Figura 5.22: Fator de Amplificação para:  $H=0.6\text{m}$  - vermelho;  $H=1.2\text{m}$  - azul;  $H=2\text{m}$  - verde. ((- OpenFOAM; - - OpenFOAM(alterado))).

### 5.2.2 Geometria 2

A informação acerca da modelação numérica utilizada para gerar a geometria 2 – figura 5.1 – encontra-se no início deste capítulo.

### 5.2.2.1 Análise de Resultados

Uma vez mais, por forma a analisar os resultados, serão estudadas as mesmas três sondas que na geometria 1, mas nos respetivos locais (5.3).

Na figura 5.23 estão representados os resultados obtidos pelas Sondas 1,2 e 4, referentes à simulação da onda com uma altura de 2m, para a geometria 2.

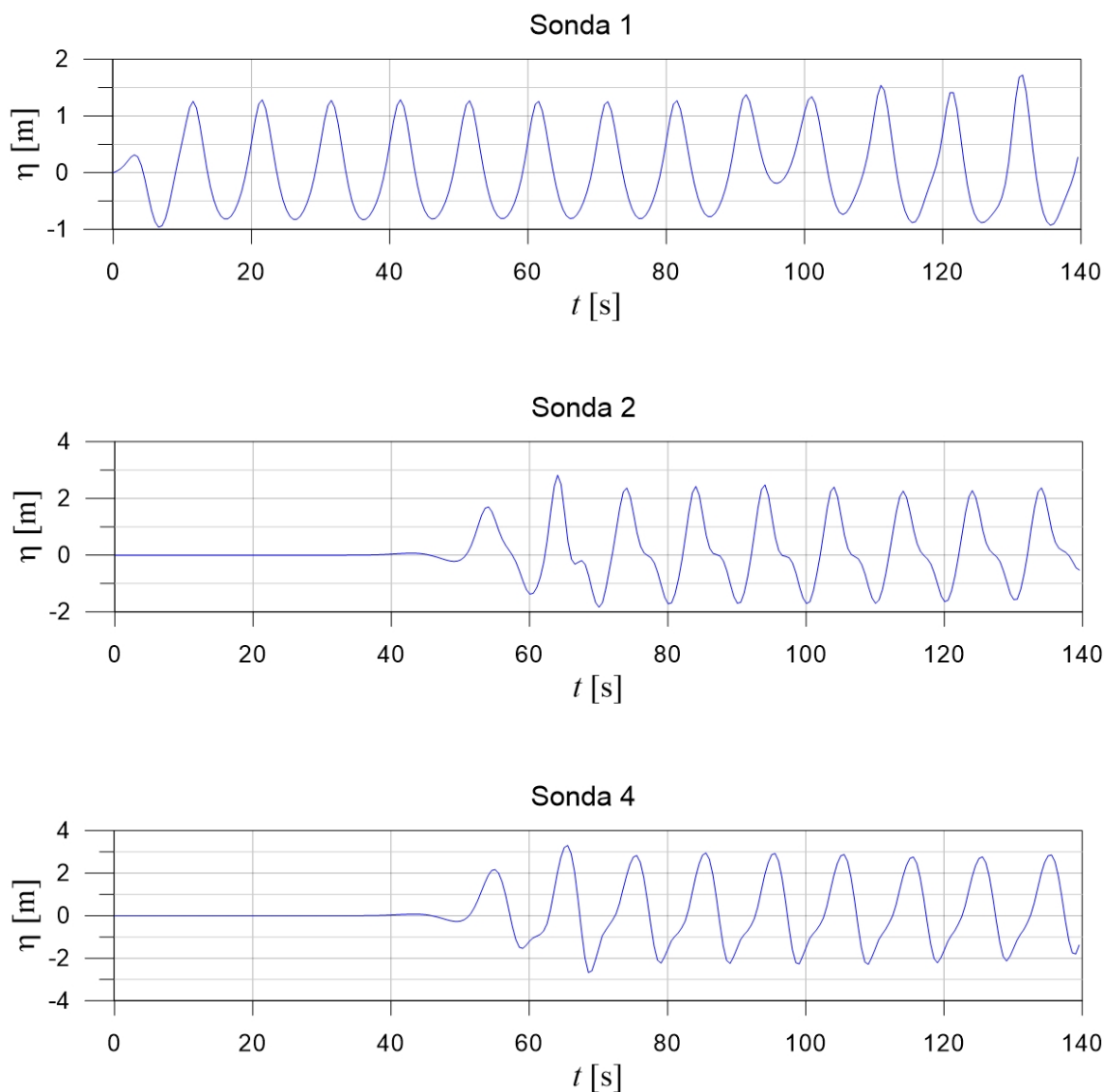


Figura 5.23: Representação gráfica da evolução da elevação da superfície livre da água ao longo do tempo para as Sondas 1, 2 e 4, respetivamente para a geometria 2.

Tal como na geometria 1, a Sonda 1 mostra o início da propagação da onda. Nesta, é possível visualizar que a onda se propagou com os parâmetros atribuídos bem definidos. Uma vez que a geometria 2 apresenta mais 100m no seu domínio que a geometria 1, a Sonda 1 apenas capta a reflexão da onda perto dos 100s, como se pode deduzir a partir da figura 5.23.

A mesma razão serve para explicar o porquê de a Sonda 2 começar a captar a alteração da superfície livre aos 50s, e não aos 40s, como na geometria 1. Mais uma vez, é possível observar a presença de uma segunda frequência de onda, devido ao escoamento para o interior – e exterior – do dispositivo.

Na Sonda 4 é possível visualizar o que ocorreu no interior da CAO, no decorrer da simulação. Os resultados parecem promissores, uma vez que houve um aumento significativo da altura da onda, tal como se procede na central de Mutriku.

De forma análoga à análise feita para a geometria 1, foram sobrepostos os resultados obtidos pelas Sondas 3,4 e 5 – figura 5.24.

Também nesta geometria é possível observar a redução da velocidade aquando o movimento ascendente da água, e na figura 5.24 depreende-se que a alteração da propagação da onda não se processa devido ao fenómeno *Sloshing*, uma vez que as séries temporais das ondas são iguais.

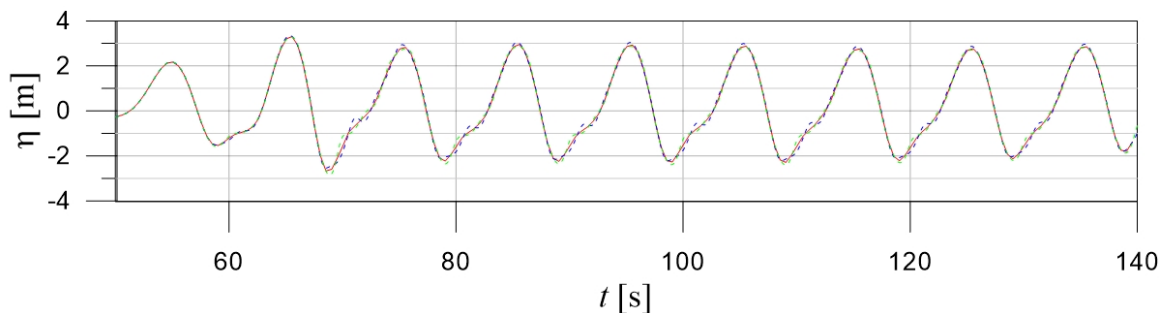


Figura 5.24: Elevação da superfície livre livre registada pelas sondas 3, 4 e 5, na a geometria 2.

De modo a comparar mais uma vez os resultados obtidos com os presentes no artigo Conde e Condeço 2019, é feita a média dos resultados captados pelas Sondas 3, 4 e 5, referentes às três ondas simuladas: 0.6m, 1.2m e 2m de altura de onda. Tal como feito anteriormente, serão analisados os resultados dos diferentes programas em diferentes gráficos, por forma a facilitar o processo.

Na figura 5.25 estão sobrepostos os resultados obtidos no presente caso de estudo, usando o programa OpenFOAM, com os resultados provenientes do artigo Conde e Condeço 2019, usando o programa Fluent.

Nesta geometria, os resultados coincidiram, não havendo o desfasamento apresentado na figura 5.19 para a geometria 1. No entanto, após os 135s, é possível observar ligeiras diferenças no comportamento da propagação da onda que levam a crer que se a simulação tivesse decorrido durante mais tempo, os resultados poderiam não coincidir.

Os resultados processados pelo Fluent para a geometria 2 apresentam uma amplitude ligeiramente superior aos resultados processados pelo programa OpenFOAM. Na figura 5.25, contrariamente ao ocorrido na geometria 1, não parece existir a presença da reflexão da onda. Possivelmente, devido ao aumento da geometria, 140s de simulação parecem ser insuficientes para captar tal fenómeno. Ainda assim, no fim do gráfico (135s) é possível

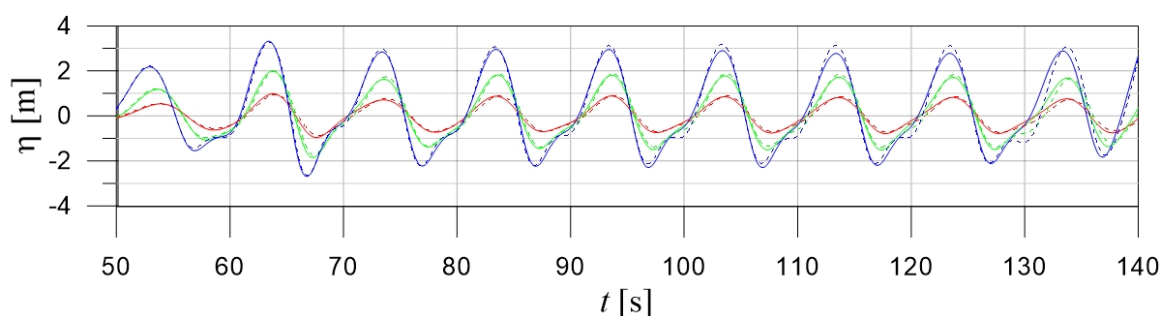


Figura 5.25: Elevação da superfície livre (média das sondas 3, 4 e 5):  $H=0.6\text{m}$  - vermelho;  $H=1.2\text{m}$  - verde;  $H=2\text{m}$  - azul. (- OpenFOAM; - - Fluent).

notar que a linha de água ascende de maneira diferente à das ondas anteriores, mostrando que provavelmente o fenômeno da reflexão da onda está presente na simulação, mas não houve tempo suficiente para ser captado.

Na figura 5.26 estão os resultados obtidos e os apresentados em Conde e Condeço 2019, usando o mesmo programa – OpenFOAM – mas com uma malha importada do programa Fluent.

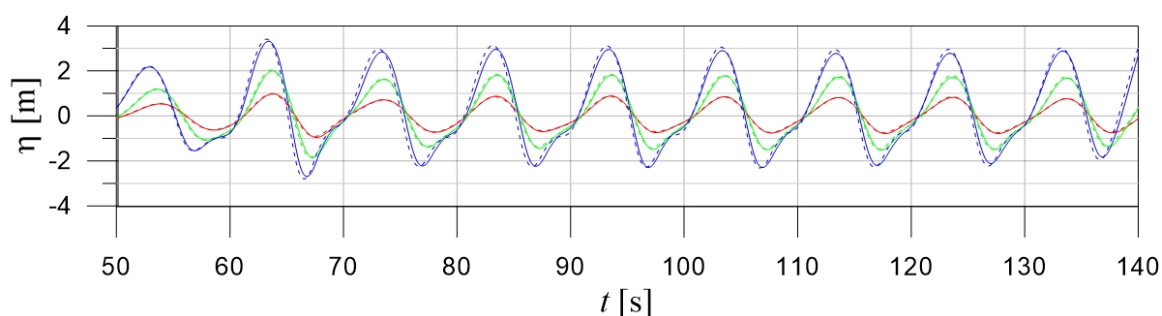


Figura 5.26: Elevação da superfície livre (média das sondas 3, 4 e 5):  $H=0.6\text{m}$  - vermelho;  $H=1.2\text{m}$  - verde;  $H=2\text{m}$  - azul. (- OpenFOAM; - - OpenFOAM(alterado)).

Neste caso, como se pode observar, os resultados são muito semelhantes, tanto em propagação da onda, não havendo o desfasamento mencionado na geometria 1, como em amplitude de onda, uma vez que são idênticas para ambos os resultados. Mais uma vez, não se sente a presença da reflexão da onda, sem ser a partir dos 135s.

De um modo geral, os resultados obtidos comprovam que a anomalia presente na malha – figura 5.9 – parece não afetar os resultados, conseguindo processar os fenômenos pretendidos. Assim, é possível concluir que a malha criada para recriar a geometria 2 é suficiente para o caso de estudo pretendido.

Uma vez mais, tal como estudado para a geometria 1, será feita uma análise ao fator de amplificação das três alturas de onda entre os resultados obtidos no presente caso de estudo, e os apresentados em Conde e Condeço 2019, mas para a geometria 2.

As figuras 5.27 e 5.28 estão dispostas da mesma forma nesta dissertação que a disposição optada anteriormente para apresentar a geometria 1, para ser possível estudar os

casos com mais detalhe.

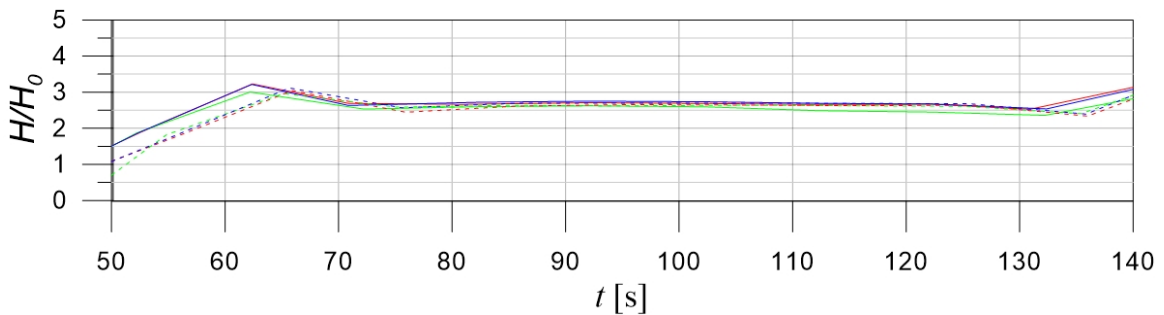


Figura 5.27: Fator de Amplificação para:  $H=0.6\text{m}$  - vermelho;  $H=1.2\text{m}$  - azul;  $H=2\text{m}$  - verde. (- OpenFOAM; - - Fluent).

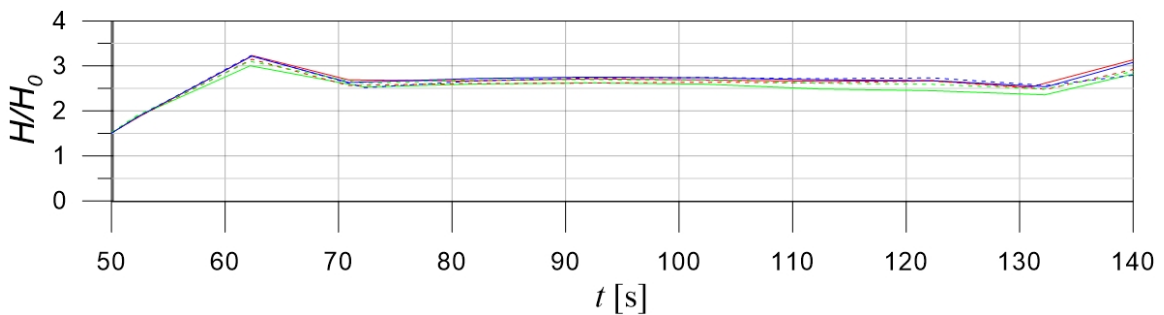


Figura 5.28: Fator de Amplificação para:  $H=0.6\text{m}$  - vermelho;  $H=1.2\text{m}$  - azul;  $H=2\text{m}$  - verde. ((- OpenFOAM; - - OpenFOAM(alterado))).

Os resultados obtidos corroboram as conclusões depreendidas para a geometria 1, uma vez que perto dos 135s o comportamento deste fator altera-se, visto que é a chegada da onda refletida.

Comparando os resultados obtidos acerca do fator de amplificação para a geometria 1 e 2, é possível entender que a gama de valores apresentados por este fator é a mesma. Assim, com base nesta análise, conclui-se, que para este intervalo de tempo, a conduta presente na geometria 2 (onde está a turbina) não influencia as características hidrodinâmicas da coluna de água oscilante.

### 5.3 Outros Resultados

Uma vez que o poder computacional é muitas vezes limitado para as simulações pretendidas, não devido à sua capacidade de obtenção de resultados, mas sim devido ao tempo necessário para os processar, é preciso analisar a melhor maneira de se proceder à criação de um modelo geométrico, com uma malha que seja boa o suficiente para captar os fenómenos, mas que facilite o processamento dos mesmos ao programa. Assim, foi produzida outra malha para a geometria 1 (figura 5.12), de modo a entender se é possível obter resultados credíveis, a partir de uma malha menos refinada.

Para tal, foram feitas algumas alterações ao nível do número de células, onde a nova malha apresenta  $8.4 \times 10^5$  células, como se pode analisar na tabela 5.6:

Tabela 5.6: Características da malha utilizada para criar a nova geometria 1.

	<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
<b>Bloco 1 A</b>	$N_x$	900
	$N_z$	400
	$\Delta x_{inicial} - \Delta x_{final}$	1,5689 - 0,0157
	$\Delta z_{inicial} - \Delta z_{final}$	0,025 - 0,025
<b>Bloco 2 A</b>	$N_x$	900
	$N_z$	400
	$\Delta x_{inicial} - \Delta x_{final}$	1,5689 - 0,0157
	$\Delta z_{inicial} - \Delta z_{final}$	0,0165 - 0,0165
<b>Bloco 1 B</b>	$N_x$	100
	$N_z$	400
	$\Delta x_{inicial} - \Delta x_{final}$	0,0165 - 0,0165
	$\Delta z_{inicial} - \Delta z_{final}$	0,025 - 0,025
<b>Bloco 1 C</b>	$N_x$	100
	$N_z$	400
	$\Delta x_{inicial} - \Delta x_{final}$	0,031 - 0,031
	$\Delta z_{inicial} - \Delta z_{final}$	0,025 - 0,025
<b>Bloco 2 C</b>	$N_x$	100
	$N_z$	400
	$\Delta x_{inicial} - \Delta x_{final}$	0,031 - 0,031
	$\Delta z_{inicial} - \Delta z_{final}$	0,0165 - 0,0165

Na figura 5.29 está representada a geometria obtida. Tal como mostrado anteriormente para a geometria 1, a malha não apresenta anomalias, mesmo com a redução do número de células.

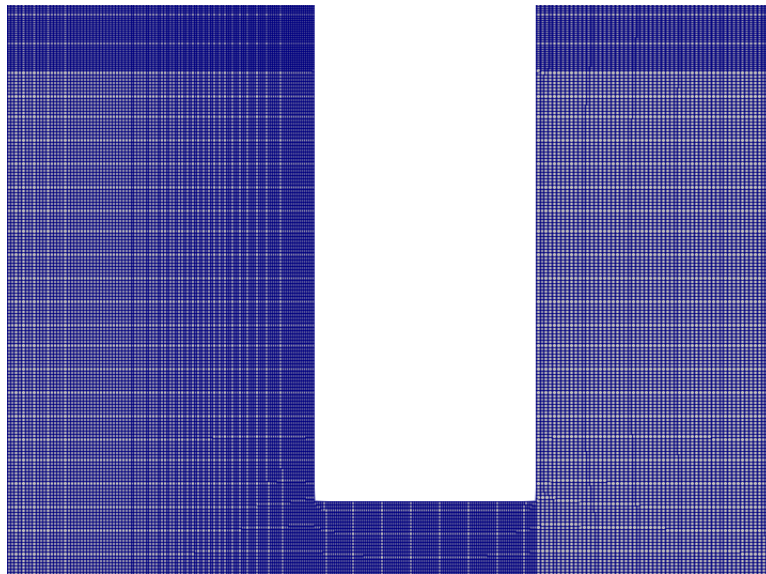


Figura 5.29: Representação em pormenor da malha gerada.

As restantes características do modelo numérico mantêm-se as mesmas, de modo a ser possível comparar os resultados obtidos com os trabalhados anteriormente.

A figura 5.30 mostra a sobreposição dos resultados obtidos no presente caso – a vermelho – e os resultados trabalhados na primeira simulação desta dissertação – a azul.

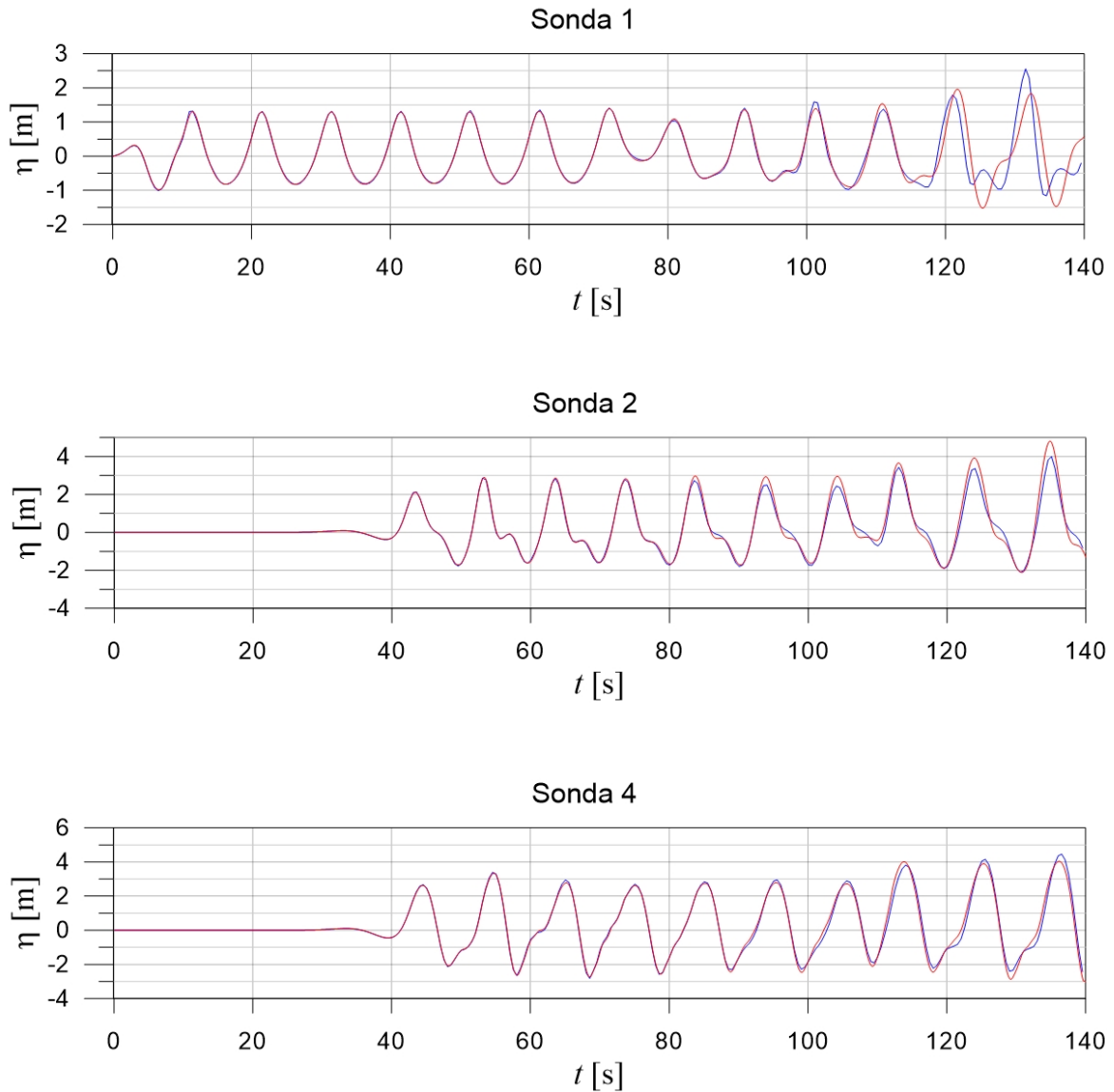


Figura 5.30: Representação gráfica da evolução da elevação da superfície livre ao longo do tempo. Resultados anteriores: azul; resultados deste caso de estudo: vermelho.

Analisando os resultados, inicialmente ambas as Sondas 1 registam os mesmos valores, sendo que a propagação da onda se apresenta bem definida. É a partir dos 90s que os resultados começam a divergir. Tal ocorre, pois, uma malha menos refinada não consegue captar os resultados com o mesmo rigor que uma malha com um elevado número de células. Desta forma os novos resultados apresentam uma frequência de onda secundária diferente das obtidas nos primeiros resultados. De notar que para o fim da simulação, as Sondas registam amplitudes de onda diferentes.

As Sondas 2, como se pode observar, são relativamente parecidas, indicando que a malha menos refinada, apesar de perder algum rigor, consegue definir os fenômenos pretendidos relativamente bem, com a mais valia de diminuir o tempo de simulação significativamente.

O mesmo ocorre na Sonda 4, o que ajuda a confirmar as afirmações escritas anteriormente.

De notar que as simulações estudadas até ao momento apresentam a absorção das ondas inativa. Para ver como este fator pode alterar os resultados, foi produzida uma nova malha, novamente para a geometria 1. Neste novo modelo geométrico, para além de ser ativada a absorção, a simulação irá correr durante 200s, para se entender também como são as alterações da propagação da onda ao longo do tempo.

Neste modelo foi novamente alterado o número de células, onde este apresenta  $1.07 \times 10^6$  células. Não será apresentada a modelação do mesmo, uma vez que já foram explicadas várias alterações e não é o intuito deste estudo. Na tabela 5.7 encontra-se a nova disposição das células ao longo do domínio.

Tabela 5.7: Características da malha utilizada para criar a nova geometria 1, com a absorvidade ativa.

	<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
<b>Bloco 1 A</b>	$N_x$	1185
	$N_z$	400
	$\Delta x_{inicial} - \Delta x_{final}$	1,192 - 0,0119
	$\Delta z_{inicial} - \Delta z_{final}$	0,025 - 0,025
<b>Bloco 2 A</b>	$N_x$	1185
	$N_z$	400
	$\Delta x_{inicial} - \Delta x_{final}$	1,192 - 0,0119
	$\Delta z_{inicial} - \Delta z_{final}$	0,0165 - 0,0165
<b>Bloco 1 B</b>	$N_x$	100
	$N_z$	400
	$\Delta x_{inicial} - \Delta x_{final}$	0,0165 - 0,0165
	$\Delta z_{inicial} - \Delta z_{final}$	0,025 - 0,025
<b>Bloco 1 C</b>	$N_x$	100
	$N_z$	400
	$\Delta x_{inicial} - \Delta x_{final}$	0,031 - 0,031
	$\Delta z_{inicial} - \Delta z_{final}$	0,025 - 0,025
<b>Bloco 2 C</b>	$N_x$	100
	$N_z$	400
	$\Delta x_{inicial} - \Delta x_{final}$	0,031 - 0,031
	$\Delta z_{inicial} - \Delta z_{final}$	0,0165 - 0,0165

A figura 5.31 mostra uma comparação entre as Sondas 1, 2 e 4 deste caso de estudo - a vermelho - e o primeiro apresentado nesta dissertação - a azul. Neste caso foram pedidos 200s de simulação, referente à geometria 1, com uma altura de onda de 2m.



Inicialmente, tal como no caso de estudo anteriormente analisado, ambas as simulações (na Sonda 1) mostram uma boa propagação da onda, mantendo a amplitude da mesma bem definida. No entanto, perto dos 80s – chegada da onda refletida – os resultados começam a divergir. Esta divergência de resultados deve-se à incapacidade do *solver* definir a absorção em profundidade infinita. Como consequência, os resultados obtidos entre os 80s e os 120s deste caso de estudo não apresentam resultados que sejam credíveis de analisar. Uma vez que o gerador de ondas não consegue absorver a onda refletida, a partir dos 140s a Sonda 1 mostra uma propagação de onda com uma amplitude diferente da estipulada.

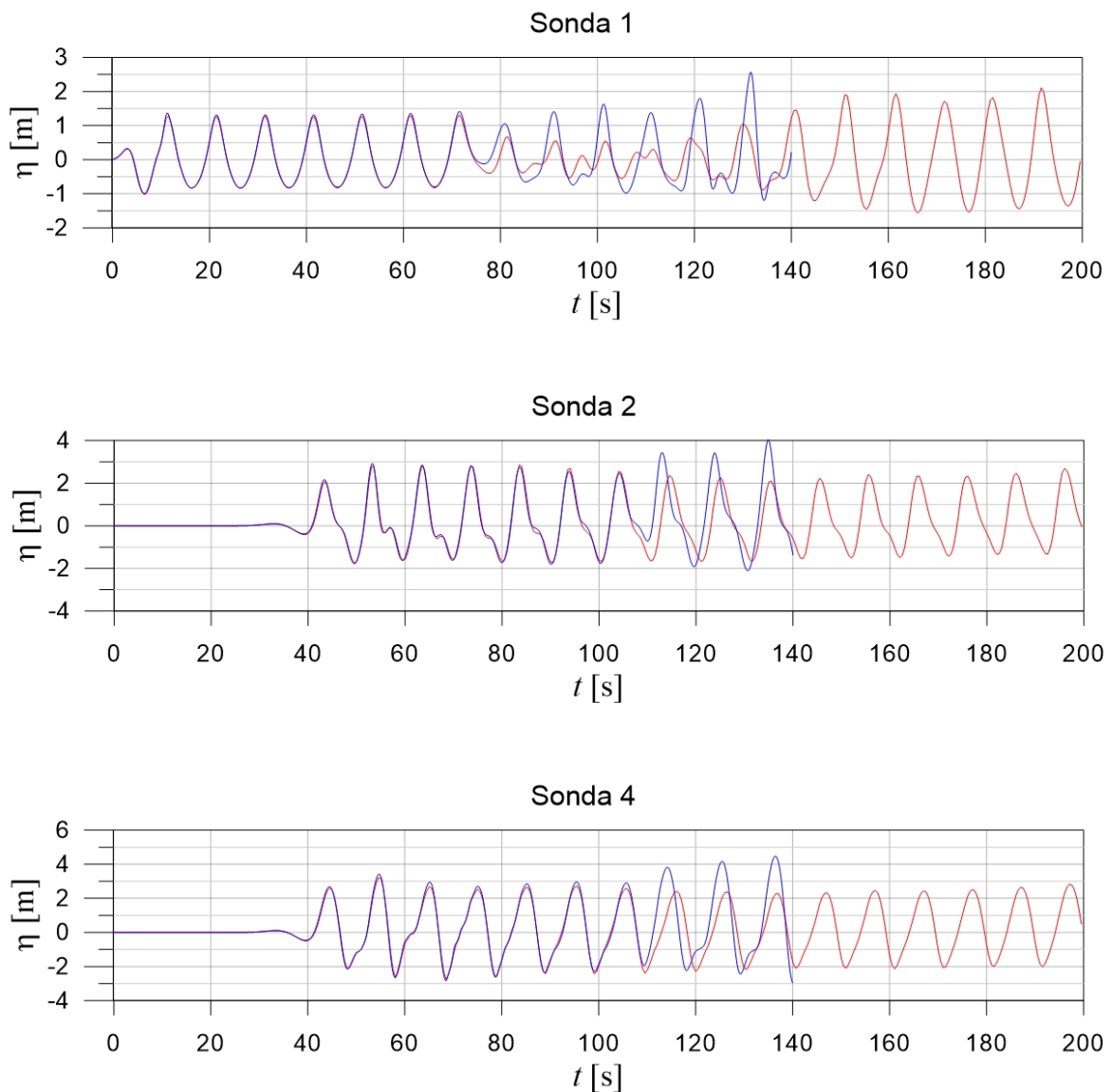


Figura 5.31: Representação gráfica da evolução da elevação da superfície ao longo do tempo. Resultados anteriores: azul; resultados deste caso de estudo: vermelho.

Na Sonda 2, os resultados parecem melhorar, uma vez que o domínio já não se encontra em profundidade infinita, logo a absorção aparenta estar a funcionar, visto que não há

sinais evidentes das ondas refletidas.

O mesmo ocorre para a Sonda 4, no entanto, nestes resultados, é possível observar que os resultados obtidos primeiramente (a azul) apresentam com mais detalhe alguns fenômenos que decorrem na simulação. De destacar a passagem da água para o interior da CAO.

Estudados os resultados obtidos, a figura 5.32 mostra a comparação entre os resultados obtidos no presente caso, com a média das três sondas que estão dentro da CAO com a média dos resultados captados pelas respectivas três sondas do primeiro caso de estudo. Uma vez que a primeira simulação apenas correu 140s, é feita uma análise a ambos os casos entre os 50s e os 140s.

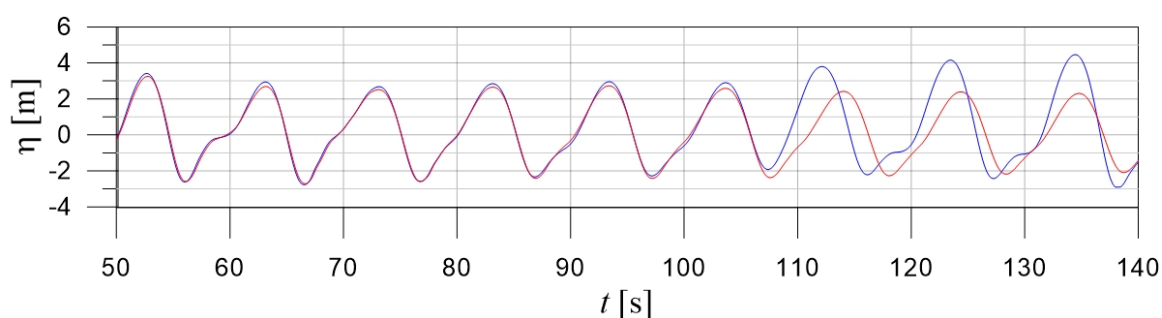


Figura 5.32: Elevação da superfície livre entre os resultados apresentados no primeiro caso de estudo e o presente. Resultados anteriores: azul; resultados deste caso de estudo: vermelho.

Como se pode deprender, os resultados são bastante semelhantes até à passagem do segundo 105, onde os resultados do presente caso de estudo se mantêm idênticos face ao início do gráfico, enquanto que os resultados obtidos anteriormente alteram a sua amplitude de onda com a chegada da onda refletida, levando a crer que nestes novos resultados a absorção está a desempenhar a sua função.

Com estas novas conclusões, surgiu o interesse de se estudar também o fator de amplificação deste caso de estudo, uma vez que a onda refletida não influencia a simulação. Assim, na figura 5.33, estão presentes os fatores de amplificação de ambos os casos de estudo que estão a ser analisados.

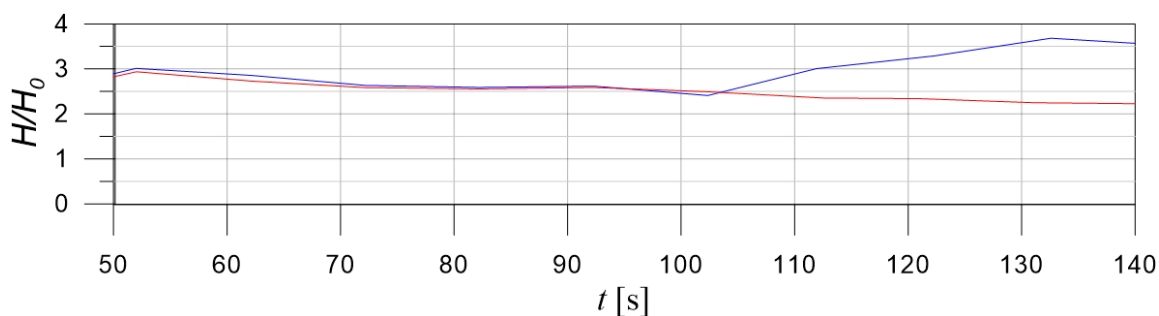


Figura 5.33: Representação dos fatores de amplificação em estudo. Resultados anteriores: azul; resultados deste caso de estudo: vermelho.

Como esperado, uma vez que neste novo caso de estudo a absorção se encontra ativa, não existe a presença da reflexão da onda no decorrer da simulação. Desta forma, enquanto nos primeiros resultados – a azul – o fator de amplificação altera-se devido à chegada da onda refletida no interior da CAO, estes novos resultados – a vermelho – o valor deste parâmetro mantém-se constante, decrescendo, para o intervalo de tempo analisado. Apesar de não apresentado, o fator de amplificação, a partir dos 140s, mantém-se constante perto dos 2,2.

Deste modo, encontram-se concluídos os estudos pretendidos para a presente dissertação.



## CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O principal objetivo desta dissertação, tal como o título indica, consiste na simulação numérica das características hidrodinâmicas na central de energia das ondas de Mutriku, em Espanha, utilizando o *software* OpenFOAM. Para tal, foi necessário criar um modelo geométrico e numérico, com as características definidas pela zona em estudo.

Inicialmente foi estudada na literatura a inclinação real da orla costeira da zona em estudo. Uma vez que esta se encontra muito resumida, foi analisada a inclinação da região recorrendo a cartas marítimas.

Estando esta definida, foi necessário estudar o *software*, por forma a entender qual o tutorial disponibilizado por este que mais se identifica com o caso de estudo em questão, e saber como alterá-lo, para ser possível definir o domínio pretendido, a malha e os parâmetros de propagação da onda referentes às ondas que incidem na central de Mutriku.

A partir da literatura em Condeço 2018, e após algumas tentativas inconclusivas, optou-se por utilizar o *solver* olaFlow para executar este caso de estudo, uma vez que este pode ser considerado um *upgrade* ao *software* OpenFOAM, e para ser possível geral o modelo geométrico pretendido, foi necessário recorrer ao *utility snappyHexMesh*, pois com este a definição do número de células tornou-se mais acessível.

Após uma análise detalhada da geometria em questão, concluiu-se que seria necessário introduzir um modelo de turbulência (modelo  $k - \epsilon$ ), pois com este é possível reproduzir os fenómenos que ocorrem no decorrer da simulação com mais detalhe.

Sabendo o tipo de onda que se quer estudar – tipo Stokes II –, o *solver* necessário e todas as características inerentes ao estudo bem definidas, mais a introdução de um modelo de turbulência, procedeu-se à comparação dos resultados deste caso de estudo com os apresentados em Conde e Condeço 2019. Para tal, foi necessário criar mais um modelo geométrico – geometria 1 – que é mais pequeno que a geometria originalmente criada. No

entanto, a geometria 2 estudada em Conde e Condeço 2019 é idêntica à pretendida nesta dissertação.

Os resultados obtidos para ambas as geometrias demonstram que os modelos criados estão bem definidos, e talvez mais completos no que toca à geometria 1, uma vez que o aumento substancial do número de células poder ter levado a um maior rigor dos fenómenos na influência dos resultados obtidos acerca do interior da CAO.

Ainda neste estudo, ao ser analisado o fator de amplificação de cada geometria, conclui-se que a conduta onda está a turbina, na geometria 2, não influencia as características hidrodinâmicas dentro da central, uma vez que os fatores de amplificação apresentam a mesma gama de valores.

Acabada a análise destes casos de estudo com o artigo Conde e Condeço 2019, foi produzida uma nova malha para a geometria 1, mas menos refinada, de modo a entender se é possível comprometer a exigência da obtenção dos resultados, com o intuito de diminuir o tempo de simulação. Nestes resultados, os valores apresentados pela Sonda 1 mostram que a nova malha não consegue simular a mesma frequência de onda secundária, não captando bem a reflexão da onda. Nas restantes sondas os valores são mais credíveis, uma vez que são bastante parecidos com os alcançados na malha mais refinada.

Até agora, todas as simulações apresentam a reflexão da onda nos seus resultados. De modo a estudar qual a influência da reflexão da onda no decorrer da simulação, foi ativada a absorvidade, com o intuito de não existir tal fenómeno.

Assim, foi criada uma nova malha, novamente para comparar com os resultados originais para a geometria 1, mas, desta vez, estipulou-se 200s como tempo de simulação, para se poder entender o que acontece para lá dos 140s.

A Sonda 1 mostrou que o *solver* é incapaz de executar o parâmetro absorvidade em profundidade infinita. No entanto, os valores obtidos para as restantes sondas demonstraram resultados curiosos, levando ao estudo do fator de amplificação para este caso de estudo. Como esperado, uma vez que a reflexão da onda não ocorre neste caso, o valor do fator de amplificação mantém-se constante.

## 6.1 Trabalhos Futuros

Caso haja continuidade para este estudo, existem vários caminhos a serem percorridos.

Primeiramente seria interessante estudar os outros fenómenos mencionados no decorrer desta dissertação, entre os quais o *Sloshing* e a pressão pneumática, para as simulações já estudadas, por forma a entender se tais fatores estão a dar resultados coerentes face à realidade.

Outro estudo interessante seria simular os mesmos casos de estudo, mas com a relação de área conduta da turbina/câmara de água correta – para a geometria 2 -, e entender qual a sua influência nos resultados.

## BIBLIOGRAFIA

- IEA (2018). *Electricity generation by fuel*. Acedido em 2019/02/06. URL: <https://webstore.iea.org/electricity-information-2018>.
- Cornett, A. M. et al. (2008). “A global wave energy resource assessment”. Em: *The Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore e Polar Engineers.
- Council, W. E. (2016). “World Energy Resources Marine Energy 2016”. Em: *World Energy Resources 24*.
- Cruz, J. e A. Sarmiento (2004). “Energia das ondas: introdução aos aspectos tecnológicos, económicos e ambientais”. Em: *Alfragide: Instituto do Ambiente*.
- Falcão, A. F. e J. C. Henriques (2016). “Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review”. Em: *Renewable Energy* 85, pp. 1391–1424.
- Commission, E. (2018). *Market study on ocean energy*. European Union.
- Conde, J. e M. Condeço (out. de 2019). “Numerical Simulation of an Oscillating Water Column (OWC) Wave Energy Converter (WEC) on a Breakwater Using OpenFOAM®”. Em: *Defect and Diffusion Forum* 396, pp. 12–21. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.396.12.
- Falcão, A. (2010). “Wave energy utilization: A review of the technologies”. Em: *Renewable and sustainable energy reviews* 14.3, pp. 899–918.
- Brooke, J. (2003). *Wave energy conversion*. Vol. 6. Elsevier.
- Condeço, M. B. d. S. P. (2018). *Simulação Numérica do Escoamento numa Central de Energia das Ondas*. Tese de Mestrado.
- Santos, A. dos, L. Isoldi, L. Rocha, M. Gomes, R. Viera e E. dos Santos (2019). “DEVELOPMENT OF A NUMERICAL MODEL FOR THE STUDY OF AN OSCILLATING WATER COLUMN DEVICE CONSIDERING AN IMPULSE TURBINE”. Em: *Revista de Engenharia Térmica* 18.1, pp. 99–105.
- Vyzikas, T., S. Deshoulières, M. Barton, O. Giroux, D. Greaves e D. Simmonds (2017). “Experimental investigation of different geometries of fixed oscillating water column devices”. Em: *Renewable energy* 104, pp. 248–258.
- Bouali, B e S Larbi (2013). “Contribution to the geometry optimization of an oscillating water column wave energy converter”. Em: *Energy procedia* 36, pp. 565–573.

- Torre-Enciso, Y, I Ortubia, L. L. De Aguilera e J Marqués (2009). “Mutriku wave power plant: from the thinking out to the reality”. Em: *Proceedings of the 8th European wave and tidal energy conference, Uppsala, Sweden*. Vol. 710, p. 319329.
- Fachadas, J. L. C. (2012). “Análise de vários modelos numéricos de captura de superfície livre e aplicação a um dispositivo conversor de energia do tipo coluna de água oscilante”. Tese de doutoramento. Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Medina-Lopez, E., W. Allsop, A. Dimakopoulos e T. Bruce (2015). “Conjectures on the Failure of the OWC Breakwater at Mutriku”. Em: *Proceedings of Coastal Structures and Solutions to Coastal Disasters Joint Conference, Boston, Massachusetts*.
- Massel, S. R. (1996). *Ocean surface waves: their physics and prediction*. Vol. 11. World scientific.
- Cardoso, J. M. d. S. M. (2017). *Simulação Numérica da Propagação de Ondas em Canal de Fundo Variável Utilizando o Código IHFOAM*. Tese de Mestrado.
- Demirbilek, Z. e C. L. Vincent (2008). Em: “PART II - Water Wave Mechanics”. Em: *Costal Engineering Manual. EM 1110-2-1100. U.S. Army Corps of Engineers. Cap. 1*.
- Dean, R. G. e R. A. Dalrymple (1991). *Water wave mechanics for engineers and scientists*. Vol. 2. World Scientific Publishing Company.
- Le Méhauté, B. (1976). *An introduction to hydrodynamics and water waves*. Springer Science & Business Media.
- Marques, R. A. (2015). “Estudo numérico da interação de ondas com um quebra-mar poroso utilizando o código IHFOAM”. Tese de doutoramento.
- Versteeg, H. K. e W. Malalasekera (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson education.
- Foundation, T. O. (2019). Acedido em 2019/03/26. URL: <https://cfd.direct/openfoam/about/>.
- OpenFOAM (2019). *The open source CFD toolbox*. Acedido em 2019/05/13. URL: <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/>.
- ParaView (2019). Acedido em 2019/07/05. URL: <https://www.paraview.org/>.
- Higuera, P. (2015). “Application of computational fluid dynamics to wave action on structures”. Em: *PhD. Universidade de Cantabria*.
- Hirt, C. W. e B. D. Nichols (1981). “Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries”. Em: *Journal of computational physics* 39.1, pp. 201–225.
- Higuera, P., J. L. Lara e I. J. Losada (2013). “Realistic wave generation and active wave absorption for Navier–Stokes models: Application to OpenFOAM®”. Em: *Coastal Engineering* 71, pp. 102–118.
- Patankar, S. (2018). *Numerical heat transfer and fluid flow*. CRC press.
- Issa, R. (1982). *Solution of the implicit discretized fluid flow equations by operator splitting*. *Mechanical Engineering Rep. Rel. téc. FS-82-15* (Imperial College London).
- Mendonça, A, J Dias, E Didier, C. Fortes, M. Neves, M. Reis, J. Conde, P Poseiro e P Teixeira (2018). “An integrated tool for modelling oscillating water column (OWC) wave



energy converters (WEC) in vertical breakwaters". Em: *Journal of Hydro-environment Research* 19, pp. 198–213.



A N E X O



ÁRVORE DE DIRETORIAS DO CASO DE ESTUDO DO  
OPENFOAM

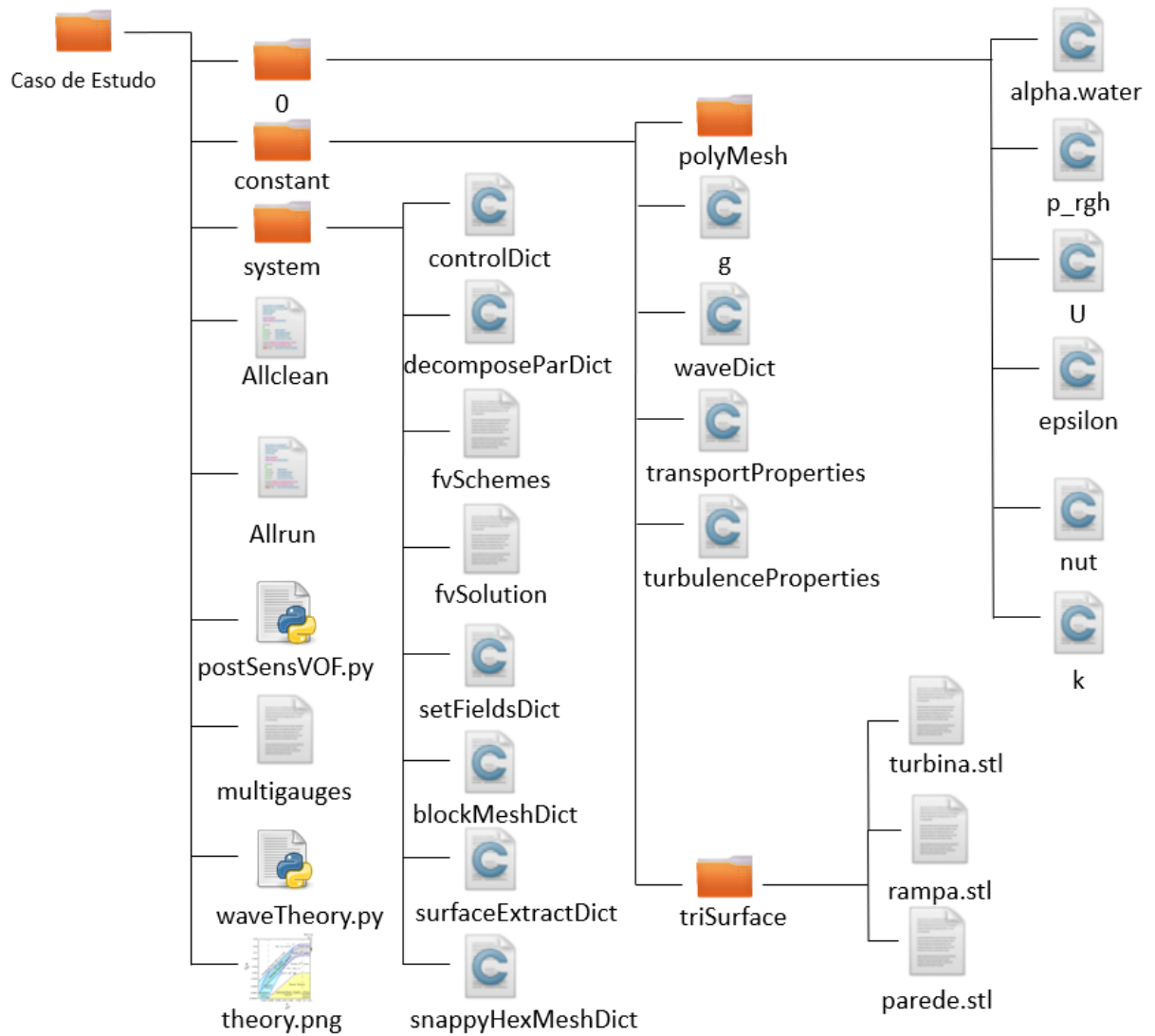


Figura I.1: Diagrama de diretórias em árvore que representa o conjunto de ficheiros e pastas para realizar uma das simulações realizadas nesta dissertação.